



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Уральский
энергетический
институт

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Практикум



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Электрические системы и сети

Практикум

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2023

УДК 621.311(07.5)

ББК 37.27я73

Э45

Авторы: А. С. Тавлинцев, С. И. Семененко, Е. Д. Стаймова,
С. Н. Шелюг

Рецензенты:

кафедра энергетики НЧОУ ВО «Технический университет УГМК»
(завкаф., доц., канд. техн. наук *С. В. Фёдорова*);
канд. техн. наук *П. Е. Мезенцев* (ИТФ УрО РАН)

Научный редактор — доц., канд. техн. наук Е. Н. Котова

Фотография на обложке из архива авторов

Электрические системы и сети : практикум / А. С. Тавлинцев,
Э45 С. И. Семененко, Е. Д. Стаймова, С. Н. Шелюг ; М-во науки
и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та,
2023. — 117, [1] с.

ISBN 978-5-7996-3628-9

Практикум включает в себя краткие теоретические сведения, задания по изучению основ работы с программным комплексом RastrWin, предназначенным для расчетов и исследования установившихся режимов электроэнергетических систем. Рассматриваются вопросы создания модели электрической сети для расчета и анализа установившихся режимов радиальных, кольцевых и сложнзамкнутых электрических сетей; описываются методы определения потерь электроэнергии, регулирования напряжения, проверки перегрузочной способности и выбора сечений линий электропередачи.

Материал будет интересен студентам, обучающимся по направлению 13.03.02, изучающим вопросы математического моделирования режимов работы электрических систем.

Библиогр.: 16 назв. Табл. 7. Рис. 72.

УДК 621.311(07.5)

ББК 37.27я73

ISBN 978-5-7996-3628-9

© Уральский федеральный
университет, 2023

Содержание

Список сокращений и условных обозначений.....	5
Введение.....	6
Раздел А. Описание программного комплекса RastrWin.....	7
1. Описание и установка программы	7
2. Основные элементы интерфейса.....	8
3. Структура хранения данных	9
3.1. Организация и представление данных	9
3.2. Настройка таблиц внутренней базы данных.....	10
4. Схемы замещения основных элементов	
электрической сети.....	12
4.1. Общие положения	12
4.2. Узлы	13
4.3. Ветви	15
4.4. Элементы электрической сети.....	17
5. Основные настройки для выполнения расчетов	
установившихся режимов	31
Раздел Б. Основы расчетов простых электрических сетей.....	36
Лабораторная работа № 1. Знакомство с программным	
комплексом RastrWIN	36
Лабораторная работа № 2. Расчет установившегося режима	
радиальной электрической сети.....	50
Лабораторная работа № 3. Расчет потерь энергии	
в радиальной сети	56
Лабораторная работа № 4. Расчет графика регулирования	
отпаек РПН понижающих трансформаторов.....	59
Лабораторная работа № 5. Расчет кольцевой	
электрической сети	67

Раздел В. Расчет и анализ сложноразветвленных	
электрических сетей.....	72
Лабораторная работа № 1. Создание расчетной модели	
фрагмента энергосистемы	72
Лабораторная работа № 2. Регулирование напряжения	86
Лабораторная работа № 3. Оценка перегрузочной способности	
по току электрической сети.....	95
Лабораторная работа № 4. Выбор сечений линий	
электропередач.....	105
Библиографический список.....	114

Список сокращений и условных обозначений

АДТН — аварийно-допустимая токовая нагрузка
БСК — батарея статических конденсаторов
ВЛ — воздушная линия
ДДТН — длительно-допустимая токовая нагрузка
ЕЭС — Единая энергосистема
ЛЭП — линия электропередачи
ПБВ — устройство регулирования коэффициента трансформации
только при отключенном трансформаторе
ПК — программный комплекс
ППТ — передача постоянного тока
ПС — подстанция
РГР — расчетно-графическая работа
РПН — устройство регулирования коэффициента трансформации
под напряжением
РУ — распределительное устройство
СВ — секционный выключатель
СХН — статическая характеристика нагрузки
СШ — система шин
Тр — трансформатор
УР — установившийся режим
ШР — шунтирующий реактор

Введение

Многие дисциплины направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» связаны с математическим моделированием установившихся режимов энергосистем. Правильные расчеты на основе математических моделей позволяют принимать обоснованные решения при решении задач планирования развития электрической сети, настройки систем автоматики, планирования ремонтов и так далее. С учетом огромного количества данных и высокой размерности решаемых задач, от специалистов в области электроэнергетики требуются навыки использования программного обеспечения для расчета установившихся режимов энергосистем.

В результате выполнения представленных лабораторных работ студенты освоят программный комплекс для расчета установившихся режимов RastrWin, для чего пригодятся знания об основных принципах составления схем замещения элементов электрических сетей применения итерационных методов для оценки параметров установившихся режимов, а также об основах теоретической электротехники.

Раздел А.

Описание программного комплекса RastrWin

1. Описание и установка программы

Программный комплекс RastrWin (ПК RastrWin) предназначен для выполнения расчетов установившихся режимов (УР), токов короткого замыкания и электромеханических переходных процессов.

При расчете УР используется итерационный метод решения системы уравнений узловых напряжений. По умолчанию это метод Ньютона.

Программа разработана екатеринбургским фондом «Фонд им. Д. А. Арзамасцева». На базе ПК RastrWin командой из филиала ОАО НИИПТ «Системы управления энергией» разработано несколько специальных программных решений для решения задач системного оператора России АО СО ЕЭС.

Скачать программный комплекс RastrWin можно с официального сайта программного пакета URL: <https://www.rastrwin.ru>, раздел RastrWin. Для студентов лицензия на использование ПК RastrWin предоставляется бесплатно с ограничением на количество узлов (не более 60 шт.) электрической сети и область применения. Программу под студенческой лицензией можно использовать только в учебных целях. Подробнее о порядке получения лицензии можно узнать из раздела «Лицензирование и защита от копирования» (URL: <http://www.rastrwin.ru/rastr/license.php>) официального сайта.

Все примеры расчетов и рекомендации к выполнению заданий представлены для третьей версии программного комплекса RastrWin.

2. Основные элементы интерфейса

После запуска программы пользователь видит основное рабочее окно программы (рис. 1). Окно можно условно разделить на 4 области:

- 1) основное меню, через которое можно получить доступ к настройкам программы, формам для редактирования данных и запуску расчетов;
- 2) быстрые кнопки для вызова основных функций программы. Они дублируют пункты основного меню;
- 3) рабочую область, в которой открываются окна для просмотра и редактирования данных;
- 4) окно протокола (можно перемещать), в котором программа пишет лог основных событий. Его категорически не рекомендуется закрывать, так как в нем приводится информация о текущем состоянии расчетов — успешный расчет или ошибки.

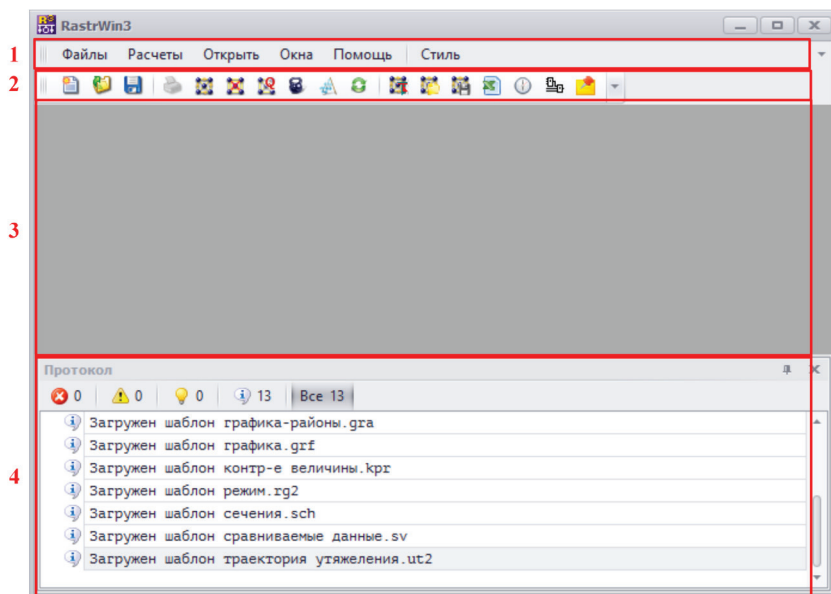


Рис. 1. Основные области рабочего окна

Программа позволяет перемещать и группировать открытые формы внутри основного рабочего окна, а также размещать их на нескольких мониторах.

Необходимо отметить, что при загрузке файлов программа не открывает форм и окон. Пользователь должен самостоятельно открыть все нужные формы и окна для отображения и редактирования информации. Факт загрузки или сохранения файла с данными расчетной модели можно проверить только в окне «Протокол».

3. Структура хранения данных

3.1. Организация и представление данных

Данные расчетной модели хранятся во встроенной базе данных. Ключевой особенностью структуры хранения данных является возможность сохранения и загрузки отдельных таблиц, при этом остальная часть базы данных остается без изменений. Таблицы сгруппированы в типовые наборы, которые называются шаблонами файлов. Обычно шаблоны хранятся на диске в папке с документами пользователя: **Имя Пользователя / Документы / RastrWin3 / SHABLON**.

При загрузке файлов по шаблону, программа может заменять и (или) дополнять информацию, уже загруженную в память. При сохранении по шаблону, на диск будет выгружена только часть таблиц базы данных, которая относится к данному шаблону. Если необходимо хранить все таблицы в одном файле, то при сохранении следует выбрать тип файла «без шаблона».

Перед началом работы с новыми таблицами необходимо сначала их создать в базе данных через меню создания таблиц по шаблонам: **Файлы / Новый**. Рекомендуется сразу после создания новых таблиц по шаблону сохранить соответствующий файл на диск через пункт меню **Файлы / Сохранить как...** В открывшемся окне необходимо выбрать нужный шаблон из списка **Тип файла**, ввести имя файла и нажать кнопку **Сохранить**.

При сохранении и загрузке файлов по шаблону следует быть внимательным, так как в некоторых шаблонах таблицы могут повторяться.

