5543

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В. Ф. УТКИНА

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Методические указания к лабораторным работам

Рязань 2020

УДК 536.12

Электроэнергетические системы и сети: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: М.Н. Махмудов, А.А. Дягилев. Рязань, 2020. 48 с.

Содержат краткие теоретические сведения, задания и порядок выполнения лабораторных работ, позволяющие студентам закрепить теоретические знания и получить практические навыки по расчёту установившихся режимов электрических систем и сетей с использованием специализированного программного комплекса RastrWin.

Предназначены для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплину «Электроэнергетические системы и сети».

Табл. 17. Ил. 7. Библиогр.: 11 назв.

ЛЭП, ЭДС, потокораспределение, потокораздел, номинальное напряжение, трансформатор, сечение проводников, электрическая подстанция

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра ПЭл РГРТУ (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. С. А. Круглов)

Электроэнергетические системы и сети

Составители: М а х м у д о в Марат Наильевич
Д я г и л е в Александр Александрович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.04.20. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3.
Тираж 30 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Общая информация

Лабораторные работы по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети», посвящённые расчётам установившихся режимов электрических систем и сетей, выполняются на компьютерах с использованием специализированного программного комплекса RastrWin.

Схемы электрической сети приведены в приложении 1, а исходные данные (нагрузки в узлах, длины линий, марки проводов, типы трансформаторов) для каждого из 25 вариантов задания - в приложении 2 (для лабораторной работы № 1) и приложении 3 (для лабораторных работ № 2 - № 8). В приложении 4 дана необходимая справочная информация по воздушным линиям и трансформаторам, встречающимся в таблицах с исходными данными.

Лабораторная работа № 1 посвящена знакомству с промышленной программой RastrWin и изучению методики работы с ней. Схемой сети для данной работы является схема на рис. П.1.1 в приложении 1, а исходные данные приведены в приложении 2.

В лабораторной работе № 2 исследуются режимы электрической сети с одним номинальным напряжением U ном = 220 кВ. Для расчётов используется схема на рис. П.1.2 в приложении 1.

При выполнении лабораторной работы № 3 к схеме на рис. П.1.2 добавляются линия 3-4 и трансформатор Т (ветвь 4-5), в узле 5 подключается нагрузка S5 и генерируется мощность $S5_{ген}$ (схема на рис. П.1.3 в приложении 1).

В лабораторных работах № 4 - № 8 исследуются режимы электрической сети с двумя номинальными напряжениями 220 кВ и 110 кВ, при этом к схеме добавляются два автотрансформатора *АТ1, АТ2* и линия 6-7 с $U_{ном}$ = 110 кВ (схема на рис. П.1.4 в приложении 1). В середине линии 6-7 (в узле 8) имеется промежуточный отбор мощности.

Перед началом работы необходимо получить у преподавателя вариант задания, который будет действительным для всех лабораторных работ.

Лабораторная работа № 1. Изучение промышленной программы расчёта установившегося режима RastrWin и методики работы с программой

1.1. Цель работы

Знакомство с промышленным программным комплексом RastrWin. Получение навыков работы в среде программы RastrWin.

1.2. Краткие теоретические сведения

Общая информация о программе RastrWin. Программа RastrWin предназначена для расчёта и анализа установившихся режимов электроэнергетических систем. Предельный объём схемы полной версии программы 32000 узлов. Студенческая версия RastrWin, которая используется для выполнения лабораторных работ, имеет ограничения по числу узлов, максимальное количество которых не может превышать 60.

Программа RastrWin позволяет производить расчёт, эквивалентирование и утяжеление режима электрических сетей любой сложности и любого напряжения (от 0,4 до 1150 кВ), обеспечивает возможности экранного ввода и коррекции исходных данных, быстрого отключения узлов и ветвей схемы, имеет возможность районирования сети и графического представления схемы или отдельных ее фрагментов вместе с любыми исходными параметрами и результатами расчётов.

Подготовка исходных данных. Перед проведением расчётов исходные данные необходимо представить в форме, понятной RastrWin. Для этого составляется схема замещения всей сети, на которой проставляются номера всех узлов (включая среднюю точку трёхобмоточного трансформатора и автотрансформатора), которые должны быть уникальными и отличными от нуля целыми числами, а также номинальные напряжения для каждого узла. Отдельные элементы сети (энергосистема, генераторы, нагрузки, компенсирующие устройства, линии, трансформаторы) представляются на схеме замещения в виде, показанном на рис. 1.1 и рис. 1.2.

На рис. 1.1 и рис. 1.2 обозначены величины:

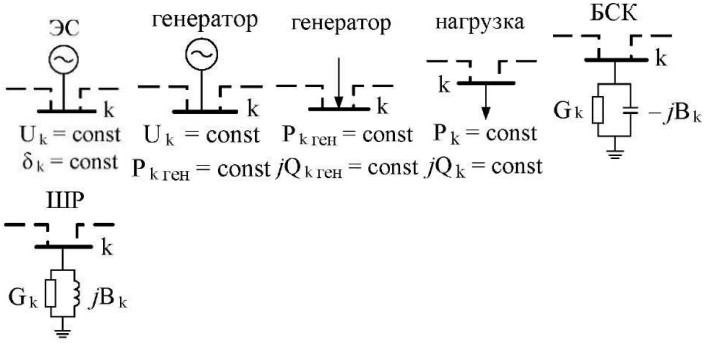
k, i, j, m, n - номера узлов;

U_k - напряжение в k-м узле;

δ_k- угол напряжения в k-м узле;

$P_{k\,ген}$, $Q_{k\,ген}$ - активная и реактивная мощности генерации в k-м узле;

P_k, Q_k - активная и реактивная мощности нагрузки в k-м узле;
G_k, B_k - активная и реактивная проводимости k-го узла с батарей статических конденсаторов (БСК) или шунтирующими реакторами (ШР); R_{jj}, X_{jj}, R_{jm}, X_{jm}, R_{jn}, X_{jn} - активные и реактивные сопротивления ветвей i-j, j-m, j-n;
G_{ij}, B_{ij} - активная и реактивная проводимости ветви i-j;
kt_{ij}, kt_{jm}, kt_{jn} - коэффициенты трансформации ветвей i-j, j-m, j-n.
Параметры ветвей, относящихся к трансформаторам, должны быть приведены к напряжению высокой обмотки.



а б в г д е

Рис.1.1. Схемы замещения узлов электрической сети: а - энергосистема;
б - генератор с фиксированными напряжением и активной мощностью;
в - генератор с фиксированной генерируемой мощностью; г - узел нагрузки; д - узел с БСК; е - узел с ШР.

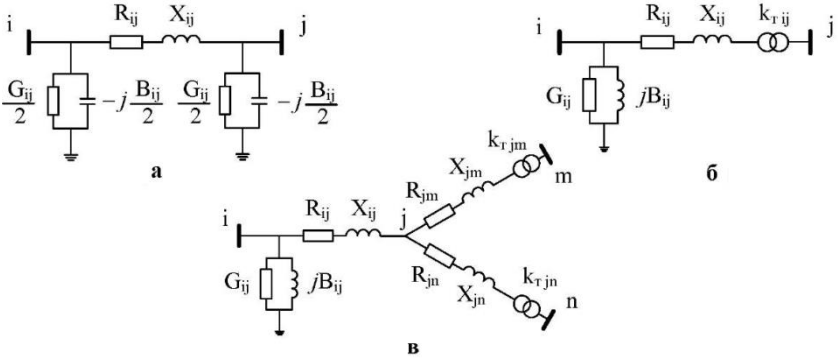


Рис.1.2 Схемы замещения ветвей электрической сети: (а) - ЛЭП; (б) - двухобмоточный трансформатор; (в) - трёхобмоточный трансформатор или автотрансформатор.

Начало работы с RastrWin. После открытия программы RastrWin открывается окно *Рабочей области*, на котором в отдельных окнах отображается содержимое загруженных файлов (таблицы режимов, графика и т.д.).

Для загрузки в *Рабочую область* существующего на диске файла режима сети необходимо выполнить команду *Загрузить...* в пункте *Файлы* главного меню программы и выбрать нужный файл с расширением *rg2*.

Перед вводом новой схемы нужно выполнить команду *Новый* в пункте *Файлы* главного меню и отметить галочкой тип файла режим. *rg2* (*Файлы-Новый-режим. rg2*). После этого целесообразно сразу сохранить вновь созданный файл режима (*Файлы-Сохранить как…*) в рабочем каталоге студента под именем, удобным для восприятия и идентификации и содержащим информацию о группе, фамилии студента, номере лабораторной работы, например *Es-31_Ivanov_1.rg2*.

После сохранения файла режима нужно открыть два окна, содержащие пустые таблицы для ввода информации об узлах и ветвях сети (*Открыть-Узлы-Узлы* и *Открыть-Ветви-Ветви*), которые с помощью пункта *Окна* главного меню можно расположить на экране подходящим образом - каскадом, горизонтальной либо вертикальной мозаикой.

Открытые таблицы *Узлы* и *Ветви* содержат столбцы и строки, в которые заносится информация об узлах и ветвях. Каждый столбец (поле) соответствует определённому виду данных (название, номинальное напряжение, сопротивление и т.д.), а каждая строка является записью (набором данных) для каждого узла или ветви.

Для добавления в таблицу строк, их удаления и дублирования необходимо использовать команды *Вставить, Добавить, Удалить*, *Дублировать* в пункте Таблица главного меню (добавление происходит в конец таблицы, а вставка - перед выделенной строкой).

Перемещаться по столбцам и строкам таблиц можно с помощью мыши и соответствующих клавиш клавиатуры, а переключаться между режимами просмотра и редактирования таблицы - щелчком мыши на выделенной ячейке клавишами *Enter* и *F2*.

Настройка рабочей области программы. Заголовки столбцов таблиц содержат названия данных, которые необходимо занести в соответствующее поле (исходные данные) либо которые будут

определены в процессе расчёта режима сети (расчётные данные). Некоторые из нужных/ненужных столбцов данных могут отсутствовать/присутствовать в таблицах, что зависит от настроек программы. Сделать видимыми или скрыть столбцы с необходимой информацией (исходной либо расчётной) на время текущего сеанса работы с данным файлом можно с помощью команд *Скрыть, Заменить на, Вставить за, Вставить до* в меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши на заголовке соответствующего столбца.

Ширину столбцов в таблицах и точность вывода числовой информации в полях можно менять с помощью полей *Ширина* и *Точность* диалогового окна, появляющегося после нажатия правой кнопкой мыши на заголовке нужного столбца и последующего выбора пункта меню с названием столбца (первый пункт меню). При этом менять *Заголовок* и *Описание* столбца данных **не желательно.**

Изменять ширину столбцов на время данного сеанса работы с загруженным файлом можно также с помощью мыши, изменяя границы столбца в области его заголовка. Однако эта операция не позволит сохранить проведённые изменения после выхода из программы или открытия нового файла.

Быстрым двойным нажатием левой кнопки мыши на заголовке столбца информацию в столбцах можно сортировать по возрастанию или убыванию. Переместить столбец таблицы позволяет повторное нажатие левой кнопкой мыши на его заголовке с последующим её удержанием.

Чтобы изменения в настройках не исчезли после открытия другого файла или выхода из программы, необходимо их сохранить. Для сохранения добавленных или удалённых из таблиц столбцов нужно после нажатия правой кнопки мыши на заголовке любого столбца выбрать пункт меню *Запомнить* и нажать *OK*, затем выполнить команду *Файлы-Настройки программы-Формы*, в диалоговом окне *Формы* из списка *Форма* выбрать название таблицы (*Узлы* или *Ветви*), последовательно нажать *Применить* и *Сохранить* и при всех выбранных галочках в появившемся окне нажать *OK*, после чего нажать *Закрыть*.

Если необходимо сохранить ширину столбцов и точность вывода данных, нужно выполнить команду *Сохранить шаблон* в пункте *Файлы* главного меню.

Занесение в программу информации об узлах и ветвях. Ввод схемы сети рекомендуется начинать с данных по узлам. Минимально необходимым набором информации для каждого узла сети являются:

О - отметка узла (используется для сортировки, выборки, эквивалентирования и т.д.); в данном поле пусто, если узел не отмечен;

S - состояние узла (включен/отключен); во включенном состоянии узла поле является пустым;

тип - тип узла (*База, Нагр, Ген+, Ген-*); определяется программой автоматически за исключением базисного (балансирующего) узла, в качестве которого необходимо задать шины энергосистемы (ЭС на рис.1.1, а), выбрав в данной ячейке вариант *База*;

номер - номер узла; задаётся в соответствии со схемой замещения сети;

название - задаётся название узла;

$U_{ном}$ - задаётся номинальное напряжение узла, [кВ];

$P_н$, $Q_н$ - активная и реактивная мощности нагрузки в узле; заносятся величины P_k, Q_k (рис.1.1, г), [МВт] и [МВАр];

$P_г$, $Q_г$ - активная и реактивная мощности генерации в узле; задаётся величина $P_{кген}$ для случая рис.1.1, б и $P_{кген}$, $Q_{кген}$ для случая рис.1.1, в; может также задаваться только $Q_{кген}$ для *КУ* (+ $Q_{кген}$ для БСК, - $Q_{кген}$ для ШР, ± $Q_{кген}$ для СК); для базисного (балансирующего) узла - расчётные величины, [МВт] и [МВАр];

Q_{min}, Q_{max} - пределы генерации реактивной мощности в узле; задаются для генераторных узлов для случая на рис.1.1, б [МВАр];

$V_{зд}$ - модуль фиксированного напряжения в узле; задаётся и фиксируется напряжение Uk, [кВ]:

а) на шинах энергосистемы, т.е. для базисного (балансирующего) узла (рис.1.1, а);

б) в генераторных узлах для случая на рис.1.1, б, если позволяют заданные пределы генерации реактивной мощности Q_{min}-Q_{max} и $Q_{min}<Q_{max}$;

$G_ш$, $B_ш$ - активная и реактивная проводимости шунта на землю в узлах, где установлены БСК или ШР; задаются величины G_k, - B_k для случая на рис.1.1, д и G_k, B_k для случая на рис.1.1, е [мкСм];

V - расчётный модуль напряжения в узле; для базисного (балансирующего) и генераторного узла (рис.1.1, б) задаётся автоматически и фиксируется после задания величины $V_{зд}$, для остальных узлов рассчитывается программой, [кВ];

Delta - расчётный угол напряжения в узле; для базисного (балансирующего) узла задаётся и фиксируется величина δ_k (рис.1.1, а), для остальных узлов рассчитывается программой, [град].

Основными полями, в которые заносятся исходные данные по ветвям сети, являются:

О - отметка ветви (используется для сортировки, выборки, эквивалентирования и т.д.); в данном поле пусто, если ветвь не отмечена;

S - состояние ветви (включена/отключена); во включенном состоянии ветви поле является пустым; ветвь может быть отключена в начале, в конце или с обеих сторон;

тип - тип ветви (*ЛЭП, Тр-р*); определяется программой автоматически по значению ячейки, в которую заносится коэффициент трансформации ветви;

$N_{_нач}$, $N_{_кон}$ - номера узлов, которыми ограничена ветвь; для трансформатора начало ветви **$N_{_нач}$** - это о**бязательно** тот узел, к напряжению которого приведены его параметры (как правило, это напряжение высокой обмотки);

название - название ветви; задаётся программой автоматически по известным названиям узлов, ограничивающих данную ветвь;

$N_{_п}$ - номер параллельной ветви; задаётся, если несколько линий или трансформаторов работают параллельно;

R, X - активное и реактивное сопротивления ветви; задаются величины R_{jj}, X_{jj}, R_{jm}, X_{jm}, R_{jn}, X_{jn} по рис.1.2, [Ом];

G, B - суммарные активная и реактивная проводимости ветви; задаются величины G_{ij}, - B_{ij} для ЛЭП (рис.1.2, а) и G_{ij}, B_{ij} для трансформатора (рис.1.2, б, в), [мкСм];

$K_{T/r}$ - вещественная часть комплексного коэффициента трансформации трансформатора; поскольку для большинства трансформаторов коэффициент трансформации совпадает с его вещественной частью, в это поле заносятся величины kt_{ij} , kt_{jm}, kt_{jn} (рис.1.2, б, в); **важно**: величина **KT/r** есть отношение номинального напряжения обмотки узла **$N_{_кон}$** к номинальному напряжению обмотки узла **$N_{_нач}$**, т.е. **KT/r < 1.**

После занесения исходной информации в таблицы *Узлы* и *Ветви* созданный файл режима необходимо сохранить.

Расчёт режима сети. Перед расчётом установившегося режима сети при необходимости нужно настроить параметры расчёта, для чего через главное меню программы должна быть открыта таблица *Режим (Расчёты-Параметры-Режим).* Значение параметра *Точность расчёта (dP)* (задаётся в МВт) необходимо корректировать в зависимости от мощностей в узлах сети, поскольку при точности, соизмеримой с нагрузками, результаты расчёта могут оказаться некорректными. Значения остальных параметров из таблицы *Режим* можно оставить принятыми по умолчанию и изменять, только если

возникли проблемы при расчёте режима (некорректно заданы исходные данные, режим расходится и т. п.).

Расчёт режима сети производится после выполнения команды *Расчёты-Режим* или нажатия клавиши *F5*.

При аварийном завершении расчёта (режим разошёлся) в появившемся окне *Протокол* с постадийным описанием итерационного процесса будет содержаться краткое описание ошибки, отмеченное красным значком. Кроме того, в данном случае программа автоматически может произвести изменения в таблицах *Узлы* и *Ветви* (отключить некоторые узлы или ветви), которые необходимо устранить после исправления ошибок, приведших к аварийному завершению расчёта. После коррекции исходных данных и/или настроек программы расчёт режима нужно повторить.

Если расчёт завершился успешно (режим сошёлся), в окне *Протокол* не будет сообщений об ошибках. Значение поля *Мах.неб*. в последней строке таблицы сходимости окна Протокол не должно быть выше значения параметра *Точность расчёта (dP)* в таблице *Режим*.

Сохранение результатов расчёта. Чтобы сохранить результаты расчёта режима сети, отображённые в таблицах *Узлы* и *Ветви,* необходимо сделать активным соответствующее окно и нажать клавишу *Print Screen*. Данные скопируются в буфер обмена, которые необходимо будет вставить в текстовой отчет. Полный отчет по лабораторной работе формируется в текстовом формате и выкладывается в для проверки в системе дистанционного обучения РГРТУ Moodle: http://cdo.rsreu.ru/.

Оформление результатов расчёта режима. На примере расчётной схемы электрической сети, принципиальная схема которой приведена на рис. П.1.1 приложения 1, на рис. 1.3 показано, как оформлять результаты расчёта режима при выполнении лабораторных работ.

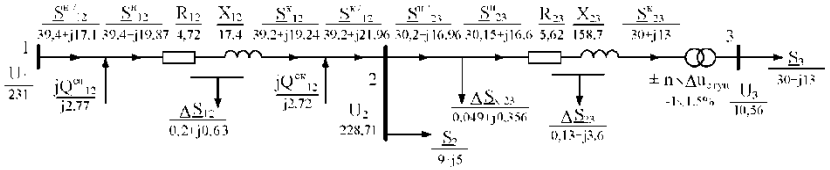


Рис.1.3. Расчётная схема сети с результатами расчёта режима

Некоторые величины, обозначенные на рис. 1.3:

$\underline{S}^{H/}_{12}$, $\underline{S}^{H/}_{23}$ - потоки мощности в начале ветвей 1-2 и 2-3 (столбцы **SI_нач** либо **P_нач** и **Q_нач** в таблице *Ветви* программы RastrWin);

$\mathbf{jQ}^{\mathbf{CH/}}_{\mathbf{12}}$ - зарядная мощность в начале ветви 1-2 (рассчитывается вручную по половине проводимости B_{12} и вычисленному RastrWin напряжению в начале ветви 1-2);

$\Delta\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{x23}}$ - потери мощности х.х. трансформатора ветви 2-3 (столбцы данных $\mathbf{P}_{\mathbf{_ш}}$ и $\mathbf{Q}_{\mathbf{_ш}}$ в **RastrWin**, соответствующие мощности шунта ветви);

$\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{H/}}_{\mathbf{12}}$, $\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{H/}}_{\mathbf{23}}$ - потоки в начале продольной части соответствующих ветвей сети (не отображаются в **RastrWin**, рассчитываются по известным $\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{H/}}_{\mathbf{12}}$, $\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{H/}}_{\mathbf{23}}$ и $\mathbf{jQ}^{\mathbf{CH/}}_{\mathbf{12}}$, $\Delta\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{x23}}$ соответственно);

$\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{K/}}_{\mathbf{12}}$, $\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{K/}}_{\mathbf{23}}$ S12, S23 - потоки мощности в конце ветвей 1-2 и 2-3 (столбец $\mathbf{SI}_{\mathbf{_кон}}$ или $\mathbf{P}_{\mathbf{_кон}}$ и $\mathbf{Q}_{\mathbf{_кон}}$ в таблице *Ветви* **RastrWin**);

$\mathbf{jQ}^{\mathbf{CK/}}_{\mathbf{12}}$ - зарядная мощность в конце ветви 1-2 (рассчитывается вручную по половине проводимости B12 и вычисленному RastrWin напряжению в конце ветви 1-2);

$\underline{\mathbf{S}}^{\mathbf{K}}_{\mathbf{12}}$ - поток мощности в конце продольной части ветви 1-2;

$\Delta\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{12}}$, $\Delta\underline{\mathbf{S}}_{\mathbf{23}}$ - потери мощности в продольной части (сопротивлениях) ветвей сети (столбцы **dP** и **dQ** в таблице *Ветви* программы RastrWin);

$\pm n \times \Delta u_{ступ}$ - номер регулировочного ответвления трансформатора и ступень регулирования.

1.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.1, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (приложение 2).
3. Начертить схему замещения сети по примеру рис. 1.1 и 1.2. Рассчитать параметры схемы замещения сети, нанести их на схему.
4. Начертить расчётную схему сети с обозначением её параметров, обозначить потоки мощности и напряжения в узлах (рис. 1.3).

1.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы и раздел "Общая информация".
2. Открыть программу RastrWin, создать в ней новый файл режима и сохранить его на диске.
3. Открыть в *Рабочей области* программы таблицы *Узлы* и *Ветви*, расположить их так, чтобы было удобно работать.
4. Добавить в таблицы *Узлы* и *Ветви* по 2-3 любых столбца, изначально скрытых. Сохранить настройки. Выйти из программы, снова её загрузить, открыть файл режима и убедиться, что изменения в таблицах сохранились.

5. Изменить ширину добавленных столбцов и точность отображения информации в них. Сохранить настройки. Выйти из программы, снова её загрузить, открыть файл режима и убедиться, что изменения в таблицах *Узлы* и *Ветви* сохранены.
6. Занести информацию о сети в программу RastrWin. Сохранить файл режима на диске.
7. Выполнить расчёт режима сети.
8. Добавить в таблицу *Ветви столбцы*, отражающие информацию о потокораспределении в сети.
9. По результатам расчёта режима нанести на расчётную схему значения потоков мощности и напряжения в узлах сети.
10. Сохранить результаты расчёта режима.
11. Вернуть настройки программы к начальному виду, для чего отменить изменения, сделанные в п. п. 4, 5 и 8. Сохранить изменения и убедиться, что они вступили в силу.

1.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.
4. Расчётная схема сети с указанием потоков мощности и напряжений в узлах.
5. Результаты расчёта режима.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена программа RastrWin?
2. В каком виде должна быть представлена схема сети для расчёта режима в программе RastrWin?
3. Как создать новый файл режима в RastrWin?
4. Каково назначение таблиц *Узлы* и *Ветви*?
5. Как вставить или удалить строки в таблицах?
6. Как скрывать и делать видимыми столбцы в таблицах программы? Как сохранить изменения?
7. Каким образом можно изменять ширину столбцов и точность отображения информации в таблицах, как сохранить данные настройки?
8. Как можно изменить точность расчёта режима?
9. Как оценить успешность произведённого расчёта режима сети?
10. Как распечатать результаты расчёта?

Лабораторная работа № 2. Расчёт и анализ установившихся режимов наибольших и наименьших нагрузок электрической сети одного номинального напряжения

2.1. Цель работы

Освоение методики расчёта замкнутых сетей с использованием специализированного программного обеспечения RastrWin.