Программа предоставляет возможность разрабатывать макросы для автоматизации выполнения расчетов с помощью встроенного редактора скриптов на языке программирования VB Script. Также у нее есть возможность интеграции с внешними программами.

Таблицы базы данных имеют отображения на формы в графическом интерфейсе пользователя. Формы бывают трех видов:

- 1) простые формы, в которых отображается часть или все данные одной таблицы;
- 2) сложные формы, предназначены для отображения связанных данных из нескольких таблиц;
- 3) простые формы, в которых отображается только первая строка таблицы. Используются для представления таблиц с настройками расчетных модулей.

Структура движения информации в расчетной модели от пользователя до файла на диске представлена на рис. 2.

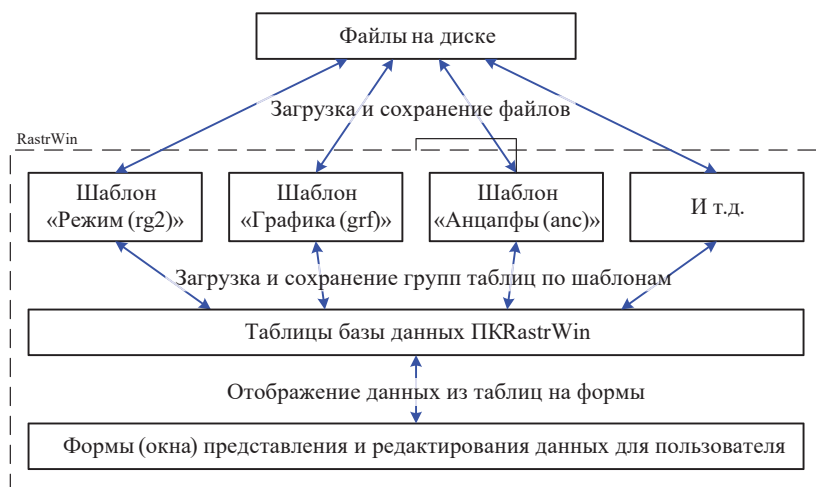


Рис. 2. Структура движения данных в программе

3.2. Настройка таблиц внутренней базы данных

В ПК RastrWin можно корректировать структуру базы данных, в которой хранится информация для расчетов. Доступ к окну, содержащему информацию о наименованиях таблиц и параметров (рис. 3), выполняется через пункт меню **Файл / Настройки программы / Параметры**. Далее необходимо развернуть следующие узлы дерева (нажимать на серые треугольные кнопки в левой половине окна): **Данные / Таблицы**.

Название таблиц (латиницей) содержится в левой части окна. Рядом с названием, в квадратных скобках, показано краткое описание

таблицы на русском языке. При нажатии на название таблицы, в правой части окна появляется информация о колонках и их свойствах, которые есть в данной таблице (рис. 3).

У каждого параметра (колонка) в таблицах есть следующие свойства:

- 1) **Имя** — наименование колонки в таблице, по которому к ней можно обращаться из формул и макросов;
- 2) **Тип** — тип данных, которые содержатся в колонке;
- 3) **Название** — наименование колонки при отображении ее в формах графического интерфейса пользователя;
- 4) **Описание** — краткая справка о том, какие данные хранятся в данной колонке. Отображается в графическом интерфейсе пользователя;
- 5) **Ширина** — ширина колонки в графическом интерфейсе пользователя при открытии новых форм с данными;
- 6) **Точность** — количество знаков после запятой, которые отображаются по умолчанию в графическом интерфейсе пользователя;
- 7) **Ед. измерения** — единица измерения параметра в графическом интерфейсе пользователя;
- 8) **Масштаб** — множитель, на который умножается значение в колонке при возврате значения ячейки этой колонки;
- 9) **Формула** — уравнение, которое используется при необходимости выполнения расчетов средствами встроенной базы данных.

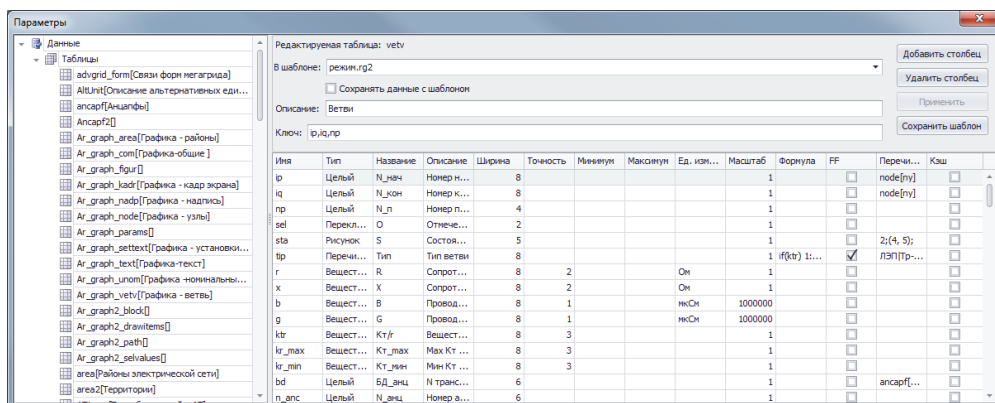


Рис. 3. Пример окна для просмотра и редактирования таблиц базы данных ПК RastrWin

При необходимости добавить колонку в таблицу, нужно нажать кнопку **Добавить столбец**. После того как описаны все необходимые

свойства колонки (см. список выше), необходимо нажать кнопку **Сохранить шаблон**. Примеры программного кода для создания расчетных формул в новых колонках можно посмотреть в уже существующих колонках и таблицах (см. рис. 3).

4. Схемы замещения основных элементов электрической сети

4.1. Общие положения

В данном разделе рассмотрены схемы замещения основных элементов электрической сети в формате ПК RastrWin.

В программе расчетная модель электрической сети представляется в виде множества узлов и ветвей. Для повышения удобства выполнения расчетов, некоторые устройства электрической сети моделируются в виде отдельных объектов: генераторы, противоаварийная автоматика, РПН, линейные выключатели и т. д. Вся совокупность данных об устройствах и параметрах схемы замещения электрической сети называется расчетной моделью.

Создание расчетной модели электрической сети обычно начинают с расстановки узлов схемы замещения и определения параметров схемы замещения ветвей между узлами. После составления схемы замещения вводится необходимая информация об устройствах в электрической сети.

Особенностью составления расчетной модели в формате ПК RastrWin является то, что схема замещения, коммутационная схема и информация о различных устройствах электрической сети может храниться в одних и тех же таблицах. С одной стороны, это предоставляет пользователю широкие возможности по моделированию различных элементов электрической сети, а с другой — требует более высокой внимательности и квалификации при вводе и коррекции данных.

Особенностью ПК RstrWin является вывод результатов расчетов УР в те же формы и таблицы, что и исходные данные расчетной модели.

4.2. Узлы

Согласно теории графов узлы расчетной модели представляют собой начальные и конечные точки ветвей схемы замещения. Один и тот же узел может относиться к различным ветвям.

Каждый узел расчетной модели имеет четыре основных параметра, значение которых определяется при составлении схемы замещения и выполнении расчетов УР [13]:

- 1) активную мощность — P ;
- 2) реактивную мощность — Q ;
- 3) модуль напряжения — V ;
- 4) угол напряжения — δ .

Значения двух переменных задаются в качестве исходных данных для расчета, а значения двух других определяются по результатам расчета УР. В зависимости от того, какие данные принимаются в качестве исходных, узлы разделяются на три типа:

- 1) PV-узел. Узел с постоянной активной мощностью и модулем напряжения;
- 2) PQ-узел. Узел с постоянным значением активной и реактивной мощности. При использовании статических характеристик нагрузки мощность может изменяться между итерациями расчета, но в рамках одной итерации принимается постоянной;
- 3) V δ -узел. Узел с постоянным значением модуля и угла напряжения.

Чаще всего в качестве узлов расчетной модели выбирают шины или секции шин подстанций (реже — все распределительное устройство), отпаечные опоры многоконцевых ЛЭП, виртуальные средние точки схемы замещения многообмоточных трансформаторов, вводные порталы на подстанциях при моделировании линейных выключателей и другие. Узлы расчетной модели выбираются в зависимости от моделируемого сетевого элемента и целей выполнения расчетов режима.

Информация об узлах вводится в расчетную модель через форму **Узлы**, которая открывается через пункт меню **Открыть / Узлы**. Основные колонки формы **Узлы**:

- 1) **S** — перечисляемый тип. В поле определяется включенное состояние узла. Переключатель может принимать одно из двух значений: узел включен; узел отключен;

- 2) **Тип** — перечисляемый тип; определяет тип узла. Пользователь может выбирать только базисный узел (значение «база»), остальные типы определяются на основе введенных исходных данных и по результатам расчета УР;
- 3) **Номер** — натуральное число. Ключевое поле для связи с другими таблицами, которое должно содержать уникальное значение. В него записывается номер узла;
- 4) **U_ном** — вещественное положительное число. В него записываются данные о классе напряжения. При отсутствии значений в колонке «V» или использовании плоского старта, начальные приближения модулей напряжений узлов берутся из данной колонки. Информация из данной колонки используется для оценки мощности нагрузки при учете статических характеристик. Для базисного узла показывает фиксируемый уровень напряжения;
- 5) **Название** — строковая переменная, наименование узла. Лучше всего использовать диспетчерские наименования;
- 6) **N_cxn** — натуральное число. Ключевое поле для связи с формой «СХН». Указывается номер статической характеристики нагрузки (СХН). По умолчанию равно «0», то есть СХН для этого узла в расчете не используется;
- 7) **P_n** — вещественное число, активная мощность нагрузки. Отрицательное значение соответствует генерации в узле (не рекомендуется к использованию);
- 8) **Q_n** — вещественное число, реактивная мощность нагрузки. Отрицательное значение соответствует генерации в узле (не рекомендуется к использованию);
- 9) **P_r** — вещественное число, активная мощность нагрузки. Отрицательное значение соответствует нагрузке в узле;
- 10) **Q_r** — вещественное число, реактивная мощность нагрузки. Отрицательное значение соответствует нагрузке в узле;
- 11) **V_зд** — положительное вещественное число. Указывается значение модуля напряжения, которое фиксируется в генераторном (PV-узел) или базисном (Vδ-узел) узле;
- 12) **Q_min** — вещественное число, нижняя граница регулировочного диапазона по реактивной мощности эквивалентного генератора в узле;
- 13) **Q_max** — вещественное число, верхняя граница регулировочного диапазона по реактивной мощности эквивалентного генератора в узле;

- 14) **G_ш** — положительное вещественное число, активная составляющая проводимости узлового шунта на землю;
- 15) **B_ш** — вещественное число, реактивная составляющая узлового шунта на землю. Отрицательное значение соответствует емкости, а положительное — индуктивности;
- 16) **V** — положительное вещественное число, расчетное значение модуля напряжения узла;
- 17) **Delta** — положительное вещественное число, расчетное значение угла напряжения узла относительно базы.

В программе предусмотрено 5 типов узлов:

- 1) **База** — Vδ-узел. Данный тип предназначен для указания базисного узла. Единственный тип узла, который задается пользователем вручную, остальные определяются автоматически по результатам расчета УР;
- 2) **Нагр** — PQ-узел. К этому типу относятся все нагрузочные узлы;
- 3) **Ген** — PV-узел. К данному типу относятся узлы с источниками активной мощности и автоматической системой поддержания напряжения;
- 4) **Ген+** — PQ-узел. К данному типу относятся узлы, у которых генератор достиг верхней границы регулировочного диапазона по реактивной мощности, который указан в колонке **Q_{max}**;
- 5) **Ген-** — PQ-узел. К данному типу относятся узлы, у которых генератор достиг нижней границы регулировочного диапазона по реактивной мощности, который указан в колонке **Q_{min}**.

4.3. Ветви

В расчетной модели каждая ветвь представляется в виде четырех-полюсника с сосредоточенными параметрами. Два узла этого четырех-полюсника моделируют связь с землей, а два других — связь с другими элементами электрической сети. Схема замещения каждого четырех-полюсника включает в себя пять параметров:

- 1) продольное активное сопротивление **R**;
- 2) продольное реактивное сопротивление **X** (чаще всего индуктивность);
- 3) поперечную активную проводимость **G**;

- 4) поперечную реактивную проводимость B ;
- 5) коэффициент трансформации K_T .

Значения параметров схемы замещения зависят от моделируемого элемента электрической сети: трансформатора, ЛЭП, выключателя и других.

Ввести информацию о ветвях расчетной модели можно в форме **Ветви**. Доступ можно получить через пункт меню **Открыть / Ветви / Ветви**. Параметры вводятся в следующие колонки:

- 1) **S** — перечисляемый тип. В поле определяется включенное состояние ветви. Переключатель может принимать одно из четырех значений: ветвь включена; ветвь отключена; ветвь отключена со стороны узла начала; ветвь отключена со стороны узла конца;
- 2) **Тип** — перечисляемый тип. Выбирается автоматически после расчета УР;
- 3) **N_нач** — натуральное число. Обязательная информация. Является ключом для связи с таблицей «node», которая отображается в форме **Узлы**. В колонке записывается номер узла начала (**Номер** в форме **Узлы**);
- 4) **N_кон** — натуральное число. Обязательная информация. Является ключом для связи с таблицей «node», которая отображается в форме **Узлы**. В колонке записывается номер узла конца (**Номер** в форме **Узлы**);
- 5) **N_п** — натуральное число. Необязательная информация. По умолчанию значение равно нулю. В это поле записывается номер параллельности ЛЭП. Информация необходима для того, чтобы программа могла различать одинаковые параллельные ветви расчетной модели. Параметр обязателен к заполнению, если на основе расчетной модели УР будет создаваться расчетная модель для оценки уровней токов короткого замыкания или электромеханических переходных процессов;
- 6) строка **Название** заполняется автоматически при заполнении поля **Название** формы **Узлы** и запуска расчета УР. Хранит рабочее название ветви;
- 7) строка **Дисп. назв.** Необязательная информация. Отвечает за хранение диспетчерского названия ветви. Поле рекомендуется к заполнению в случае, если на основе расчетной модели планируется создание автоматических отчетов;

- 8) **R** — положительное число. Продольное активное сопротивление ветви;
- 9) **X** — положительное число. Продольное реактивное сопротивление ветви. Положительное значение соответствует индуктивности, а отрицательное — емкости;
- 10) **G** — положительное число, поперечная активная проводимость ветви;
- 11) **B** — действительное число, поперечная реактивная проводимость ветви. Положительное значение соответствует индуктивности, а отрицательное — емкости;
- 12) **Kt/r** — положительное число. Хранит действительную часть коэффициента трансформации. Позволяет задавать отрицательное значение, но в этом случае расчет УР будет завершен аварийно. Значение по умолчанию равно 1;
- 13) **Kt/i** — действительное число. Хранит информацию о мнимой части коэффициента трансформации. В расчетах чаще всего принимается равным нулю. Значение по умолчанию равно нулю.

В расчетной модели по правилам, принятым в ПК RastrWin, ветви бывают трех типов: выключатели, ЛЭП и трансформаторы. Тип ветви определяется автоматически на основе данных, введенных пользователем.

4.4. Элементы электрической сети

Нагрузка

Нагрузка моделируется в виде постоянного значения активной и реактивной мощности. Программа позволяет моделировать зависимость активной и реактивной мощности от величины модуля напряжения, то есть статические характеристики нагрузки (СХН).

Рассмотрим более подробно колонки формы **Узлы**, отвечающие за моделирование нагрузки:

- 1) **U_ном** — вещественное положительное число, данные о классе напряжения. Информация используется для оценки мощности нагрузки при учете статических характеристик;
- 2) **P_н** и **Q_н** — активная и реактивная номинальная мощность нагрузки. По умолчанию пустая ячейка равна нулевому значению;

- 3) **N_схн** — ключевое поле для связи с формой СХН. В данную колонку записываются номера СХН, которые используются для данного нагрузочного узла. Необязательное поле. По умолчанию значение равно нулю, то есть СХН в расчетах не используется;
- 4) **Рн_расч** и **Qн_расч** — расчетное значение активной и реактивной мощности. В данных колонках хранится величина мощности нагрузки, полученная в результате расчета УР с учетом СХН. Если СХН не используются, то мощности равны значениям **Р_н** и **Q_н** соответственно.

При необходимости параметры СХН можно задать в форме СХН, пункт меню **Открыть / СХН**. В программе уже есть СХН по умолчанию с номерами «1» и «2». Вид этих СХН приведен в документации пользователя к программе. Следовательно, при необходимости учета СХН нагрузочных узлов можно просто использовать типовые характеристики, предложенные разработчиками. В случае если пользователь попытается создать свои СХН с номерами «1» и «2», то они будут игнорироваться при расчете режима.

Чтобы задать в узлах нагрузки типовые СХН, необходимо выполнить следующие действия:

- 1) открыть форму **Узлы** (**Открыть / Узлы / Узлы**);
- 2) нажать правой кнопкой мыши на название колонки «**N_схн**»;
- 3) в открывшемся меню выбрать пункт **Прямой ввод кода**. После этого в колонке «**N_схн**» появятся нули в ранее пустых ячейках;
- 4) вручную ввести номер типовой СХН «1» или «2» в тех нагрузочных узлах, в которых предполагается использовать СХН.

Базисный узел

Информация о том, что какой-либо из узлов расчетной модели является базисным, вводится в форме **Узлы**. Информация о параметрах базисного узла вводится в следующие колонки:

- 1) **Тип** — перечисляемый тип. Обязательная информация. Может принимать одно из пяти значений. Вручную можно только указать тип «База», а остальные типы узлов будут определены по результатам расчета УР;
- 2) **Номер** — натуральное число. Обязательная информация. Уникальный ключ узла для связи с другими таблицами и формами. Вводится пользователем вручную;

- 3) **U_ном** — положительное число. Характеризует номинальное напряжение базисного узла. Обязательная информация. Задается уровень напряжения, который фиксируется в базисном узле;
- 4) **V_зд** — уровень напряжения, которое поддерживается в базисном узле. По умолчанию значение равно нулю. Если задано значение отличное от нуля, то оно будет переопределять значение, заданное в колонке **U_ном**;
- 5) **Приоритет БУ** — натуральное число. Необязательная информация. По умолчанию значение ячейки равно нулю. Используется только в цикле автоматических вариантных расчетов.

При создании базисного узла в расчетной модели необходимо задать минимально необходимый объем информации: тип, номер и уровень напряжения.

При моделировании базисного узла колонка **V_зд** необходима при составлении больших расчетных моделей. В таких расчетных моделях в колонке **U_ном** указывается класс напряжения узла, а в колонке **V_зд** — фактический уровень напряжения базисного узла.

В ПК RastrWin есть возможность выполнения расчетов, связанных с отключением узлов и ветвей расчетной модели. При этом могут возникать ситуации, когда часть электрической сети оказывается не связанной с базисным узлом. В таких случаях возможен один из двух исходов:

- 1) если в автономной части электрической сети у одного из узлов задан параметр **Приоритет БУ**, то данный узел назначается базисным, тогда выполняется расчет УР;
- 2) если в автономной части электрической сети нет ни одного узла с заданным параметром **Приоритет БУ**, то весь автономный фрагмент отключается. Это необходимо учитывать при разработке средств автоматизации.

В цикле автоматических расчетов во вновь созданном базисном узле каждого автономного фрагмента электрической сети будет зафиксирован модуль и угол напряжения из предыдущего расчета УР.

Генератор

Для расчетов УР источник активной мощности можно моделировать несколькими способами:

- 1) в виде узла с постоянной активной и реактивной мощностью (PQ-узел);

- 2) в виде узла с постоянной активной мощностью и модулем напряжения (V δ -узел) —
 - без ограничений на регулировочный диапазон по реактивной мощности;
 - с ограничением по возможной величине изменения реактивной мощности.