2.2. Краткие теоретические сведения

Расчёты установившихся режимов выполняют для того, чтобы определить, насколько приемлем рассматриваемый режим с точки зрения качества доставляемой потребителю электрической энергии и соответствия токов в линиях допустимым токам.

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

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

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

$$\sum_{i=1}^{n} \underline{S_i}\ \dot{Z}_i = 0, \qquad (2.1)$$

где $\underline{S_i}$- комплекс полной мощности, протекающий по i-му участку сети;

$\dot{Z}_i$ - комплексно-сопряжённое сопротивление i-го участка сети;

n - число участков сети в контуре.

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

$$\sum_{i=1}^{n}(P_i R_i + Q_i X_i) = 0; \qquad \sum_{i=1}^{n}(P_i R_i - Q_i X_i) = 0, \qquad (2.2)$$

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

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

В результате расчёта по уравнениям (2.2) находится

потокораспределение без учета потерь мощности.

На втором этапе рассчитывается потокораспределение с учетом потерь мощности и напряжения в узлах сети. Для этого из всех найденных на первом этапе потоков мощности в качестве истинных принимаются два вблизи точки потокораздела, по ним находят потери мощности на участках и потоки в начале и конце каждого участка, двигаясь в направлении от точки потокораздела к опорному (балансирующему) узлу.

Например (см. рис. П.1.2 в приложении 1), если в качестве истинно найденной принята мощность в конце участка 2-3, то потери мощности на участке 2-3 находим, используя номинальное напряжение:

$$\Delta P_{23} = \frac{(P_{23}^{к})^2 + (Q_{23}^{к})^2}{U_{ном}^2} R_{23}; \quad \Delta Q_{23} = \frac{(P_{23}^{к})^2 + (Q_{23}^{к})^2}{U_{ном}^2} X_{23}. \qquad (2.3)$$

Мощность в начале участка 2 - 3:

$$P_{23}^{н} = P_{23}^{к} + \Delta P_{23}; \quad Q_{23}^{н} = Q_{23}^{к} + \Delta Q_{23}. \qquad (2.4)$$

Мощность в конце следующего участка 1 – 2:

$$P_{12}^{к} = P_{23}^{н} + P_{2р}; \quad Q_{12}^{к} = Q_{23}^{н} + Q_{2р}, \qquad (2.5)$$

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

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

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

$$U_2 = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_{12}^{н} R_{12} + Q_{12}^{н} X_{12}}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{P_{12}^{н} X_{12} + Q_{12}^{н} R_{12}}{U_1}\right)^2}. \qquad (2.6)$$

2.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.

2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.2, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл. П.3.1 и П.3.2, приложение 3).
3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Начертить расчётную схему сети с обозначением её параметров, обозначить потоки мощности и напряжения в узлах.
5. Используя уравнение (2.2), рассчитать вручную потокораспределение в сети без учёта потерь мощности, а затем найти потокораспределение с учетом потерь мощности и напряжения в узлах, пользуясь соотношениями (2.3) – (2.6).
6. Результаты расчётов нанести на расчётную схему.

2.4. Порядок выполнения работы

1. Занести информацию о сети в программу. Сохранить файл режима на Рабочем столе компьютера.
2. Выполнить расчёт режима наибольших нагрузок (табл. П.3.1, приложение 3). Результаты расчёта (потоки мощности, напряжения, потери мощности) нанести на расчётную схему.
3. Выполнить расчёт режима наименьших нагрузок, снизив активные и реактивные нагрузки в узлах 2 и 3 на 50 %. Результаты расчёта нанести на расчётную схему.
4. Сравнить результаты расчётов, выполненных на компьютере и вручную. Сравнить результаты расчётов режимов наибольших и наименьших нагрузок. Сделать выводы о допустимости исследуемых режимов.
5. Определить потери активной, реактивной и зарядной мощностей в процентах от соответствующей суммарной нагрузки сети.
6. Выполнить на компьютере расчёты режима наибольших нагрузок, снизив U1: а) на 10 %; б) на 20 %. Сделать вывод о влиянии напряжения балансирующего узла на режим электрической сети.
7. Восстановить исходный режим по напряжению U1. Выполнить расчёты утяжеленных режимов, увеличив нагрузки в узлах 2 и 3 по сравнению с заданными в табл. П.3.1 приложения 3: а) на 30%; б) на 60%.
8. Сравнить результаты расчёта с полученными ранее и сделать вывод.
9. Восстановить исходный режим для дальнейшей работы.

2.5. Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.
4. Расчёт потокораспределения по уравнениям (2.2).
5. Расчётные схемы с результатами расчётов на компьютере режимов наибольших и наименьших нагрузок по п. п. 2, 3, 6, 7.
6. Анализ результатов расчётов по п. п. 2 – 7 и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие допущения принимаются при расчёте потокораспределения по уравнениям (2.1), (2.2)?
2. Расскажите об известных вам методах расчёта замкнутых сетей.
3. В чем отличие расчёта замкнутых сетей от разомкнутых?
4. Какие факторы способствуют снижению потерь мощности в сетях?
5. Как рассчитать падение и потерю напряжения?
6. Начертить векторную диаграмму линии, если известны напряжение и мощность в конце ЛЭП, и пояснить все ее составляющие.
7. Начертить векторную диаграмму линии, если известны напряжение и мощность в начале ЛЭП, и пояснить все ее составляющие.
8. Что такое точка потокораздела?
9. Как выполняется расчёт потокораспределения и напряжения, если направления активной и реактивной мощностей на линии не совпадают?
10. Что называется однородной сетью и как выполняется расчёт потокораспределения в такой сети?

Лабораторная работа № 3. Расчёт и анализ послеаварийных режимов электрической сети одного номинального напряжения. Регулирование напряжения изменением ответвлений трансформаторов

3.1. Цель работы

Освоение методики расчёта разомкнутых сетей. Освоение принципа отключения ветвей и выбора ответвлений трансформаторов с помощью специализированного программного обеспечения RastrWin.

3.2. Краткие теоретические сведения

Послеаварийные режимы в электрической сети наступают после отключения одного или нескольких элементов (линий,

трансформаторов). При этом потокораспределение в сети изменяется и может стать таким, что сечения проводов линий, выбранные по условию нормального режима, окажутся перегруженными по току, а напряжения на шинах подстанций, удаленных от источников питания, могут оказаться недопустимо низкими. Для того чтобы оценить величину потоков мощности и напряжения в узлах сети, необходимо выполнить расчёт. Расчёт послеаварийного режима в одноконтурной сети (например, рис. П.1.2, приложение 1) сводится к расчёту радиальной сети, в которой заданы нагрузки в конце линии и напряжение в начале. Расчёт такой сети осуществляется в два этапа. На первом этапе принимают напряжения во всех точках сети равными номинальному $U_{ном}$ и определяют потоки и потери мощности в линиях, двигаясь от последней нагрузки в направлении источника питания. Так, если отключена линия 1-3 (см. рис. П.1.2 приложения 1), находим мощность в конце участка 2-3 и в конце его продольной части:

$$\underline{S}_{23}^{к/} = P_3 + jQ_3, \qquad (3.1)$$

$$\underline{S}_{23}^{к} = P_3 + jQ_3 - j\frac{Q_{c23}}{2},$$

где $Q_{_c23}$ – зарядная мощность линии 2-3.

Далее определим потери мощности в линии 2-3:

$$P_{23} = \frac{(P_{23}^{к})^2 + (Q_{23}^{к})^2}{U_{ном}^2} R_{23}; \quad \Delta Q_{23} = \frac{(P_{23}^{к})^2 + (Q_{23}^{к})^2}{U_{ном}^2} X_{23}. \qquad (3.2)$$

После этого найдем мощность в начале участка 2-3 и в начале его продольной части:

$$\underline{S}_{23}^{н/} = (P_{23}^{к} + jQ_{23}^{к}) + (\Delta P_{23} + j\Delta Q_{23}) - j\frac{Q_{c23}}{2},$$

$$\underline{S}_{23}^{н} = (P_{23}^{к} + jQ_{23}^{к}) + (\Delta P_{23} + j\Delta Q_{23}). \qquad (3.3)$$

Найдем мощность в конце следующего участка 1-2 и в конце его продольной части:

$$\underline{S}_{12}^{к/} = \underline{S}_{23}^{н/} + \underline{S}_2; \qquad (3.4)$$

$$\underline{S}_{12}^{к} = \underline{S}_{23}^{н} + \underline{S}_2 - j\frac{Q_{c23}}{2} - j\frac{Q_{c12}}{2},$$

где Q_{c12} – зарядная мощность линии 1-2.

И так далее до узла 1.

На втором этапе по известным напряжению и мощности в начале продольной части участка сети определяется напряжение в конце участка. Начинают от источника питания, где напряжение известно, и двигаются к последней нагрузке, например:

$$U_2 = \sqrt{\left(U_1 - \frac{P_{12}^{н} R_{12} + Q_{12}^{н} X_{12}}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{P_{12}^{н} X_{12} - Q_{12}^{н} R_{12}}{U_1}\right)^2}. \quad (3.5)$$

Выбор ответвлений устройства регулирования напряжения трансформаторов (устройства РПН – регулирования под нагрузкой) осуществляется для того, чтобы обеспечить желаемые напряжения на шинах низшего напряжения подстанций $U_{н.ж}$.

Для двухобмоточного трансформатора Т (ветвь 4-5 на рис. П.1.3 приложения 1), определив мощность $P_{45}^{н} + j\,Q_{45}^{н}$ и напряжение на шинах высшего напряжения U_4, найдём напряжение на шинах низшего напряжения, приведённое к стороне высшего напряжения:

$$U_5^{в} = \sqrt{\left(U_4 - \frac{P_{45}^{н} R_{45} + Q_{45}^{н} X_{45}}{U_4}\right)^2 + \left(\frac{P_{45}^{н} X_{45} - Q_{45}^{н} R_{45}}{U_4}\right)^2}, \quad (3.6)$$

где R_{45} и X_{45} – активное и реактивное сопротивления трансформатора.

Расчётное напряжение ответвления обмотки высшего напряжения можно определить как

$$U_{отв.р} = \frac{U_5^{в}}{U_{5.ж}} U_{нн}, \quad (3.7)$$

где $U_{5.ж}$ – желаемое напряжение на шинах низкого напряжения;

$U_{нн}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора.

По $U_{отв.р}$ выбирают стандартное ответвление с напряжением $U_{отв.ст}$, ближайшим к расчётному:

$$U_{отв.ст} = U_{вн} \pm n\frac{\Delta u_{ступ}}{100} U_{вн} = U_{вн} \pm \frac{\delta U, \%}{100} U_{вн} = U_{вн} \pm \delta U, \quad (3.8)$$

где $U_{вн}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора;

n – номер выбранного ответвления;

$\Delta u_{ступ}$ – ступень регулирования, %;

δU, % – надбавка напряжения, %;

δU – надбавка напряжения, кВ.

Тогда действительное напряжение на шинах низшего напряжения составит

$$U_{5.д} = \frac{U_5^{в}}{U_{отв.ст}} U_{нн}. \quad (3.9)$$

В отличие от двухобмоточных трансформаторов, у автотрансформаторов устройство регулирования напряжения находится со стороны обмотки среднего напряжения. Предположим, для *АТ1* (рис. П.1.4, приложение 1) рассчитано напряжение $U_6^{в}$ в на шинах среднего напряжения, приведённое к высшему напряжению.

Тогда расчётное напряжение ответвления обмотки среднего напряжения

$$U_{отв.р} = \frac{U_{вн}}{U_б^в} U_{б.ж}, \quad (3.10)$$

где $U_{б.ж}$ – желаемое напряжение на шинах среднего напряжения;

$U_{вн}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения автотрансформатора.

После выбора стандартного ответвления $U_{отв.ст}$ [по (3.8), но вместо $U_{вн}$ подставляется номинальное напряжение средней обмотки $U_{сн}$] определяют действительное напряжение на шинах среднего напряжения:

$$U_{б.д} = \frac{U_б^в}{U_{вн}} U_{отв.ст}. \quad (3.11)$$

На коэффициент трансформации между обмотками высокого и низкого напряжений автотрансформатора устройство РПН, расположенное со стороны средней обмотки, не влияет.