Первая модель наиболее простая и чаще всего используется при моделировании внешних эквивалентов. Чтобы представить генератор в расчетной модели в виде источника постоянной мощности, нужно активную и реактивную мощность генератора занести в колонки **P_г** и **Q_г** формы **Узлы**. Знак плюс в них соответствует выработке мощности, а минус — потреблению. Возможно представить генератор как отрицательную нагрузку («P_н» и «Q_н»), но делать этого не рекомендуется, поскольку на основе модели УР в ПК RastrWin может быть создана модель для расчетов электромеханических переходных процессов, в которой можно получить некорректные результаты расчетов. Кроме того, генератор в виде отрицательной нагрузки будет некорректно обрабатываться при автоматизированной оценке суммарного потребления района электрической сети.

Рекомендуемой и наиболее часто используемой моделью генератора является представление его в виде узла с постоянной активной мощностью и модулем напряжения. Это позволяет корректно моделировать автоматику регулирования напряжения на шинах генератора. При представлении генератора в виде V δ -узла в ПК RastrWin необходимо задавать регулировочный диапазон реактивной мощности генератора. Таким образом, для узла, в котором есть генератор, надо в форме **Узлы** задавать 4 параметра:

- 1) **P_г** — активную мощность генератора;
- 2) **V_{зд}** — фиксированное значение модуля напряжения, которое генератор должен поддерживать на своих шинах;
- 3) **Q_{min}** — нижнюю границу регулировочного диапазона генератора по реактивной мощности;
- 4) **Q_{max}** — верхнюю границу регулировочного диапазона по реактивной мощности.

Если есть необходимость представить генератор без ограничений по регулировочному диапазону, то можно в колонках **Q_{min}** и **Q_{max}** формы **Узлы** задать неадекватно большие числа, например: —999 999

и 999 999. Такое представление генератора бывает необходимо при оценке требуемой величины компенсации реактивной мощности в узле.

Рассмотренные выше модели генераторов позволяют создать узел, в котором заданы эквивалентные мощности всех генераторов на этих шинах, что не всегда бывает удобно при расчетах в ПК RastrWin. В целях повышения удобства выполнения расчетов, особенно на больших расчетных моделях, возможно представить генератор в виде отдельной сущности. Это позволяет более удобно моделировать генераторы и уменьшить трудоемкость подготовки расчетной модели УР для расчетов токов короткого замыкания и электромеханических переходных процессов.

При моделировании генераторов в виде отдельных объектов программа самостоятельно рассчитывает параметры эквивалентного генератора в узлах электрической сети и выводит их в поля формы **Узлы: Р_г, Q_min и Q_max**. Фиксированный модуль напряжения **V_зд** необходимо задавать вручную. Рассмотрим более подробно моделирование генераторов по отдельности.

Ввод информации об отдельных генераторах осуществляется в форме **Генераторы**, которая доступна через пункт меню **Открыть / Генераторы (УР) / Генераторы (УР)**. Форма **Генераторы (УР)** содержит следующие основные колонки параметров:

- 1) **S** — состояние генератора. Обязательное заполнение. Показывает включенное состояние генератора. Может принимать одно из двух значений: нет отметки — генератор включен в работу и учитывается в расчетах; есть отметка (красный крест) — генератор выключен и исключается из расчетов. По умолчанию принимает включенное значение;
- 2) **N arg** — номер генератора. Обязательное заполнение. Уникальное натуральное число. Данное поле является ключом для связи с другими таблицами и формами. Заполняется вручную;
- 3) **Название** — диспетчерское наименование генератора. Необязательный параметр. В данное поле записывается строка с диспетчерским наименованием генератора. Может иметь повторяющиеся значения;
- 4) **N узла** — ключ для связи с ключом **Номер** формы **Узлы**. Обязательное заполнение. В данное поле необходимо записать номер узла, в котором установлен генератор;

- 5) **P** — активная мощность генератора. Содержит информацию о мощности, которую должен вырабатывать генератор. По умолчанию значение пустого поля равно нулю;
- 6) **Q** — реактивная мощность генератора. Содержит информацию о величине выработки или потребления реактивной мощности генератором. Задается вручную, если не указаны регулировочный диапазон по реактивной мощности (поля **Qmin** и **Qmax**). Если задан регулировочный диапазон, то величина реактивной мощности является расчетной и определяется программой. По умолчанию значение пустого поля равно нулю;
- 7) **Pmin** и **Pmax** — минимум и максимум регулировочного диапазона по активной мощности. Необязательная информация. Используются для повышения удобства выполнения расчетов, так как дают возможность автоматически контролировать корректность задания параметра **P** или в цикле автоматического расчета распределять небалансы активной мощности между генераторами. По умолчанию значение пустого поля равно нулю;
- 8) **Qmin** и **Qmax** — минимум и максимум регулировочного диапазона генератора по реактивной мощности. Задаются пользователем. Являются необязательными параметрами. По умолчанию значение пустого поля равно нулю;
- 9) **N_PQ** — номер PQ-диаграммы. Необязательный параметр. Поле является ключом для связи с формой **Диаграмма PQ**. Позволяет задать номер зависимости регулировочного диапазона **Qmin** и **Qmax** от величины выработки активной мощности.

После внесения всей необходимой информации о генераторах необходимо проверить, что настройка «Пересчитывать P/Q узла по Р ген (Ген->P)» расчетного модуля УР переключена в состояние «Да» (более подробная информация про настройки приведена в гл. 5). В этом случае ПК RastrWin принимает в расчет информацию о заданных генераторах из формы **Генераторы (УР)**. Соответствующие поля («P_г», «Q_min» и «Q_max») формы **Узлы** будут автоматически обновляться согласно расчетам эквивалентного генератора по данным из формы **Генераторы (УР)**. Если данная настройка переключена в состояние «Нет», то ПК RastrWin будет игнорировать информацию из формы **Генераторы (УР)** и принимать в расчет только информацию из формы **Узлы**.

При выполнении практических расчетов рекомендуется задавать PQ-диаграммы генераторов. Это позволяет автоматизировать оценку

регулируемого диапазона по реактивной мощности в зависимости от текущего уровня загрузки генератора по активной мощности. Форма для заполнения данных по PQ-диаграммам генераторов открывается через меню **Открыть / Генератор (УР) / Диаграмма PQ**.

Форма **Диаграмма PQ** содержит следующие поля:

- 1) **N** — ключевое поле для связи с формой **Генераторы (УР)**. Натуральное число. Может иметь повторяющееся значение. В данное поле записывается номер PQ-диаграммы. По номеру программа определяет принадлежность той или иной строки к PQ-диаграмме;
- 2) **P** — действительное число. Активная мощность генератора, для которой задается регулировочный диапазон по реактивной мощности. По умолчанию равно «0»;
- 3) **Qmin** — действительное число. Минимальное значение регулировочного диапазона по реактивной мощности, соответствующее активной мощности P . По умолчанию равно «0»;
- 4) **Qmax** — действительное число. Максимальное значение регулировочного диапазона по реактивной мощности, соответствующее активной мощности P . По умолчанию равно «0».

PQ-диаграмма генератора задается в виде линейной аппроксимации реальной диаграммы (рис. 4). Промежуточные значения регулировочного диапазона определяются с помощью линейной интерполяции.

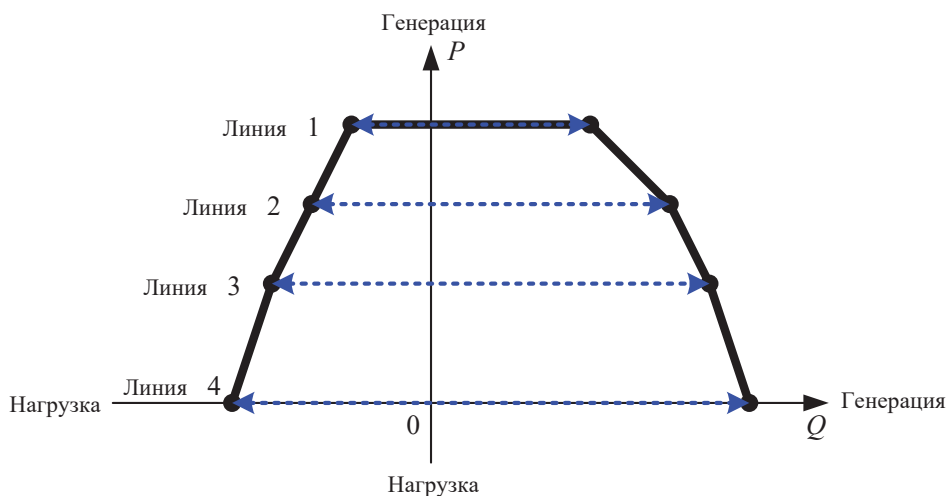


Рис. 4. Представление PQ-диаграммы генератора в ПК RastrWin

Принадлежность записи в форме **Диаграмма PQ** одной и той же PQ-диаграмме определяется по значению поля **N**. Для одной и той же PQ-диаграммы необходимо задавать одинаковые значения данного ключевого поля. Пример PQ-диаграммы с номером «1» приведен в таблице ниже.

**Пример PQ-диаграммы генератора в формате,
пригодном для заполнения формы Диаграммы PQ**

N	P	Qmin	Qmax
1	10	-12	32
1	20	-10	30
1	30	-5	25
1	400	0	20

Линия электропередач

Параметры схемы замещения ЛЭП вводятся в форме **Ветви**. Общий вид схемы замещения и названия параметров схемы замещения представлены на рис. 5.

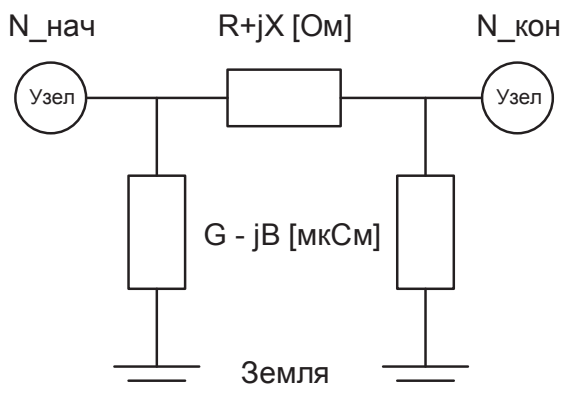


Рис. 5. Полная схема замещения линии электропередач
(названия параметров соответствуют названиям в форме **Ветви**)

Подробное описание колонок формы **Ветви** приведено в гл. 4. Для ввода ЛЭП с П-образной схемой замещения необходимо задать шесть параметров схемы замещения:

- 1) продольное активное сопротивление (R), Ом;
- 2) продольное реактивное сопротивление (X), Ом. Индуктивности соответствует знак плюс;

- 3) суммарную поперечную активную проводимость (G) обоих шунтов, мкСм;
- 4) суммарную поперечную реактивную проводимость (B) обоих шунтов, мкСм. Емкости соответствует знак минус;
- 5) номер узла начала ($N_{\text{нач}}$);
- 6) номер узла конца ($N_{\text{кон}}$).