При выборе ответвлений трансформаторов с помощью RastrWin коэффициенты трансформации следует учитывать следующим образом (в данном выражении для двухобмоточного трансформатора):

$$k_т = \frac{U_{нн}}{U_{отв.ст}} = \frac{U_{нн}}{U_{вн} \pm \delta U}, \quad (3.12)$$

где δU – надбавка напряжения, кВ.

Таким образом, $k_т$ при занесении его значения в программу должен быть меньше единицы!

Для поддержания в узле 5 (на шинах низкого напряжения трансформатора *T* ветви 4-5) желаемого напряжения $U_{5.ж}$ из таблицы поочередно выбирают $k_т$ и заносят в программу данные о ветвях.

Коэффициенты трансформации трансформатора Т ветви 4-5

Номер ответвления n			…	-1	0	1	…		
Надбавка δU , %			…				…		
Надбавка δU, кВ			…				…		
$U_{отв.ст}$, кВ			…				…		
$k_т$ [по (3.12)]			…				…		

3.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.

2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.3, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл.П.3.1, П.3.2 и П.3.3 приложения 3).
3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Начертить расчётную схему сети, обозначить потоки мощности и напряжения в узлах.
5. Выполнить вручную расчёт послеаварийного режима сети с отключенной линией 1-3. Потокораспределение и напряжения нанести на расчётную схему.
6. Выбрать ответвление трансформатора Т (ветвь 4-5) в режиме наибольших нагрузок, пользуясь формулами (3.6) – (3.9). Принять U5.ж=1,05Uнн.
7. Вычислить значения Uотв.ст и kt для трансформатора Т и заполнить таблицу.

3.4. Порядок выполнения работы

1. Открыть файл режима наибольших нагрузок (сохранённый в л/р № 2).
2. Добавить к схеме узлы 4, 5 и ветви 3-4, 4-5. Сохранить файл на Рабочем столе под новым именем.
3. Выполнить расчёты для следующих случаев, выбирая ответвление трансформатора Т ветви 4-5:

а) все линии включены;
б) отключена линия 1-3;
в) отключена линия 1-2;
г) отключена линия 2-3.

4. Начертить расчётные схемы четырёх рассмотренных режимов и указать на них потоки мощности, напряжения, ответвления трансформатора, записать потери мощности по участкам и суммарные потери.
5. Сравнить результаты расчётов, выполненных вручную и на компьютере.
6. Определить потери активной и реактивной мощностей в процентах от суммарной нагрузки сети.
7. Восстановить режим п. 3,а.
8. Выполнить выбор ответвлений трансформаторов:
9. а) при увеличении U1 на 10 %;
10. б) при снижении U1 на 10 %;
11. в) в режиме наименьших нагрузок при снижении нагрузок в узлах 2 и 3 на 50 % и исходном напряжении U1.

12. Выполнить сравнение и анализ результатов проведенных расчётов.
13. Сделать выводы по работе.

3.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.
4. Расчёт потокораспределения, напряжений и ответвлений трансформатора по уравнениям (3.1) – (3.9).
5. Расчётная схема сети с указанием потоков мощности и напряжений в узлах по результатам ручного расчёта.
6. Расчётные схемы с результатами расчётов на компьютере всех режимов.
7. Анализ результатов расчётов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как выполняется расчёт радиальной сети, если задано напряжение в начале, а нагрузка в конце?
2. Как выполняется расчёт радиальной сети, если напряжение и мощность заданы в ее начале?
3. Как выполняется расчёт радиальной сети, если напряжение и мощность заданы в ее конце?
4. Как выполняется расчёт радиальной сети, если задана мощность в начале, а напряжение в конце?
5. Каковы особенности послеаварийных режимов?
6. Как построить векторную диаграмму напряжений для линии с несколькими нагрузками вдоль нее?
7. Как рассчитать напряжение на шинах низшего напряжения подстанции?
8. Как рассчитываются падение и потеря напряжения?

Лабораторная работа № 4. Расчёт и анализ режимов наибольших и наименьших нагрузок электрической сети с несколькими номинальными напряжениями

4.1. Цель работы

Освоение методики расчёта замкнутых сетей с несколькими номинальными напряжениями с применением специализированного программного обеспечения RastrWin.

4.2. Краткие теоретические сведения

Замкнутые электрические сети, содержащие несколько номинальных напряжений, характеризуются большой степенью неоднородности, возникающей за счёт применения различных по величине сечений проводов и включения в контуры трансформаторов. Для расчёта таких сетей применяются обобщенные контурные уравнения:

$$\sum_{i=1}^{n} \underline{S}_i \dot{Z}_i = U_1^2 \left(1 - \prod_{i=1}^{n} \underline{k}_{T\,i}\right), \tag{4.1}$$

где U_1 – напряжение опорного узла;

$\underline{k}_{T\,i}$ – комплексные (в общем случае) коэффициенты трансформации трансформаторов с продольно-поперечным регулированием напряжения на i-м участке сети, вычисленные по направлению обхода контура.

Правая часть этого уравнения обусловлена действующей в контуре неуравновешенной ЭДС, появляющейся при неравенстве коэффициентов трансформации трансформаторов, включенных в контур.

Если опорное напряжение U_1 неизвестно, то в (4.1) подставляется номинальное напряжение сети, к которому приведены сопротивления $\underline{Z}_i$ всех линий и трансформаторов, входящих в контур (обычно это высшее напряжение контура).

В случае если в контур включены трансформаторы с продольным регулированием (обычные трансформаторы с ответвлениями), их коэффициенты трансформации $k_{T\,i}$ будут вещественными числами.

Вместо уравнения (4.1) для каждого контура можно записать два уравнения в вещественных числах:

$$\begin{gathered}\sum_{i=1}^{n} (P_i R_i + Q_i X_i) = \mathrm{Re}\left[U_1^2 \left(1 - \prod_{i=1}^{n} \underline{k}_{T\,i}\right)\right]; \\ \sum_{i=1}^{n} (P_i X_i - Q_i R_i) = \mathrm{Im}\left[U_1^2 (1 - \prod_{i=1}^{n} \underline{k}_{T\,i})\right],\end{gathered} \tag{4.2}$$

где Re и Im – соответственно действительная и мнимая составляющие, обусловленные неуравновешенной ЭДС, действующей в контуре.

В уравнениях (4.2) можно выделить составляющие мощностей P_i и Q_i на каждом участке сети: мощности $P_{нi}$ и $Q_{нi}$, обусловленные нагрузками, и уравнительную мощность $S_{ур} = P_{ур} + jQ_{ур}$, которая вызвана неуравновешенной ЭДС. Тогда уравнения (4.2) примут вид:

$$\sum_{i=1}^{n}(P_{ні}R_i + Q_{ні}X_i) = 0\ ;$$

$$\sum_{i=1}^{n}(P_{ні}X_i - Q_{ні}R_i) = 0\ ; \qquad (4.3)$$

$$P_{ур}\sum_{i=1}^{n}R_i + Q_{ур}\sum_{i=1}^{n}X_i = \mathrm{Re}\left[U_1^2\left(1 - \prod_{i=1}^{n}\underline{k}_{T\,i}\right)\right];$$

$$P_{ур}\sum_{i=1}^{n}X_i - Q_{ур}\sum_{i=1}^{n}R_i = \mathrm{Im}\left[U_1^2\left(1 - \prod_{i=1}^{n}\underline{k}_{T\,i}\right)\right].$$

Таким образом, распределение мощности в замкнутой сети нескольких номинальных напряжений с неодинаковыми коэффициентами трансформации трансформаторов связи получается как результат наложения двух режимов: потокораспределения от нагрузок без учета неуравновешенной ЭДС и потокораспределения от неуравновешенной ЭДС без учета нагрузок. Найденное таким образом потокораспределение является приближённым, так как не учитывает потерь мощности в линиях и трансформаторах. На втором этапе расчёта находят потоки мощности в начале и конце каждого участка сети и напряжения на шинах всех подстанций (см. лаб. раб. № 2 и № 3).

4.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.4, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл.П.3.1, П.3.2 и П.3.3 приложения 3).
3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Начертить расчётную схему сети с обозначением её параметров, обозначить потоки мощности и напряжения в узлах.

4.4. Порядок выполнения работы

1. Вызвать с диска режим, соответствующий рис. П.1.3 приложения 1 и пункту 3,а л/р № 3.
2. Добавить к схеме узлы 6, 7, 8, ветви 2-6, 3-7, 6-8 и 7-8. В узлах 2 и 3 указать Uном = 220 кВ, в узлах 6 ,7 и 8 указать Uном = 110 кВ. Сохранить файл на Рабочем столе под новым именем.
3. Выполнить расчёт режима наибольших нагрузок. Результаты расчёта нанести на расчётную схему (потоки мощности, напряжения, потери мощности).

4. Снизив нагрузки в узлах 2, 3, 6, 7 на 50 %, выполнить расчёт режима наименьших нагрузок. Результаты расчёта нанести на расчётную схему.
5. Сделать выводы о допустимости рассматриваемых режимов электрической сети.
6. Определить потери мощности в процентах от соответствующей суммарной нагрузки сети.
7. Выполнить расчёт режимов:
а) нагрузки в узлах 2, 3 наибольшие, а нагрузки в узлах 6, 7 соответствуют режиму наименьших нагрузок;
б) нагрузки в узлах 6, 7 наибольшие, а нагрузки в узлах 2, 3 соответствуют режиму наименьших нагрузок. Результаты расчётов нанести на расчётную схему. Сравнить результаты расчётов и сделать выводы о приемлемости рассматриваемых режимов.
8. Восстановить режим наибольших нагрузок для последующей работы.

4.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.
4. Расчётные схемы с результатами расчётов на компьютере всех режимов.
5. Анализ результатов расчётов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как учитываются токи в трансформаторных ветвях при составлении баланса токов в узлах при решении методом узловых напряжений?
2. Пояснить сущность и область применения метода обобщенных контурных уравнений.
3. Что такое уравнительная мощность? От чего она зависит?
4. Как зависит неуравновешенная ЭДС от коэффициентов трансформации трансформаторов связи?
5. Записать контурное уравнение для случая, когда в контур последовательно включены четыре трансформатора связи.
6. Каковы допустимые отклонения напряжения на шинах подстанций?
7. В чем различие между расчётом замкнутых однородных и неоднородных сетей?
8. Кратко охарактеризуйте методы расчётов замкнутых сетей.

9. Что называется номинальным напряжением?
10. Как моделируются линии и трансформаторы при расчёте вручную и на компьютере?

Лабораторная работа № 5. Оптимизация режимов замкнутой электрической сети двух номинальных напряжений с помощью коэффициентов трансформации трансформаторов

5.1. Цель работы

Освоение принципов оптимизации режимов замкнутой сети за счёт регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов связи сетей различных номинальных напряжений.

5.2. Краткие теоретические сведения

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

$$\underline{E} = E' + jE'' = U_1\left(1 - \prod_{i-1}^{m} \underline{k}_{T\,i}\right), \tag{5.1}$$

где E' и E'' – соответственно продольная и поперечная составляющие ЭДС;
m – количество трансформаторов в контуре.

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

$$\underline{E} = E' = U_1\left(1 - \prod_{i=1}^{m} \underline{k}_{T\,i}\right), \tag{5.2}$$

Эта ЭДС будет создавать уравнительную мощность:

$$\underline{S}_{уp} = P_{уp} + jQ_{уp} = \sqrt{3}U_1\frac{\dot{E}}{\sqrt{3}\dot{Z}_k} = \frac{U_1\dot{E}}{\dot{Z}_k}, \tag{5.3}$$

где $\dot{Z}_k = \sum_{i=1}^{n}\dot{Z}_i$ – суммарное комплексно-сопряжённое сопротивление всех ветвей контура.

Если в контуре создаётся только продольная ЭДС, то

$$\underline{S}_{уp} = P_{уp} + jQ_{уp} = \frac{U_1E'}{\dot{Z}_k} = \frac{{U_1}^2\left(1 - \prod_{i=1}^{m} k_{T\,i}\right)}{\dot{Z}_k}. \tag{5.4}$$

Задача оптимизации режима заключается в том, чтобы из множества сочетаний коэффициентов трансформации k_T трансформаторов, включённых в замкнутые контуры, найти такое, которое соответствовало бы минимальным потерям мощности в сети:

$$\Delta P(k_T) = \Delta P(k_{T1}, k_{T2}, \dots k_{Ti}, \dots k_{Tm}) \to \min. \quad (5.5)$$

Минимум этой функции ищут при следующих ограничениях:

$$U_{jmin} \le U_j \le U_{jmax}, \quad I_i \le I_{доп} \quad (5.6)$$

где U_j – напряжение в j-м узле сети;

I_i– ток в i-й ветви сети;

$I_{доп}$ – допустимый по нагреву ток проводника i-й ветви.