Подробное описание колонок формы **Ветви** приведено в гл. 4. Для ввода ЛЭП с П-образной схемой замещения необходимо задать шесть параметров схемы замещения:

- 1) продольное активное сопротивление (R), Ом;
- 2) продольное реактивное сопротивление (X), Ом. Индуктивности соответствует знак плюс;
- 3) суммарную поперечную активную проводимость (G) обоих шунтов, мкСм;
- 4) суммарную поперечную реактивную проводимость (B) обоих шунтов, мкСм. Емкости соответствует знак минус;
- 5) номер узла начала ($N_{\text{нач}}$);
- 6) номер узла конца ($N_{\text{кон}}$).

При выполнении расчетов программа автоматически разнесет суммарный шунт на два одинаковых по концам ЛЭП. Выбор между П-образной и Г-образной схемой замещений выполняется автоматически в соответствии с условиями:

- 1) поле «Кт/г» заполнено. В расчет принимается Г-образная схема замещения;
- 2) поле «Кт/г» пустое. В расчет принимается П-образная схема замещения.

Для того чтобы у ЛЭП была корректная схема замещения, поле с коэффициентом трансформации должно быть пустым.

Если необходимо создать модель многоконцевой ЛЭП, то в расчетную модель надо добавить дополнительные узлы, которые соответствуют отпаечным опорам. В таком случае участок ЛЭП от отпаечной опоры до шин ПС или от одной отпаечной опоры до другой моделируется в виде схемы замещения двухконцевой ЛЭП.

Трансформатор

В ПК RastrWin существует несколько способов моделирования трансформаторов. Рассмотрим самый простой из них.

Для моделирования трансформаторной ветви необходимо рассчитать и ввести в форме **Ветви** следующие параметры схемы замещения:

- 1) продольное активное сопротивление (R), Ом;
- 2) продольное реактивное сопротивление (X), Ом. Индуктивности соответствует знак плюс;
- 3) поперечную активную проводимость (G) шунта, мкСм;
- 4) поперечную реактивную проводимость (B) шунта, мкСм. Индуктивности соответствует знак плюс;
- 5) номер узла начала ($N_{\text{нач}}$);
- 6) номер узла конца ($N_{\text{кон}}$);
- 7) действительную и мнимую часть коэффициента трансформации (K_t/g и K_t/i).

Трансформаторная ветвь обычно представляется в виде Г-образной схемы замещения. Для того чтобы трансформатор корректно моделировался, при выполнении расчетов поле « K_t/g » не должно быть пустым.

В программе есть ограничения на возможные значения действительной и мнимой части коэффициента трансформации. Действительная часть « K_t/g » может быть только положительным числом. При попытке задать отрицательное число, расчет будет завершен аварийно. Мнимая часть коэффициента трансформации « K_t/i » может принимать как положительное, так и отрицательное значение.

Важно отметить, что у трансформаторной ветви всегда должно быть заполнено поле « K_t/g », даже если коэффициент трансформации имеет чисто мнимое значение (поворот вектора напряжения на 90° или 270°). В случае необходимости моделирования таких трансформаторов, в поле « K_t/g » можно задать очень маленькое значение — около $1 \cdot 10^{-3}$, а в поле « K_t/i » внести значение модуля коэффициента трансформации. Большее значение будет вносить погрешность в расчеты, а меньшее — приводить к аварийному завершению расчета УР. При необходимости моделирования других углов, необходимо выполнить тригонометрический расчет действительной и мнимой части коэффициента трансформации.

Область разрешенных значений действительной и мнимой части коэффициента трансформации представлена на рис. 6.

В большинстве практических задач по оценке параметров УР нет необходимости учитывать мнимую часть коэффициента трансформации. По этой причине данное поле можно оставлять пустым, а значение модуля коэффициента трансформации записывать в поле « K_t/g ».

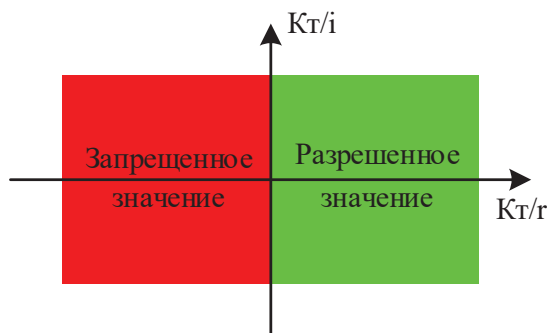
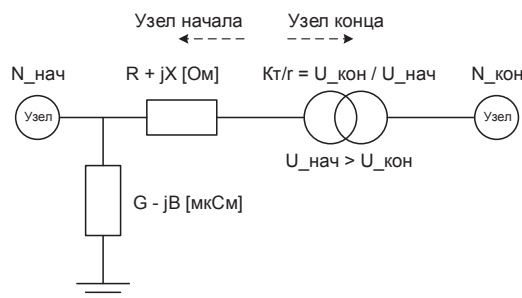


Рис. 6. Разрешенные значения коэффициента трансформации

Чаще всего необходимо рассчитать данные для двух- и трехобмоточных трансформаторов. На рис. 7–8 представлены схемы замещения двух- и трехобмоточных трансформаторов в соответствии с параметрами формы **Ветви**.

а



б

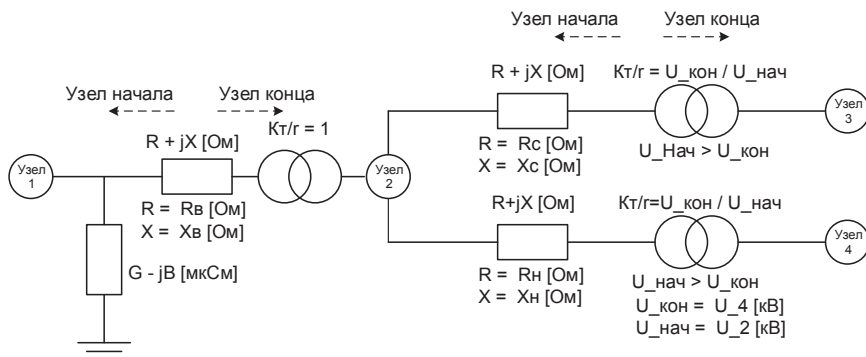


Рис. 7. Схема замещения двухобмоточного (*а*) и трехобмоточного (*б*) трансформатора с моделированием потерь холостого хода в виде шунта (названия параметров соответствуют названиям в форме **Ветви**)

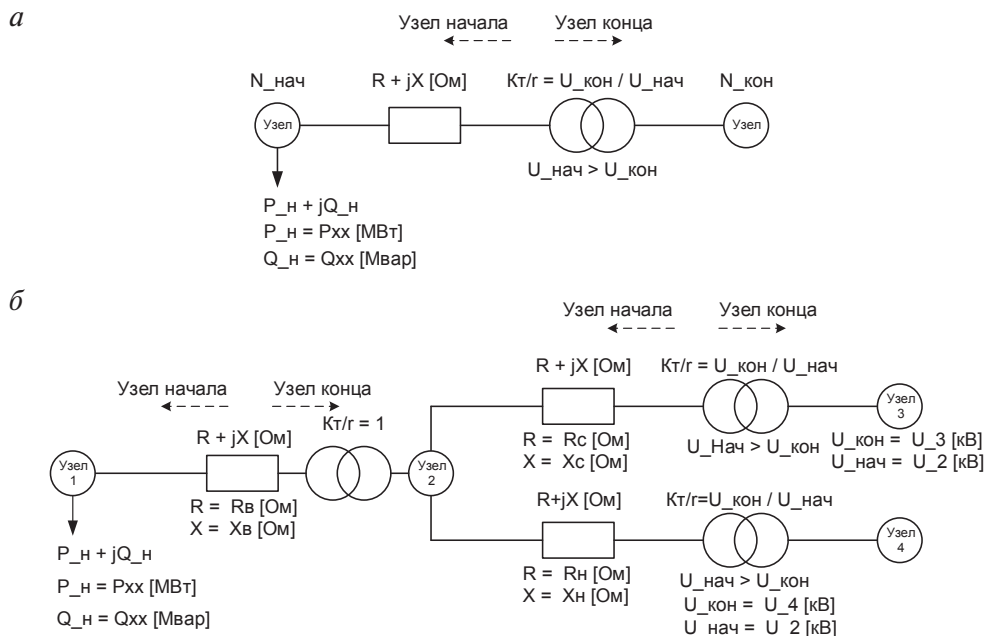


Рис. 8. Схема замещения двухобмоточного (а) и трехобмоточного (б) трансформатора с моделированием потерь холостого хода в виде нагрузки в узле (названия параметров соответствуют названиям в формах **Ветви** и **Узлы**)

Особенностью моделирования трехобмоточного трансформатора является необходимость задавать единичный коэффициент трансформации на ветви, где учитывается шунт холостого хода. Если оставить значение поля «Кт/г» пустым, то в расчетах трансформатор будет моделироваться по П-образной схеме замещения. Это приведет к некорректным результатам расчетов.

В ПК RastrWin все параметры схемы замещения трансформатора приведены к классу напряжения узла начала ветви. При вводе исходных данных следует быть внимательным. В программе есть автоматическая проверка корректности введенного значения коэффициента трансформации, но значение сопротивления не проверяется. Если коэффициент трансформации задан с ошибкой, то алгоритм проверки исходных данных сети выдаст предупреждение в окне «Протокол».

На рис. 7 представлены схемы замещения трансформаторов при задании потерь мощности в шунтах в виде постоянной мощности на-

чала. Таким образом, узел начала будет представлять собой узел нагрузки (см. подгл. 4.4, «Нагрузка»). Мощность нагрузочного узла вводится в форме **Узлы**.

Шунтирующий реактор

В расчетной модели шунтирующий реактор (ШР) обычно задается в виде проводимости поперечного узлового шунта на землю. Информацию о величине проводимости шунтирующего реактора необходимо вносить в форму **Узлы**.

В ПК RastrWin шунтирующий реактор можно задать несколькими способами:

- 1) указать эквивалентную проводимость всех ШР, установленных в данном узле. Значение проводимости указывается в колонке **В_ш** формы **Узлы**. Проводимость задается со знаком плюс и измеряется в микросименсах;
- 2) если в узле есть несколько однотипных ШР, то можно указать проводимость единичного реактора и количество ШР.

Для моделирования количества ШР в форме **Узлы** есть колонка **N_p-p** (по умолчанию скрыта). Проводимость единичного ШР задается в колонке **В_p-p**.

Результирующая проводимость узлового шунта хранится в колонке **В_расч** формы **Узлы** и рассчитывается следующим образом:

$$B_{\text{расч}} = B_{\text{ш}} + N_{\text{p-p}} \cdot B_{\text{p-p}}.$$

Схема замещения ШР в обозначениях ПК RastrWin приведена на рис. 9.

В связи с тем, что колонки **В_расч**, **В_ш**, **N_p-p** и **В_p-p** также отвечают за моделирование БСК (подгл. 4.4, «Батарея статических конденсаторов»), не рекомендуется в одном узле расчетной модели моделировать БСК и ШР.

Батарея статических конденсаторов

В расчетной модели батарея статических конденсаторов (БСК) задается аналогично ШР, с использованием тех же колонок формы **Узлы**. Главным отличием БСК от ШР является знак минус у проводимости

$B_{расч}$, $B_{ш}$ и B_{p-p} (в ПК RastrWin все емкостные проводимости на землю задаются со знаком минус) .

Схема замещения БСК в обозначениях ПК RastrWin приведена на рис. 10.

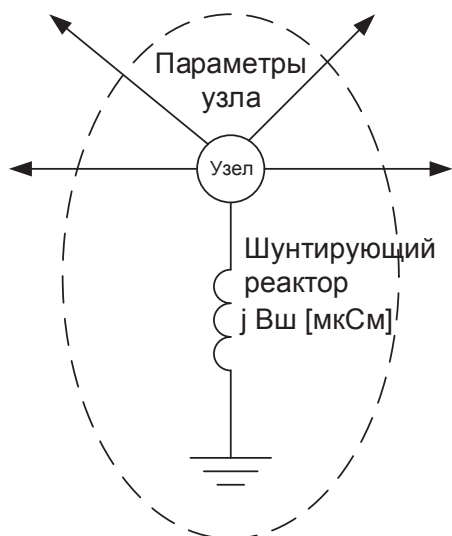


Рис. 9. Схема замещения ШР
(наименование параметра соответствует названию колонки в форме Узлы)

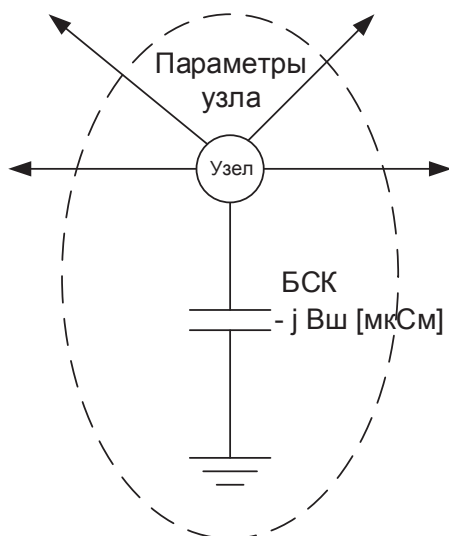


Рис. 10. Схема замещения БСК
(наименование параметра соответствует названию колонки в форме Узлы)

Выключатель

Существует несколько способов моделирования выключателей. Наиболее простой способ — это представление выключателя в виде ветви с очень малым сопротивлением, которое, как правило, на два или три порядка меньше, чем сопротивление ЛЭП.

Для создания выключателя между узлами необходимо в форме **Ветвь** создать новую строку и задать только номера узлов начала («N_нач») и конца («N_кон») ветви. Сопротивление или проводимости шунтов на землю для выключателей задавать не надо.

Сопротивление для всех выключателей в расчетной модели определяется через пункт настроечного меню **Сопротивление выключателя (относительные единицы умноженные на 10^{-6})**, доступный через пункт меню **Расчеты / Параметры / Режим**. Сопротивление выключателя задается в от-

носительных единицах. По умолчанию значение сопротивления равно $1 \cdot 10^{-6}$ о. е. В именованных единицах сопротивление имеет порядок величины от 10^{-3} до 10^{-1} Ом, в зависимости от класса напряжения (чем выше класс напряжения, тем выше сопротивление). Более подробная информация про расчет сопротивления выключателя приведена в руководстве пользователя.

Основным недостатком такого способа моделирования является плохая сходимость итерационного процесса расчета УР при большом числе выключателей в схеме, особенно при наличии узлов с нулевой мощностью нагрузки и генерации, к которым подключены только ветви с выключателями. Для устранения этого недостатка в программе есть метод автоматического исключения выключателей из схемы замещения для расчета УР и объединении узлов, которые были связаны этими выключателями. После окончания итерационного процесса расчета УР, программа автоматически рассчитывает параметры режима в исходных узлах и выключателях. Включения этого расчетного модуля осуществляется через настройку **Удаление выключателей из схемы: (Выкл)** в меню **Расчеты / Параметры / Режим**.

5. Основные настройки для выполнения расчетов установившихся режимов

При необходимости ПК RastrWin позволяет менять настроечные параметры всех расчетных модулей. Настроечные параметры расчетного модуля УР хранятся в таблице «com_regim». Для удобства редактирования информация из данной таблицы выведена на специальную форму, которую можно открыть через пункт меню **Расчеты / Параметры / Режим**. Основные настроечные параметры расчетного модуля УР:

- 1) Точность расчета (dP);
- 2) Максимальное число итераций (It);
- 3) Стартовый алгоритм (Start);
- 4) Плоский старт (Пл.старт);
- 5) Макс. допустимое снижение V (dV-);

- 6) Макс. допустимое превышение $V(dV+)$;
- 7) Макс. допустимый угол по связи $(dDelta)$;
- 8) Состояние расчета режима (Статус);
- 9) Метод расчета (Метод).

Точность расчета (dP)

Настроечный параметр показывает значение чебышевской нормы вектора невязок, при достижении которого будет завершен расчет. Другими словами, пока модуль максимального элемента вектора невязок больше, чем заданная настройка dP, необходимо выполнить следующую итерацию расчета УР.

Если итерационный процесс прекратился именно по этому критерию, то расчет считается завершившимся нормально. В противном случае в окне **Протокол** выводится сообщение об аварийном завершении расчета и превышении максимального числа итераций (It).

Максимальное число итераций (It)

Параметр определяет предельное число итераций расчета УР с помощью выбранного алгоритма, после которого происходит аварийное завершение расчета УР. Если выставить 0, то ограничение по числу итераций снимается.

Принято считать, что УР с заданным набором параметров расчетной модели существует, если итерационный процесс сошелся к решению за ограниченное число итераций. В практике расчетов принято, что чаще всего ограничение по максимальному числу итераций составляет 20 штук при точности расчета в 1 МВт. С увеличением точности расчета, предельное число итераций необходимо также увеличивать. По умолчанию в программе выставлено ограничение в 20 итераций.

Стартовый алгоритм (Start)

Настроечный параметр определяет необходимость использования стартового алгоритма и может принимать два значения: да или нет. Значение «Да» означает, что до выполнения основного алгоритма расчета УР будет выполнено несколько итераций специального стартового алгоритма.

Выполнять итерации стартового алгоритма нужно для улучшения начальных условий основного метода (чаще всего метода Ньютона). Без выполнения этого алгоритма в некоторых режимах может наблю-

даться аварийное завершение расчета по критерию превышения максимального числа итераций даже в случаях, когда режим является существующим.

Плоский старт (Пл.старт)

Параметр задает принцип, по которому будут взяты начальные приближения для расчета УР. Может принимать одно из двух значений:

- 1) «Да» — начальные приближения модулей напряжений узлов будут взяты из столбца **U_ном** формы **Узлы**, а углов напряжений узлов будут приняты равными нулю;
- 2) «Нет» — начальные приближения модулей напряжений узлов будут взяты из столбца **V** формы **Узлы**, углов напряжений узлов — из столбца **Delta** формы **Узлы**.

Таким образом, при значении «Нет» начальные приближения будут взяты из предыдущего успешно рассчитанного режима (если пользователь вручную не поменял значения столбцов «V» и «Delta» формы «Узлы»).

Макс. допустимое снижение V (dV-)

Параметр настраивает остановку расчета при условии, что самый малый относительный модуль напряжения узла (отношение колонок «V» / «U_ном» формы «Узлы») после выполнения очередной итерации расчета УР оказывается меньше или равен заданному значению.

В большинстве случаев значение параметра не рекомендуется изменять. Значение 0,5, которое выставлено в программе по умолчанию, фактически приводит к тому, что данное условие остановки расчетов отключено. Это позволяет точнее рассчитывать УР с пониженными уровнями напряжения в узлах расчетной модели.

Макс. допустимое превышение V (dV+)

Параметр настраивает остановку расчета при условии, что самый большой относительный модуль напряжения узла (отношение колонок «V» / «U_ном» формы «Узлы») на итерации оказывается больше или равен заданному значению.

Не рекомендуется изменять выставленное в программе значение, по умолчанию равное 2. Принятое по умолчанию значение настроенного параметра фактически отключает остановку расчетов УР по превышению максимального расчетного напряжения над номинальным.

Макс. допустимый угол по связи (dDelta)

Уставка настраивает остановку расчета при условии, что самый большой модуль взаимного угла напряжений узла начала и узла конца ветви (колонка «dDelta» в форме «Ветви») на итерации оказывается больше принятого значения.

Не рекомендуется изменять выставленное в программе значение, по умолчанию равное 5 157. Принятое по умолчанию значение данного настроечного параметра фактически отключает проверку условия по превышению разности углов напряжений по концам ЛЭП.