При нахождении оптимального варианта простой перебор всех сочетаний ответвлений практически неприемлем из-за большого объема задачи. Поэтому применяют специальные методы поиска оптимального решения.

По методу поочередного изменения параметров произвольно выбирают один из трансформаторов и на нем производят изменение k_T в случайном направлении (в сторону увеличения или уменьшения). При этом определяют значение целевой функции (5.5) и сравнивают его с предыдущим значением. Если шаг оказался успешным, то производят дальнейшее изменение этого же k_T в том же направлении. В случае увеличения значения целевой функции изменяют направление шага.

Общее решение на этапе оптимизации k_T i-го трансформатора можно записать в виде следующих рекуррентных выражений:

$$k_{T\,S+1} = k_{TS} + \Delta k_{TS} F_{sign}; \quad (5.7)$$

$$F_{sign} = \begin{cases} 1, \text{если } \Delta P(k_{TS+1}) < \Delta P(k_{TS}); \\ 0, \text{если } \Delta P(k_{TS+1}) = \Delta P(k_{TS}); \\ -1, \text{если } \Delta P(k_{TS+1}) > \Delta P(k_{TS}), \end{cases} \quad (5.8)$$

где k_{TS} и k_{TS+1} – коэффициенты трансформации i-го трансформатора соответственно на s-м и (s+1)-м шагах оптимизации;

Δk_{TS} – длина шага по i-му параметру, равная величине ступени регулирования трансформатора в относительных единицах;

F_{sign} – функция знака.

Переход к следующему, (i+1)-му трансформатору осуществляется после достижения минимума целевой функции при изменении k_T на i-м трансформаторе.

Уравнительная мощность, которая создается в контуре с помощью коэффициентов трансформации трансформаторов, может быть определена по формуле

$$\underline{S}_{ур} = \underline{S}_{i0} + \underline{S}_{iопт}, \quad (5.9)$$

где $\underline{S}_{i0}$ - поток мощности в i-й ветви при уравновешенных коэффициентах трансформации k_T (т.е. когда $\prod_{i=1}^{m} \underline{k}_{Ti} = 1$);

$\underline{S}_{iопт}$ - поток мощности в i-й ветви в оптимальном режиме.

5.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.4, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл. П.3.1, П.3.2 и П.3.3 приложения 3).
3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Рассчитать коэффициенты трансформации автотрансформаторов АТ1, АТ2 и заполнить табл. 5.1.
5. Рассчитать допустимые по нагреву мощности линий и заполнить табл. 5.2.
6. Подготовить табл. 5.3, 5.4, 5.5. В табл. 5.4 вписать значения допустимых мощностей $S_{доп}$ (для линий взять из табл. 5.2, для автотрансформаторов принять равными их номинальным мощностям).
7. Из отчета лабораторной работы № 4 выписать в табл. 5.3, 5.4, 5.5 данные о режиме наибольших нагрузок при номинальных коэффициентах трансформации автотрансформаторов (надбавка напряжения δU = 0 %).

5.4. Порядок выполнения работы

Исследование проводится для схемы сети, приведенной на рис. П.1.4 приложения 1. В качестве исходного режима при оптимизации принимается режим из лабораторной работы № 4, соответствующий режиму наибольших нагрузок при надбавках напряжения на автотрансформаторах *АТ1* и *АТ2* $\delta U = 0$ % (номинальных коэффициентах трансформации). Оптимизация режима производится в следующей последовательности.

1. На автотрансформаторе АТ1 изменяется надбавка напряжения δU (в большую или меньшую сторону по желанию исследователя). Для реализации этого шага на компьютере в исходный режим вносится изменение о коэффициенте трансформации в соответствующей ветви, который принимается из табл. 5.1 (в большую или меньшую сторону). Все остальные данные исходного режима сохраняются.
2. Производится расчёт измененного режима. Результаты расчёта заносятся в соответствующие строки табл. 5.3, 5.4, 5.5.
3. Делаются выводы о допустимости нагрузок в ветвях и напряжений в узлах (табл. 5.4, 5.5). В данной работе принять следующие допустимые напряжения:

– в сети 220 кВ: U_{max} = 242 кВ; U_{min}= 210 кВ;
– в сети 110 кВ: U_{max} = 121 кВ; U_{min}= 105 кВ.

4. Делается вывод об изменении потерь активной мощности по сравнению с исходным режимом (табл. 5.3) и принимается решение о направлении изменения надбавки напряжения на автотрансформаторе *АТ1*:

а) если потери мощности по сравнению с исходным режимом уменьшились, то следует произвести изменение надбавки δU в ту же сторону;

б) если потери мощности увеличились, то изменение δU по сравнению с исходным режимом следует произвести в обратную сторону.

Таблица 5.1. Коэффициенты трансформации автотрансформаторов *АТ1* и *АТ2*

Номер ответвления	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Надбавка δU, %													
Надбавка δU, кВ													
$U_{отв.ст}$, кВ													
k_T													

Таблица 5.2. Допустимые по нагреву токи и мощности линий

Линия	1-2	1-3	2-3	3-4	6-7
Марка провода					
$I_{доп}$, А					
$S_{доп}$, МВ·А					

Таблица 5.3. Результаты процедуры оптимизации режима

№ п/п	k_T	Полученные на ЭВМ надбавки напряжения δU на автотрансформаторах, %		Суммарные потери мощности		Принятое решение
		АТ1	*АТ2*	ΔP , МВт	ΔQ , МВАр	

Таблица 5.4. Контроль нагрузок в ветвях сети

№ п/п	k_T	Мощность	Мощности в ветвях S_{ij} , МВ·А

	AT1	*AT2*		1-2	1-3	2-3	3-4	6-8	7-8	*AT1*	*AT2*
1			$S_{доп}$								
			$S_{факт}$								

Таблица 5.5. Контроль напряжений в узлах сети

№ п/п	k_T		Напряжения в узлах U_i, кВ							Выводы
	AT1	*AT2*	2	3	4	5	6	7	8	

5. При новой надбавке на автотрансформаторе *AT1* производится следующий расчёт режима и т.д. В результате направленной процедуры расчётов определяются надбавка напряжения δU и соответствующее напряжение ответвления на автотрансформаторе *AT1*, при котором суммарные потери активной мощности наименьшие.
6. При фиксированном напряжении ответвления Uотв.ст на автотрансформаторе АТ1, найденном из п.5, в том же порядке производится отыскание напряжения $U_{отв.ст}$ и соответствующей ему надбавки δU на автотрансформаторе АТ2, при которых будут наименьшие потери мощности.

В результате будут определены условно оптимальные надбавки напряжения на обоих автотрансформаторах.

7. Условно оптимальный режим записать на диск отдельно от исходного.
8. Потокораспределение и зарядная мощность условно оптимального режима и напряжения в узлах наносятся на расчётную схему.
9. По формуле (5.9) определяются величина и направление уравнительной мощности.
10. Установить на автотрансформаторе *AT1* минимальный k_T, а на трансформаторе *AT2* максимальный. Выполнить расчёт режима. Сравнить потери активных и реактивных мощностей с режимами:

а) при δU *AT1* = 0 % и δU *AT2* = 0 %;

б) при надбавках в условно оптимальном режиме.

Сделать выводы о характере и причинах изменения потерь.

11. Восстановить исходный режим.

5.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.

3. Схема замещения.
4. Таблицы 5.1 – 5.5.
5. Расчётная схема сети с потокораспределением, напряжениями в узлах, величиной и направлением уравнительной мощности, коэффициентами трансформации автотрансформаторов в условно оптимальном режиме.
6. Анализ исходного и условно оптимального режимов. Выводы по п.10.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какое влияние оказывают на распределение активных и реактивных мощностей в замкнутых сетях трансформаторы с продольным и продольно-поперечным регулированием?
2. Как определить уравнительную мощность, создаваемую в контуре трансформаторами?
3. Что такое локальный и глобальный минимумы целевой функции? От чего зависит сближение локального и глобального минимумов?
4. Как записывается обобщенное контурное уравнение?
5. От чего зависит допустимая нагрузка на линию?
6. Какие повышения напряжения относительно номинального напряжения сети допускаются на линиях?
7. Как сформулировать задачу оптимизации коэффициентов трансформации трансформаторов в замкнутых сетях?
8. Как записываются рекуррентные выражения для оптимизации коэффициентов трансформации в замкнутых сетях?
9. Зависит ли оптимальное сочетание коэффициентов трансформации трансформаторов в замкнутой сети от режима нагрузок в узлах?
10. Что понимается под коэффициентами трансформации трансформаторов? Сколько их значений может быть у одного трансформатора? От чего это зависит?

Лабораторная работа № 6. Расчет и анализ режимов электрической сети с фиксированными напряжениями в нескольких узлах

6.1. Цель работы

Получение практического опыта проведения расчётов режимов электрических сетей с заданными фиксированными напряжениями в

узлах в диалоговом режиме использования специализированного программного обеспечения. Анализ влияния установки регулируемых компенсирующих устройств на режим напряжения электрической сети.

6.2. Краткие теоретические сведения

Известные узловые уравнения установившегося режима электрической системы записываются следующим образом:

$$\underline{Y}_{ii}\underline{U}_i + \sum_{j=2}^{n} \underline{Y}_{ij}\underline{U}_j = \frac{\dot{S}_{i\text{г}} - \dot{S}_{i\text{н}}}{\dot{U}_i}, \tag{6.1}$$

где $\underline{U}_i$ - междуфазное напряжение (искомое) i-го узла;

$\underline{U}_j$ - междуфазные напряжения узлов, связанных ветвями с i-м узлом;

$\dot{Y}_{ij} = -\frac{1}{\underline{Z}_{ij}}$ - взаимные проводимости i-го и j-х узлов;

$\dot{Y}_{ii} = -\sum_{j=1}^{n} \underline{Y}_{ij}$ - собственная проводимость i-го узла;

$\dot{S}_{i\text{н}}$ и $\dot{S}_{i\text{г}}$ - комплексно-сопряжённые мощности, соответственно потребляемые и генерируемые в i-м узле;

n - число узлов.

Данные уравнения решаются относительно напряжения $\underline{U}_i$ итерационными методами, для чего составляется рекуррентное соотношение

$$U^{(k)} = \varphi_i\left(U^{(k-1)}\right), \tag{6.2}$$

например, в виде

$$U_i^{(k)} = \frac{\frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i^{(k-1)}} - \sum_{j=2}^{n} \underline{Y}_{ij} U_j^{(k-1)}}{\underline{Y}_{ii}}, \tag{6.3}$$

где $\dot{S}_i = \dot{S}_{i\,\text{г}} - \dot{S}_{i\,\text{н}}$ - комплексно-сопряжённая мощность в i-м узле;

k - номер итерации.

Если для части узлов, имеющих собственные источники реактивной мощности $Q_{i\,\text{г}}$, изменяемой в пределах технических ограничений

$$Q_{i\,\text{г}\,min} \le Q_{i\,\text{г}} \le Q_{i\,\text{г}\,max}, \tag{6.4}$$

заданы фиксированные модули напряжения

$$|U_i|_{\text{зад}} = U_{i\,min} - U_{i\,max}, \tag{6.5}$$

то соответствующие этим узлам уравнения из системы (6.1) решаются относительно реактивной мощности $Q_i^{(k)}$, необходимой для поддержания заданного модуля напряжения $|U_i|_{\text{зад}}$:

$$Q_i^{(k)} = Im\left[\dot{U}_i\left(\underline{Y}_{ii}\underline{U}_i + \sum_{j=2}^{n} \underline{Y}_{ij}\underline{U}_j\right)\right] = Im\left[\underline{Y}_{ii}|U_i|^2_{\text{зад}} + \dot{U}_i^{(k)}\left(\sum_{j<i}^{n} \underline{Y}_{ij}U_j^{(k)} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \sum_{j>1}^{n} \underline{Y}_{ij}U_j^{(k-1)}\right)\right], \tag{6.6}$$

где i и j - номера узлов, принимаемые совпадающими с индексом по циклу 1, 2,...,n.