Состояние расчета режима (Статус)

Данный настроечный параметр показывает, как завершился предыдущий расчет УР. Если расчет завершился успешно по критерию точности (снижение погрешности ниже заданного значения настройки «Точность расчета (dP)»), то будет автоматически выставлено «Нормально», иначе — «Аварийно». При необходимости возможна ручная корректировка значения настроечного параметра.

Значение настроечного параметра влияет только на то, будет ли перед запуском процедуры следующего расчета показано окно с вопросом, как на рис. 11. Если в нем нажать «Да», то следующий расчет будет выполнен так, будто настройка «Пл.старт» выставлена в положение «Да» (это значение настроечного параметра меняться не будет, но расчет УР будет выполнен так, как если бы настройка «Пл.старт» была выставлена в положение «Да»). Если в окне нажать «Нет», то расчет будет выполнен согласно выставленному значению настройки «Пл.старт».

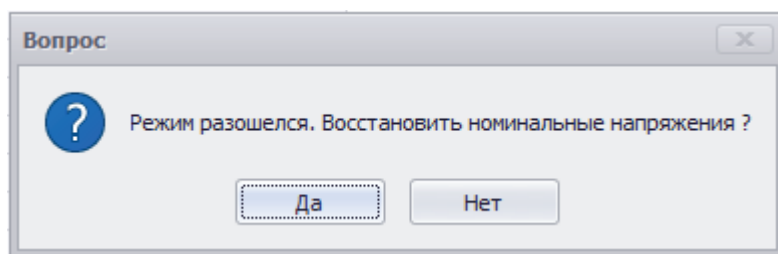


Рис. 11. Окно, всплывающее перед расчетом, при переключении настройки «Состояние расчета режима (Статус)» в положение «Аварийно»

Во всплывающем окне, представленном на рис. 11, рекомендуется нажимать кнопку «Да».

Значение данного параметра изменяется автоматически в процессе выполнения расчетов УР. Фактически значение настройки используется только для чтения в автоматическом цикле расчетов режимов.

Метод расчета (Метод)

Настройка позволяет выбрать метод расчета УР. Может принимать следующие значения:

- 1) «Ньютон» — значение по умолчанию, которое указывает, что методом расчета будет классический метод Ньютона [13];
- 2) «Параметр» — метод Ньютона по параметру [13].

Раздел Б.

Основы расчетов простых электрических сетей

Лабораторная работа № 1.

Знакомство с программным комплексом RastrWIN

Постановка задачи

Цель работы — ознакомиться с графическим пользовательским интерфейсом ПК RastrWin и основами расчетов установившихся режимов.

Исходные данные. В качестве ознакомительного задания на рис. Б1 представлена схема электрической сети, для которой необходимо выполнить расчет УР. В схеме показано три подстанции, две из них упрощенно в виде одного узла (ПС 110 кВ «Центральная» и ПС 110 кВ «Бирюза») и одна подробно (ПС 110 кВ «Новая»).

Выключатели показаны только на ПС 110 кВ «Новая». Все выключатели на схеме нормально включены.

Расчетные параметры схемы замещения

Параметры линий электропередач:

- ЛЭП 1–100 км; 2 цепи сечением АС-240;
 $Z_{\text{цепи}} = 12 + j40,5 \text{ Ом}; Y_{\text{цепи}} = j281 \cdot 10^{-6} \text{ См};$
- ЛЭП 2–50 км; 2 цепи сечением АС-150;
 $Z_{\text{цепи}} = 9,9 + j21 \text{ Ом}; Y_{\text{цепи}} = j135 \cdot 10^{-6} \text{ См};$
- ЛЭП 3–50 км; 2 цепи сечением АС-240;
 $Z_{\text{цепи}} = 6 + j20,25 \text{ Ом}; Y_{\text{цепи}} = j140,5 \cdot 10^{-6} \text{ См}.$

Параметры трансформаторов:

T1 и T2 — ТРДН-40000/110;

$Z = 1,4 + j34,7 \text{ Ом}$; $Y = (2,7 - j19,6) \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Параметры нагрузок:

- $S1 = 30 + j15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;
- $S2 = 40 + j20 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;
- $S3 = 25 + j10 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Параметры генератора:

Г1 — ТВС-32У3. $P = 32 \text{ МВт}$; $\cos \varphi = 0,8$; $Q_{\min} = 4 \text{ Мвар}$; $Q_{\max} = 24 \text{ Мвар}$.

Напряжение базисного узла — 115 кВ.

Параметры БСК: КС2–10,5–50. $B = 32800 \text{ мкСм}$.

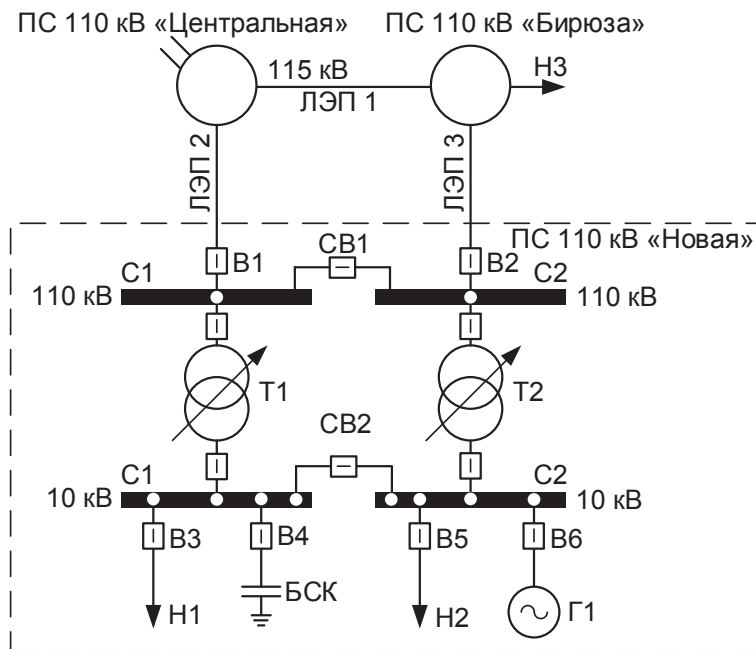


Рис. Б1. Схема электрической сети для ознакомительного задания:

C1 и C2 — первая и вторая секции шин соответствующего напряжения 110 либо 10 кВ; V1 и V2 — выключатели присоединений; V3–V6 — выключатели присоединений 10 кВ; H1, H2 и H3 — нагрузка; T1 и T2 — первый и второй трансформаторы на ПС 110 кВ «Новая»; СВ1 и СВ2 — секционный выключатель; Г1 — первый генератор на ПС 110 кВ «Новая»; БСК — батарея статических конденсаторов; ПС «Центральная» — подстанция, которая имеет связь с единой энергосистемой (ЕЭС). Шины 110 кВ данной ПС принимаются в качестве базисного узла

Задачи:

- 1) подготовить схему замещения электрической сети для расчета УР, представленной на рис. Б1;
- 2) выполнить расчет УР электрической сети для нормальной схемы;
- 3) выполнить расчет УР электрической сети при поочередном отключении различных сетевых элементов (ветвей): одной линии электропередачи, одного понижающего трансформатора.

В отчете представить:

- 1) в графическом виде однолинейную схему замещения сети с нанесенными на нее результатами расчета УР (потoki мощностей начала и конца по ветвям; потери мощности в ветвях; модули и углы напряжения во всех узлах; величины нагрузок и генерации; расчетные значения сопротивлений, проводимостей шунтов и коэффициентов трансформации) нормальной схемы и после отключения одного элемента;
- 2) краткий анализ того, как и почему изменились потоки мощности по сетевым элементам и напряжения в узлах электрической сети при отключении одного элемента по сравнению с нормальной схемой.

Рекомендации к выполнению

Ознакомительная работа состоит из нескольких основных этапов (более подробно см. пример на с. 41):

- 1) изучения основных элементов интерфейса ПК RastrWin;
- 2) создания файла с расширением «*.rg2» для хранения данных расчетной модели;
- 3) подготовки исходных данных по схеме замещения для ввода в программу (выполняется внешними средствами) —
 - расстановка узлов и ветвей расчетной модели;
 - нумерация узлов;
 - расчет параметров схемы замещения;
 - составление схемы замещения сети;
- 4) ввода данных схемы замещения в программу —
 - ввести информацию по узлам в форму **Узлы**, чтобы упростить дальнейший ввод ветвей;
 - данные о ЛЭП в форму **Ветви**;
 - данные о трансформаторах в форму **Ветви**;

- информацию по секционным выключателям в форму **Ветви** (выключатели в цепях линий и трансформаторов в ПК RastrWin обычно не моделируются);
- 5) сохранения файла с данными расчетной модели, с присвоением ему имени;
 - 6) запуска расчета параметров УР;
 - 7) сохранения файла с результатами расчетов УР с тем же именем;
 - 8) нанесения полученных результатов на схему замещения сети.

Перед вводом каких-либо данных в программу рекомендуется создавать файл по соответствующему шаблону. Это позволит избежать ошибок в шаблоне и упростит сохранение в процессе работы.

Пользователь самостоятельно подготавливает параметры схемы замещения. С этой целью удобно использовать табличные редакторы, например, MS Excel или OpenOffice Calc.

Ввод данных схемы замещения рекомендуется начинать с информации по узлам, что позволит создать каркас расчетной модели и уменьшить количество ошибок ввода данных по ветвям. Это связано с тем, что в программе возможно автозаполнение некоторых полей в формах на основе уже введенных данных.

Перед запуском расчетов рекомендуется сохранить данные. Это позволит избежать непредвиденной потери информации. Также рекомендуется на диске иметь резервную копию файла с данными расчетной модели.

На первых этапах освоения навыков расчетов параметров УР с использованием программных средств рекомендуется вручную наносить полученные результаты на схему замещения сети. Это позволит лучше почувствовать связь между результатами расчетов и схемой замещения электрической сети, а также понять, какие данные выдает программа и где они находятся.