Отметим, что $\dot{U}_i^{(k)}$ - сопряженный комплекс напряжения в i-м узле содержит вещественную $U_i^{/(k)}$ и мнимую $U_i^{//(k)}$ составляющие, меняющие свои значения в итерационном процессе при изменении напряжений других узлов, поэтому алгоритм расчёта режима дополняется соответствующими вычислениями и проверкой по (6.3). Для этого на каждой k-й итерации для каждого 1-го узла вычисляются расчётные составляющие напряжения $U_{i\,\text{расч}}^{/(k)}$ и $U_{i\,\text{расч}}^{//(k)}$ при $Q_i^{(k-1)}$, (найденной на предыдущей итерации) и корректируются по заданному модулю по выражениям:

$$U_{i\,\text{скорр}}^{/(k)} = \frac{U_{i\,\text{расч}}^{/(k)} |U_i|_{\text{зад}}}{\sqrt{\left(U_{i\,\text{расч}}^{/(k)}\right)^2 + \left(\left(U_{i\,\text{расч}}^{//(k)}\right)^2\right)}}$$

$$U_{i\,\text{скорр}}^{//(k)} = \frac{U_{i\,\text{расч}}^{//(k)} |U_i|_{\text{зад}}}{\sqrt{\left(U_{i\,\text{расч}}^{/(k)}\right)^2 + \left(\left(U_{i\,\text{расч}}^{//(k)}\right)^2\right)}} \qquad (6.7)$$

Затем определяется реактивная мощность $Q_i^{(k)}$по выражению (6.6), в котором используются скорректированные по (6.7) составляющие напряжения $\dot{U}_i^{(k)}$ и проверяются ограничения (6.4).
Если ограничения выполняются, то алгоритм переходит к следующему j-му узлу, а данный i-й узел при расчётах напряжений в последующих j-х узлах учитывается своими скорректированными составляющими напряжения.

Если ограничения не выполняются, то условие (6.4) становится доминирующим на данной итерации, $Q_i^{(k)}$ принимается равным нарушенному ограничению, после чего происходит переход к следующему j-му узлу, но при расчёте его напряжения по (6.3) i-й узел вводится своими не скорректированными составляющими напряжения $U_{i\,\text{расч}}^{/(k)}$ и $U_{i\,\text{расч}}^{//(k)}$. Когда на k-й итерации все узлы рассчитаны, на следующей (k+1)-й итерации 1-й узел вновь рассматривается как узел с фиксированным модулем.

Весь этот процесс легко реализуется проверками логических выражений и условными переходами.

Особенно наглядно сущность поддержания напряжения в узле за счёт изменения его реактивной мощности иллюстрируется на двухузловой схеме «шины питания - линия – нагрузка».

Связь между напряжениями начала и конца элемента сети устанавливается следующим соотношением:

$$\underline{U_1} = U_2 + \frac{P_2R+Q_2X}{U_2} + j\frac{P_2X-Q_2R}{U_2}, \quad (6.8)$$

где U_1 и U_2 - напряжения соответственно в начале и в конце элемента сети;

P_2 и Q_2 - соответственно активная и реактивная мощности нагрузки;

R и X - параметры элемента сети.

Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, то соотношение (6.8) принимает вид:

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2R+Q_2X}{U_2}. \quad (6.9)$$

Если требуется создать режим с фиксированными напряжениями по концам элемента сети, то это можно осуществить путем установки в конце компенсирующего устройства мощностью Q_k. Тогда

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2R+(Q_2-Q_k)X}{U_2}. \quad (6.10)$$

Отсюда требуемая мощность компенсирующего устройства:

$$Q_k = Q_2 - \frac{(U_1-U_2)U_2-P_2R}{X}. \quad (6.11)$$

Такие же физические закономерности имеют место в сложнозамкнутых электрических сетях, для которых аналитические выражения типа (6.11) реализуются итерационным путем, и поэтому поиск режимов с фиксированными напряжениями в заданных точках производят с помощью ЭВМ по специальным алгоритмам.

6.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.4, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл. П.3.1, П.3.2 и П.3.3 приложения 3).
3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Начертить расчётную схему сети.
5. Подготовить таблицу.
6. Из отчета о работе № 5 выписать в таблицу фактические напряжения в узлах 6 (или 7) и 8 исходного режима до оптимизации коэффициентов трансформации.
7. Наметить возможные пределы изменения Q_i г, принимая в одном узле $Q_{ir\ max} \approx 0{,}8\ Q_{iн}$, $Q_{irmin} \approx -0{,}5Q_{iн}$, а в другом узле $Q_{irmax} \approx 0{,}7Q_{iн}$, $Q_{irmin}=0$.

6.4. Порядок выполнения работы

Исследование производится для схемы сети, приведенной на рис. П.1.4 приложения 1. В качестве исходного режима принимается исходный режим из лабораторной работы № 5, сохраненный на *Рабочем столе*. Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Фиксируется напряжение в узле 6 (или 7). Для этого в исходный режим вносятся изменения по этому узлу: дополнительно к обычной информации задаётся модуль напряжения $|U|_{зад}$ и заносится информация о границах диапазона изменения реактивной мощности в узле Q_{rmin} и Q_{rmax} (в таблицу *Узлы* нужно добавить соответствующие поля).
2. Производится расчёт нового режима. При этом автоматически определяется реактивная мощность генерации в выделенном узле для достижения заданного напряжения. Результаты расчёта занести в таблицу и нанести на расчётную схему.
3. Восстановить исходный режим.
4. В исходный режим вносятся изменения: в узле 8 фиксируется напряжение $|U_8|_{зад}$ таким же способом, как для предыдущего узла.
5. Производится расчёт этого режима. Результаты расчёта занести в таблицу и нанести на расчётную схему.
6. Производится расчёт следующего режима с фиксацией напряжения одновременно в двух узлах: 8 и 6 (или 7), в результате автоматически определяется реактивная мощность генерации в этих узлах. Расчёты провести для двух случаев:

а) принимая за базовый только что рассчитанный последний режим из п.5;

б) принимая за базовый исходный режим лабораторной работы № 5.

Сопоставить и объяснить результаты, занести их в таблицу и нанести на расчётную схему.

7. Восстановить исходный режим.
8. Выполнить расчёт на базе исходного режима п.1, задав пониженное напряжение в узле 6 (или 7), например 110 кВ. Результаты занести в таблицу и нанести на расчётную схему.
9. Восстановить исходный режим.

К расчёту по лабораторной работе № 6

№ п/п	Характеристика режима (номера узлов с фиксацией	Фактические напряжения в узлах, кВ, и рассчитанные реактивные мощности генерации, МВАр								ΔP_{Σ}, МВт
		$\|U_6\|$,	$\|U_7\|$,	$\|U_8\|$,	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	

	|U| и $Q_г$)	$Q_{г6}$	$Q_{г7}$	$Q_{г8}$						

6.5. Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.
4. Таблица.
5. Расчётная схема с потокораспределением и напряжениями в узлах для режимов с фиксированными напряжениями в узлах 6 (или 7) и 8 по п.2 и п.5.
6. Сравнительный анализ исходного режима и режима с фиксированными напряжениями в этих узлах.
7. Расчётная схема с результатами расчётов по п.6 и п.8 и анализ полученных режимов.
8. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как решаются узловые уравнения для узлов с заданными модулями напряжения?
2. Как записывается связь между напряжениями и мощностями элементов электрической сети?
3. Как задается информация об узле с фиксированным напряжением при расчёте режима?
4. Может ли передаваться активная мощность от узла с меньшим напряжением к узлу с большим напряжением? Если может, то при каких условиях?
5. Может ли поток реактивной мощности быть направлен навстречу потоку активной мощности? Если может, то при каких условиях?
6. С помощью каких устройств можно создать генерацию реактивной мощности в узле?
7. Как зависят потери реактивной мощности и зарядная мощность в сети от напряжения?

Лабораторная работа № 7. Исследование влияния компенсирующих устройств на параметры режима электрической сети

7.1. Цель работы

Приобретение практических навыков решения задачи размещения компенсирующих устройств в сложных электрических сетях в диалоговом режиме использования специализированного

программного обеспечения. Изучение влияния компенсирующих устройств на режим электрической сети.

7.2. Краткие теоретические сведения

Компенсирующие устройства (КУ), устанавливаемые в узлах электрической сети, оказывают комплексное влияние на параметры режима. Их влияние проявляется в том, что изменяются потоки реактивной мощности по сети. Следствием этого является изменение напряжений в узлах, что, в свою очередь, приводит к изменению генерируемой зарядной мощности линий. В результате все эти факторы в совокупности оказывают влияние на потери активной и реактивной мощности в сети.

Для простейшего случая сети, состоящей из одного элемента с подключённым в узле нагрузки КУ, генерирующего реактивную мощность, взаимосвязи указанных параметров режима определяются следующими соотношениями:

- потери активной мощности

$$\Delta P = \frac{P^2+(Q-Q_{\text{КУ}})^2}{U^2} R; \quad (7.1)$$

- потери реактивной мощности

$$\Delta Q = \frac{P^2+(Q-Q_{\text{КУ}})^2}{U^2} X; \quad (7.2)$$

- зарядная мощность

$$Q_C = U^2 B; \quad (7.3)$$

- потеря напряжения

$$\Delta U = \frac{PR+(Q-Q_{\text{КУ}})X}{U}; \quad (7.4)$$

где P и Q - активная и реактивная мощности нагрузки;
R и X - активное и реактивное сопротивления элемента сети;
U - напряжение;
B - ёмкостная проводимость линии.

В сложных сетях со многими элементами проявляется взаимосвязь всех узлов и ветвей. Оценка комплексного воздействия компенсирующих устройств на параметры режима отдельных узлов и сети в целом может быть произведена только с помощью RastrWin.

7.3. Задание на подготовительную работу

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную схему сети (рис. П.1.4, приложение 1) и нанести на неё параметры согласно варианту задания (табл. П.3.1, П.3.2 и П.3.3 приложения 3).

3. Начертить схему замещения сети с нанесением на неё рассчитанных параметров.
4. Начертить расчётную схему сети.
5. Подготовить табл. 7.1 и 7.2.
6. Из отчета работы № 5 занести в табл. 7.1 и 7.2 суммарные потоки активной и реактивной мощностей для условно оптимального режима, зарядную мощность и напряжения в узлах.

7.4. Порядок выполнения работы

Исследование производится для схемы сети, приведенной на рис. П.1.4 приложения 1. В качестве исходного режима принимается исходный режим из лабораторной работы № 5, сохраненная на *Рабочем столе.*

1. Определяется наивыгоднейшее место установки компенсирующего устройства, для чего:

а) поочередно в каждом из узлов 2, 3, 5, 6, 7, 8 устанавливается мощность компенсирующего устройства $Q_{ку}$ = 1 МВАр и выполняется расчёт режима. Для этого в каждом расчёте в качестве исходного принимается условно оптимальный режим из работы № 5, и в него вносятся изменения по мощности генерации соответствующего узла;

б) для каждого из режимов рассчитываются изменения потерь мощности в виде разности потерь в исходном режиме ($\Delta P_{исх}$ и $\Delta Q_{исх}$) и потерь при установке компенсирующего устройства мощностью 1 МВАр в соответствующем i-м узле (ΔP_{ki} и ΔQ_{ki}):

$$\delta\Delta P_i=\Delta P_{исх} - \Delta P_{ki}; \quad (7.5)$$

$$\delta\Delta Q_i=\Delta Q_{исх} - \Delta Q_{ki}. \quad (7.6)$$

Результаты всех расчётов заносятся в табл. 7.1;

в) определяется узел, в котором установка компенсирующего устройства единичной мощности дает наибольшее снижение потерь активной мощности.

Таблица 7.1. К определению наивыгоднейшего места установки компенсирующего устройства

№ п/п	Номер узла с мощностью КУ в нём $Q_{ку}$ = 1 МВАр	Потери мощности		Изменение потерь мощности по сравнению с исходным режимом	
		ΔP, МВт	ΔQ, МВАр	δΔP, МВт	δΔQ, МВАр

Таблица 7.2. К определению мощности компенсирующих устройств, соответствующей минимуму потерь активной мощности

№ п/п	Мощность КУ $Q_{ку}$, МВАр	Потери мощности		Зарядная мощность $Q_с$, МВАр	Напряжения в узлах, кВ					
		ΔP, МВт	ΔQ, МВАр		2	3	5	6	7	8

2. Для узла сети, определенного в п.1, находится мощность компенсирующего устройства, соответствующая минимальным потерям активной мощности, для чего:

а) увеличивается дискретно мощность компенсирующего устройства в этом узле с шагом, согласованным с преподавателем. **Мощность компенсирующего устройства, устанавливаемого в узле для сохранения положительного регулирующего эффекта нагрузки, не должна превышать ≈ 30 % реактивной нагрузки этого узла**. При каждой мощности производится расчёт режима и определяются потери. Результаты расчётов заносятся в табл. 7.2;

б) расчёты выполняются до тех пор, пока не будет найдена точка минимума функции $\Delta P=f(Q_{ку})$.

3. Зафиксировать результаты расчёта при мощности компенсирующего устройства, соответствующей минимуму потерь активной мощности. Потокораспределение и напряжения в узлах наносятся на расчётную схему.

4. По результатам расчётов строятся и анализируются зависимости от мощности компенсирующих устройств в i-м узле: потерь активной и реактивной мощности $\Delta P=f(Q_{куi})$, $\Delta Q=f(Q_{куi})$; зарядной мощности $\Delta Q_с=f(Q_{куi})$; напряжений в узлах $U=f(Q_{куi})$ (для всех узлов на одном графике).

5. Определить мощность компенсирующих устройств и места их установки, исходя из требований одновременного обеспечения напряжений в узлах 6 и 7 не ниже 110 кВ в послеаварийных режимах:

а) при отключении линии 1-2;
б) при отключении линии 1-3;
в) при отключении автотрансформатора *АТ1*;
г) при отключении автотрансформатора *АТ2*.

Процедуру решения данной задачи разработать самостоятельно.

7.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Схема замещения.

4. Таблицы 7.1 и 7.2.
5. Зависимости $\Delta P=f(Q_{куi})$, $\Delta Q=f(Q_{куi})$, $\Delta Q_c=f(Q_{куi})$, $U=f(Q_{куi})$.
6. Расчётная схема сети с потокораспределением и напряжениями в узлах для режима при мощности компенсирующих устройств, соответствующей минимуму потерь активной мощности.
7. Сравнительный анализ исходного и конечного режимов.
8. Анализ результатов расчётов по п.5 работы.
9. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под компенсирующим устройством? Какие бывают виды компенсирующих устройств?
2. Для чего устанавливают компенсирующие устройства в электрической сети?
3. Как влияет установка компенсирующих устройств на потери мощности и напряжения в узлах сети? Почему?
4. Чем объясняется, что мощность по линиям изменяется при изменении мощности компенсирующих устройств?
5. Почему эффект по потерям мощности в сети зависит от места установки компенсирующего устройства?
6. Какова процедура выбора наивыгоднейшего узла сети для установки компенсирующего устройства?
7. Почему при увеличении мощности компенсирующих устройств сверх некоторой величины потери активной мощности в сети могут возрасти по сравнению с режимом при меньшей мощности компенсирующих устройств?
8. Что называется регулирующим эффектом нагрузки?
9. Какая нагрузка обладает положительным регулирующим эффектом?
10. Какая нагрузка обладает отрицательным регулирующим эффектом?
11. Как отразится на регулирующем эффекте нагрузки избыточная мощность компенсирующего устройства?

Лабораторная работа № 8. Отображение результатов расчёта установившегося режима с использованием графики программы RastrWin

8.1. Цель работы

Освоение приёмов графического отображения результатов расчёта установившегося режима в программе RastrWin.

8.2. Краткие теоретические сведения

Программа RastrWin содержит инструмент *Графика*, позволяющий создавать графическую схему рассчитываемой сети и отображать на ней исходные и расчётные параметры установившегося режима.

Между табличным и графическим представлениями схемы сети существует связь, поэтому любые изменения конфигурации, исходных и расчётных параметров режима в таблицах приведут к изменениям в графическом окне. Однако с помощью графической схемы в таблицах *Узлы* и *Ветви* изменить можно только состояние полей **О** и **S**, т.е. отметить и включить/отключить узел либо ветвь (см. л/р № 1).

Перед созданием нового файла, содержащего графическую схему, необходимо загрузить в *Рабочую область* программы требуемый файл режима, после чего выполнить действие *Файлы-Новый-графика*.grf. Затем через главное меню программы нужно открыть пустое окно *Графика (Открыть-Графика)*. Новый файл графической схемы нужно сохранить.

Для создания и редактирования графической схемы используются панель инструментов *Рабочей области* программы и меню, вызываемое после выбора пункта *Графика* главного меню RastrWin. В зависимости от выбранного пункта меню *Графика-Состояние...* графическая схема может находиться в одном из следующих режимов работы:

Просмотр

– левая кнопка мыши позволяет перемещать схему, а при одновременно нажатой клавише *Ctrl* - изменять её масштаб (можно также использовать ролик мыши);

– при нажатии правой кнопки мыши на узле либо ветви появляется контекстное меню, позволяющее осуществлять связь между графическим и табличным представлениями схемы, а также провести некоторые действия с соответствующим объектом (отключить или включить узел/ветвь, отметить или убрать отметку, вызвать различные таблицы, связанные с узлом/ветвью).

Ввод

– данный режим позволяет ввести в схему узлы, для чего используется диалоговое окно; после выбора номера узла нажать левой кнопкой мыши в нужном месте открытого окна Графика; вводимые на схему узлы автоматически соединяются линиями;

– удерживая нажатой левую кнопку мыши, можно перемещать шину узла, а одновременно нажимая клавиши Shift (горизонтально),

Alt (вертикально) или Ctrl (зафиксировать), - изменять её ориентацию в пространстве;

– нажатие правой кнопки мыши на узле удаляет его из схемы.

Присоединение

– используется для редактирования места присоединения ветви или изображения фигуры к узлу; необходимо захватить мышью объект и переместить его в требуемое место.

Излом

– используется для создания и редактирования места излома на линии; необходимо захватить мышью точку ветви и переместить её в нужное место.

Текст

– захват мышью текстовой надписи позволяет её перемещать;

– при нажатой клавише *Ctrl* движениями мыши влево и вправо можно изменять размер захваченной надписи; те же действия, но при нажатой клавише Пробел позволяют менять её угол;

– для удаления текстовой надписи используется правая кнопка мыши; чтобы восстановить удалённую надпись, необходимо переключиться на фоновый план схемы (*Графика-Фоновый план*) и тем же способом удалить оттуда нужный текст.

Надпись

– режим используется для ввода поясняющих текстовых надписей.

На графической схеме можно изменять цвета ветвей и узлов (*Графика-Параметры..-Общие*) и выделять участки сети одного класса напряжения толщиной либо цветом линий (*Графика-Параметры..-Общие, Графика-Параметры..-Гр/Напряжения*), что улучшает восприятие информации, представленной на схеме.

С помощью таблицы *Текст (Графика-Параметры..-Текст)* можно редактировать некоторые свойства текстовых надписей, содержащих информацию об исходных и расчётных параметрах схемы: отображаемый параметр, размер, цвет и тип шрифта, видимость надписи, возможность изобразить стрелку, указывающую направление мощностей и токов в ветвях. Программа позволяет отображать на графической схеме до семи параметров для узлов (строки 1-7 в таблице *Текст*) и до четырёх - для ветвей (строки 8-13 в таблице *Текст*).

Созданную графическую схему можно распечатать. Для этого необходимо выполнить команду *Графика-Выделить*, выделить мышью схему (либо её фрагмент), открыть таблицу *Общие (Графика-Параметры..- Общие*) и настроить значение строки *Полоса* (при

печати на листе формата А4 строка пуста либо её значение равно единице), после чего распечатать лист (см. л/р № 1).
Перед закрытием программы созданный файл графической схемы необходимо сохранить на диске.

8.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Загрузить файл с исходными данными режима наибольших нагрузок, рассчитанного в лабораторной работе № 4.
3. Создать и сохранить на диске файл графической схемы.
4. Произвести начальный ввод всех узлов схемы в графическое окно.
5. Провести оптимизацию внешнего вида введённой схемы, для чего:

– скорректировать размещение узлов, ориентацию шин в пространстве и их длину, места присоединения линий и нагрузок к шинам, размещение точек излома на линиях;

– выделить участки сети одного напряжения толщиной либо цветом линий;

– добавить на схему надписи, содержащие информацию о полных со-противлениях ветвей сети;

– расположить на схеме текстовые надписи наилучшим образом, дифференцировать их по цвету, выбрать подходящий размер и тип шрифта;

– добавить на схему надписи, содержащие информацию о фамилии и группе студента.

6. Сохранить графическую схему.

8.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Распечатка графической схемы сети.
3. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен инструмент *Графика* программы RastrWin?
2. Как создать файл, содержащий графическую схему?
3. Как производится ввод узлов в графическую схему сети?
4. Каким образом можно изменить вертикальную ориентацию шины узла в пространстве на горизонтальную?
5. Как добавить излом линии?
6. Какими способами можно изменять размер текстовых надписей?
7. Как сделать так, чтобы участки сети разных номинальных напряжений были выделены различными цветами?

8. Как распечатать графическую схему?

Библиографический список

1. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычёв. - Минск: УП «Технопринт», 2004.
2. Идельчик В.И. Расчёты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети. Проектирование / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. - Минск: Вышэйшая школа, 1989.
4. Блок В.М. Электрические сети и системы / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1986.
5. Лычёв П.В. Электрические сети энергетических систем / П.В. Лычёв, В.Т. Федин. - Минск: Ушверсггэцкае, 1999.
6. Лычёв П.В. Электрические системы и сети. Решение практических задач / П.В. Лычёв, В.Т. Федин. - Минск: Дизайн ПРО, 1997.
7. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В.Т. Федин. - Ростов-н/Д: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006.
8. Поспелов Г.Е. Электрические системы / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин. - Минск: Вышэйшая школа, 1974.
9. Идельчик В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / под ред. В. А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
11. Поспелов, Г.Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч, В.Т. Федин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

Приложение 1

Схемы сети к лабораторным работам

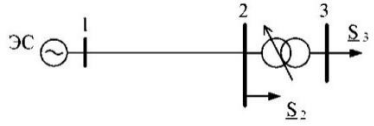


Рис. П.1.1. Схема сети к л/р № 1

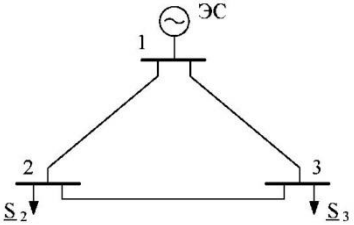


Рис.П.1.2. Схема сети к л/р № 2

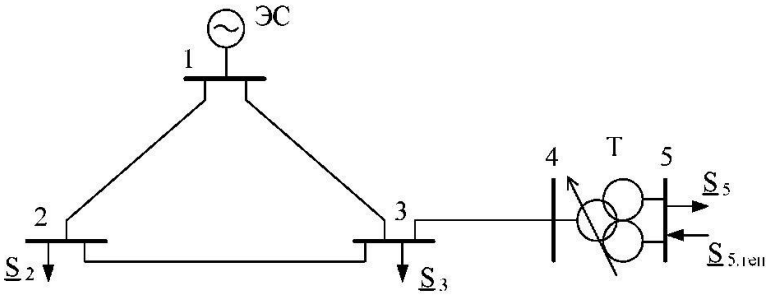


Рис.П.1.3. Схема сети к л/р № 3

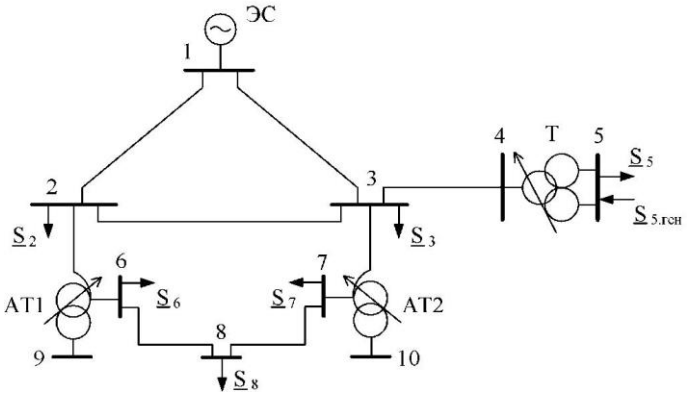


Рис.П.1.4. Схема сети к л/р № 4 - № 8

Приложение 2

Таблица П.2.1 Данные электрической сети к лабораторной работе № 1

№ вар.	U_1, кВ	ЛЭП (ветвь 1-2)		Тип трансформатора (ветвь 2-3)	S_2, МВА	S_3, МВА
		марка провода	длина, км			
1	115	АС-150/24	25	ТДН-16000/110	5+j3	8+j 6
2	229	АС-240/32	60	ТРДН-40000/220	7+j 5	20+j 12
3	114	АС-70/11	10	ТМН-2500/110	0,6+j0,2	1+j0,4
4	230	АС-300/39	50	ТРДЦН-63 000/220	12+j7	32+j20
5	116	АС-95/16	15	ТМН-6300/110	1+j0,4	3+j1,3
6	232	АС-400/51	70	ТРДЦН-100000/220	20+j 12	40+j25
7	113	АС-120/19	20	ТДН-10000/110	2+j0,8	4+j 3
8	227	АС-240/32	80	ТРДЦН-63 000/220	22+j 10	23+j 18
9	111	АС-150/24	16	ТРДН-40000/110	24+j 14	15+j 10
10	226	АС-300/39	90	ТРДЦН-100000/220	36+j21	60+j30
11	120	АС-185/29	12	ТРДН-125 000/110	42+j 31	70+j40
12	235	АС-400/51	100	ТРДЦН-160000/220	30+j13	95+j45
13	119	АС-70/11	18	ТРДН-25000/110	12+j 6	10+j6
14	240	АС-240/32	65	ТРДН-40000/220	15+j7	20+j 10
15	118	АС-95/16	22	ТМН-6300/110	1,1+j0,8	2,5+j 1
16	229	АС-300/39	75	ТРДЦН-160000/220	70+j40	63+j25
17	115	АС-120/19	18	ТРДН-80000/110	39+j 19	35+j 19
18	225	АС-400/51	85	ТРДЦН-160000/220	29+j 17	68+j44
19	118	АС-120/19	14	ТРДН-40000/110	3 7+j 23	23+j 15
20	228	АС-240/32	95	ТРДЦН-100000/220	42+j 17	33+j20
21	117	АС-185/29	19	ТРДН-80000/110	25+j 12	41+j 16
22	233	АС-300/39	55	ТРДЦН-63 000/220	14+j 7	25+j 10
23	110	АС-95/16	24	ТМН-2500/110	1+j0,6	1,6+j0,8
24	230	АС-400/51	63	ТРДЦН-63 000/220	26+j 15	30+j11
25	112	АС-120/19	21	ТДН-16000/110	3,5+j 1,5	10+j 5

Приложение 3

Таблица П.3.1 Данные о длинах ЛЭП и нагрузках узлов к лабораторным работам № 2 - № 8

№ вар	U1, кВ	Длины линий, км					Мощности в узлах, МБ-А						
		1-2	1-3	2-3	3-4	6-7	S_2	S_3	S_5	$S_{5.ген}$	S_6	S_7	S_8
1	238	60	80	50	40	25	25+j 15	28+j 15	30+j 18	15+j 10	40+j 21	60+j32	15+j 8
2	240	71	40	53	75	30	35+j20	38+j20	20+j 10	10+j 7	30+j 18	50+j21	20+j 10
3	242	80	55	60	50	39	45+j22	20+j 11	40+j 12	20+j 15	60+j33	70+j 41	25+j 14
4	236	90	50	65	45	40	28+j 10	45+j23	50+j 13	23+j 18	45+j24	65+j36	30+j 18
5	233	45	90	50	80	28	33+j24	28+j 18	70+j 3 8	31+j20	5 5+j 28	26+j 19	3 5+j 19
6	241	74	51	99	40	35	36+j 18	30+j 16	80+j30	36+j 20	3 5+j 20	21+j 10	40+j 22
7	242	90	65	55	30	41	47+j30	19+j 12	16+j 5	10+j6	73+j 55	48+j25	17+j 10
8	239	75	57	60	45	26	45+j31	22+j9	30+j 10	12+j9	64+j 41	39+j 23	22+j 11
9	232	95	72	54	50	43	20+j 9	27+j 14	48+j24	17+j 10	51+j23	28+j 15	33+j 14
10	234	65	85	62	55	53	50+j30	25+j 10	34+j 11	20+j 13	3 8+j 19	33+j 12	41+j25
11	240	72	90	42	52	45	53+j38	31 +j 14	72+j22	41 +j 3 0	27+j 16	42+j 13	19+j 8
12	236	55	74	65	30	25	42+j23	22+j 12	60+j42	24+j 16	3 6+j 21	5 0+j 3 0	27+j 17
13	234	50	75	48	20	35	39+j 15	26+j 15	19+j 7	5+j 3	42+j 17	62+j39	34+j21
14	240	65	50	70	34	55	29+j 19	35+j22	31 + j 15	20+j 16	53+j24	58+j28	39+j 25
15	222	75	60	54	45	50	55+j22	17+j 10	44+j 10	12+j6	77+j43	43+j20	16+j9
16	230	99	71	99	81	44	44+j24	23+j 13	33+j23	8+j 5	58+j31	51+j 27	31 + j 12
17	242	40	84	66	93	33	40+j26	24+j 18	65+j49	29+j 18	39+j 18	58+j36	3 8+j 17
18	235	76	63	75	54	30	34+j 17	21 + j 8	82+j37	45+j22	52+j22	49+j24	25+j 11
19	232	52	76	59	69	49	30+j 15	42+j26	25+j 9	7+j4	45+j23	27+j 16	23+j 9
20	239	95	53	78	43	26	32+j 17	16+j 9	31 + j 19	10+j 8	51+j 19	30+j 12	37+j 19
21	238	79	70	56	46	51	24+j 13	28+j 13	55+j 3 8	15+j 10	30+j 12	47+j28	45+j25
22	229	57	46	53	71	37	31+j18	26+j 17	39+j 10	10+j 5	28+j 10	52+j34	36+j 26
23	238	59	78	52	41	54	36+j 22	23+j 10	59+j40	23+j 15	39+j 24	24+j 17	47+j20
24	239	73	52	61	40	55	38+j21	30+j 16	89+j25	30+j 16	44+j 20	39+j 26	39+j 14
25	240	68	83	39	48	42	27+j 14	34+j 21	28+j 9	16+j11	34+j 17	34+j 18	24+j 16

Таблица П.3.2. Данные о проводах ЛЭП к лабораторным работам № 2 - № 8

№ вар.	Марки проводов				
	1-2	1-3	2-3	3-4	6-7
1	AC-400/51	AC-400/51	AC-240/32	AC-240/32	AC-240/32
2					AC-185/29
3					AC-240/32
4	AC-400/51	AC-400/51	AC-300/39		AC-185/29
5					AC-185/29
6					AC-240/32
7	AC-400/51	AC-300/39	AC-240/32		AC-185/29
8					AC-240/32
9					AC-185/29
10	AC-300/39	AC-400/51	AC-240/32		AC-150/24
11					AC-185/29
12					AC-240/32
13	AC-300/39	AC-400/51	AC-300/39		AC-185/29
14					AC-150/24
15					AC-185/29
16	AC-400/51	AC-300/39	AC-300/39		AC-120/19
17					AC-185/29
18					AC-150/24
19	AC-300/39	AC-300/39	AC-240/32		AC-185/29
20					AC-120/19
21					AC-240/32
22	AC-400/39	AC-400/32	AC-240/32		AC-150/24
23					AC-185/29
24					AC-120/19
25					AC-240/32

Таблица П.3.3. Данные о трансформаторах к лабораторным работам № 2 - № 8

№ вар.	Тип трансформатора		
	Т (ветвь 4-5)	*АТ1*	*АТ2*
1	ТРДН-40000/220/10	АТДЦТН-63000/220/110/10	АТДЦТН-125000/220/110/6
2			
3	ТРДЦН-63000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/10	АТДЦТН-200000/220/110/6
4			
5	ТРДЦН-100000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/6	АТДЦТН-63000/220/110/10
6			
7	ТРДН-40000/220/10	АТДЦТН-200000/220/110/6	АТДЦТН-125000/220/110/10
8			
9	ТРДЦН-63000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/6	АТДЦТН-63000/220/110/10
10			
11	ТРДЦН-100000/220/10	АТДЦТН-63000/220/110/10	АТДЦТН-125000/220/110/6
12			
13	ТРДН-40000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/10	АТДЦТН-200000/220/110/6
14			
15	ТРДЦН-63000/220/10	АТДЦТН-200000/220/110/6	АТДЦТН-125000/220/110/10
16			
17	ТРДЦН-100000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/10	АТДЦТН-200000/220/110/6
18			
19	ТРДН-40000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/6	АТДЦТН-63000/220/110/10
20			
21	ТРДЦН-63000/220/10	АТДЦТН-63000/220/110/10	АТДЦТН-125000/220/110/6
22			
23	ТРДЦН-100000/220/10	АТДЦТН-125000/220/110/6	АТДЦТН-63000/220/110/10
24			
25			

Таблица П.4.1. Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 110 кВ

Тип трансформатора	$S_н$, МВА	Каталожные данные						
		$U_н$ обмоток, кВ		$U_к$ %	ΔРк, кВт	ΔРх, кВт	Iх, %	Пределы регулирования, %
		ВН	НН					
ТМН-2500/110	2,5	110	6,6; 11	10,5	22	5,5	1,5	± 8 х 1,5
ТМН-6300/110	6,3	115	6,6; 11	10,5	44	11,5	0,8	± 9 х 1,78
ТДН-10000/110	10	115	6,6; 11	10,5	60	14	0,7	
ТДН-16000/110	16	115	6,6; 11	10,5	85	19	0,7	
ТРДН-25000/110	25	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	120	27	0,7	
ТРДН-40000/110	40	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	172	36	0,65	
ТРДН-63000/110	63	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	260	59	0,6	
ТРДН-80000/110	80	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	310	70	0,6	
ТРДН-125000/110	125	115	10,5/10,5	10,5	400	100	0,55	

Таблица П.4.2 Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 220 кВ

Тип трансформатора	Sн, МВА	Каталожные данные						
		$U_н$ обмоток, кВ		$U_к$, %	ΔРк, кВт	ΔРх, кВт	Iх, %	Пределы регулирования, %
		ВН	НН					
ТРДН-40000/220	40	230	11/11; 6,6/6,6	12	170	50	0,9	± 8 х 1,5
ТРДЦН-63000/220	63	230	11/11; 6,6/6,6	12	300	82	0,8	
ТРДЦН-100000/220	100	230	11/11; 38,5	12	360	115	0,7	
ТРДЦН-160000/220	160	230	11/11; 38,5	12	525	167	0,6	

Таблица П.4.3 Трёхфазные автотрансформаторы 220 кВ

Тип трансфор-матора	S_H, МВА	Каталожные данные									
		U_H обмоток, кВ			Uк, %			ΔPк, кВт	ΔPх, кВт	Iх, %	Пределы регулирования, %
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н				
АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	6,6; 11; 38,5	11	35,7	21,9	215	45	0,5	± 6 х 2,0
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,6; 11; 38,5	11	45	28	305	65	0,5	
АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	6,6; 11; 38,5	11	32	20	430	125	0,5	
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	10,5; 38,5	11,5	33,4	20,8	520	145	0,5	

Таблица П.4.4. Расчётные данные воздушных линий напряжением 110 кВ и 220 кВ

Сечение провода, мм^2	Длительный допустимый ток, А	Диаметр провода, мм	r_0, Ом/км при +20°С	110 кВ		220 кВ	
				x_0, Ом/км	b_0, 10^{-6} См/км	x_0, Ом/км	b_0, 10^{-6} См/км
70/11	265	10,7	0,422	0,444	2,55	-	-
95/16	330	12,3	0,301	0,434	2,61	-	-
120/19	390	14,0	0,244	0,427	2,66	-	-
150/24	450	15,8	0,204	0,420	2,70	-	-
185/29	510	18,8	0,159	0,413	2,75	-	-
240/32	605	21,6	0,118	0,405	2,81	0,435	2,60
300/39	710	24,0	0,096	-	-	0,429	2,64
400/51	825	27,5	0,073	-	-	0,420	2,70