Теория и примеры

Подготовка исходных данных для расчетов

Перед проведением расчетов в программе нужно подготовить исходные данные по схеме замещения, нагрузкам и генераторам электрической сети в форме, понятной ПК RastrWin. Для этого необходимо:

- 1) нарисовать схему с указанием всех узлов и ветвей. При составлении больших расчетных моделей может быть удобно держать перед глазами однолинейную схему сети и отмечать на ней, какие узлы и ветви уже внесены в расчетную модель.
- 2) Рассчитать параметры схемы замещения:
 - для каждого узла нагрузки определить активную (МВт) и реактивную (Мвар) мощность;
 - для генераторных узлов определить активную мощность (МВт) генерации, пределы (минимум и максимум) регулирования реактивной мощности (Мвар) и заданный (фиксированный) модуль напряжения (Кв);
 - при наличии в узле шунтов на землю — батареи статических конденсаторов (БСК) или шунтирующих реакторов (ШР) — определить их проводимость (мкСм);
 - для ЛЭП определить продольное сопротивление (Ом) и поперечную проводимость на землю (мкСм) (емкостный характер отражается в виде знака минус при внесении данных в формы ПК RastrWin);
 - для двухобмоточных трансформаторов определить сопротивление (Ом), приведенное к стороне высшего напряжения, поперечную проводимость шунта на землю (мкСм) и коэффициент трансформации, равный отношению низшего номинального напряжения к высшему; таким образом, коэффициент трансформации будет меньше единицы и начальный узел — это узел высшего напряжения;
 - автотрансформаторы и трехобмоточные трансформаторы представить по схеме звезды с промежуточным узлом и тремя ветвями.

3) Ввести параметры схемы замещения в программу.

Есть две стратегии подготовки данных для расчетов:

- 1) сначала рассчитать все параметры, а потом ввести их в программу;
- 2) заполнять формы ПК RastrWin по мере расчета параметров схемы замещения.

Первую стратегию хорошо использовать при составлении небольших расчетных моделей. В этом случае пользователь должен запомнить, какие параметры он уже посчитал, а какие — еще нет. За счет

того, что выполняется однотипная работа, это в среднем будет быстрее, чем второй способ.

К заполнению форм ПК RastrWin по мере расчета параметров схемы замещения удобно прибегать при составлении больших расчетных моделей. В таких случаях можно полностью сосредоточиться на моделировании какой-то одной ПС или линии электропередач. Это более медленный подход, но он позволяет меньше ошибаться при расчетах параметров больших схем замещения.

Пример ввода исходных данных и расчета

Основные данные для расчета установившегося режима электрической сети хранятся в ПК RastrWin, в файле с расширением «.rg2». Исходные данные нужно представить в виде информации об узлах и информации о ветвях, которую заносят в формы **Узлы** и **Ветви** соответственно. Для доступа к формам **Узлы** и **Ветви** необходимо указать в меню:

- 1) **Открыть / Узлы / Узлы** (рис. Б2),
- 2) **Открыть / Ветви / Ветви** (рис. Б3).

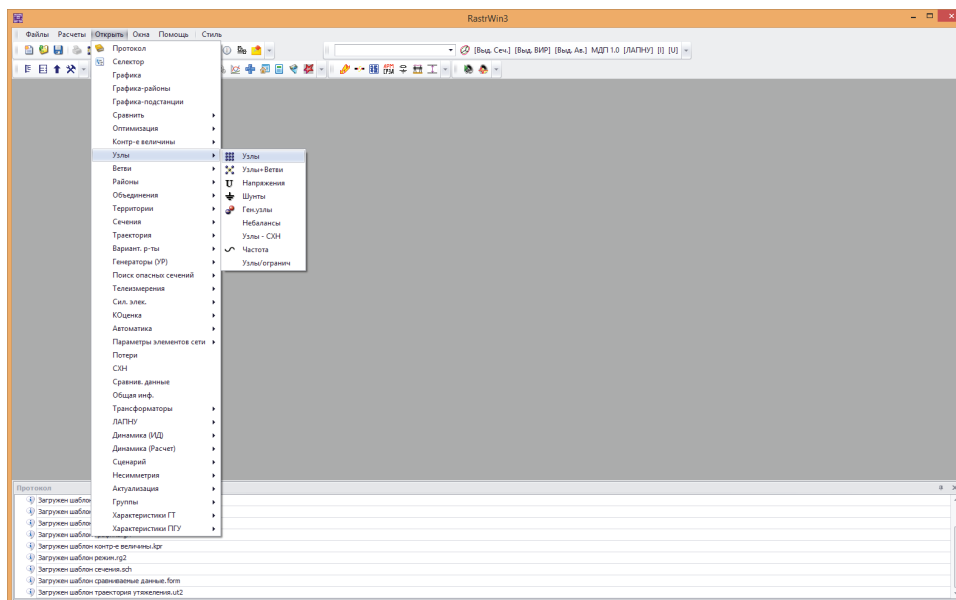


Рис. Б2. Доступ к форме Узлы

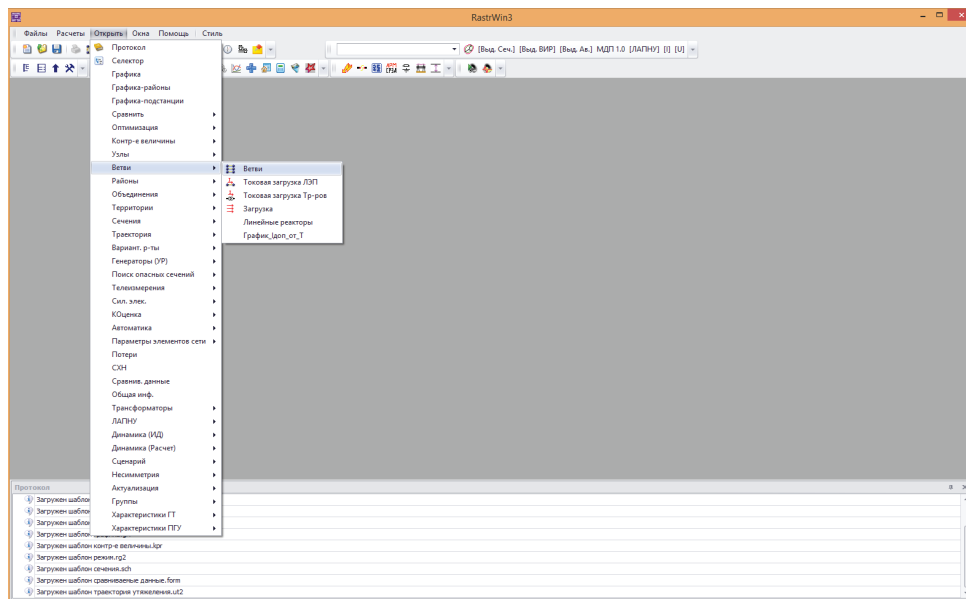


Рис. Б3. Доступ к форме **Ветви**

В результате выполнения команд должны открыться два окна (рис. Б4).

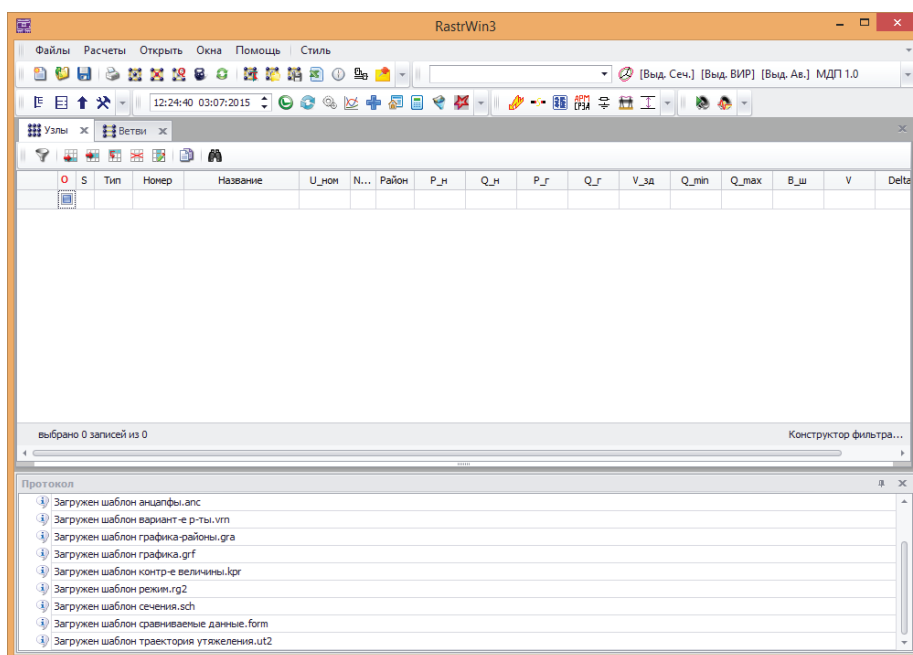


Рис. Б4. Результат открытия форм **Узлы** и **Ветви**

Рассмотрим ввод исходных данных схемы замещения на примере тестовой электрической сети (рис. Б5).

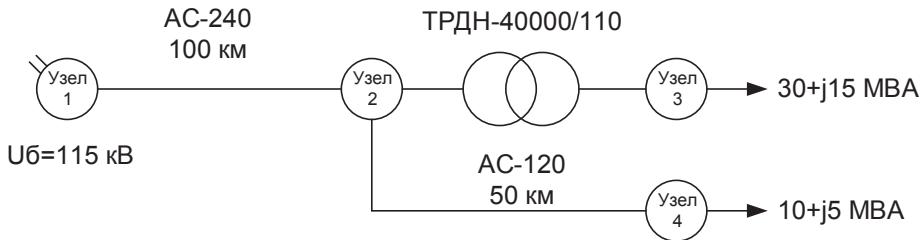


Рис. Б5. Тестовая схема электрической сети

Алгоритм подготовки и ввода данных для расчета УР:

- 1) расчет параметров схемы замещения электрической сети. Результаты расчета сведены в табл. Б1;
- 2) подготовка ПК RastrWin к работе — создание файлов по нужным шаблонам и открытие всех нужных форм. Для расчета УР создается файл по шаблону «режим.rg2»;
- 3) ввод исходных данных об узлах сети. Результат представлен на рис. Б6;
- 4) ввод данных о ветвях сети. Результат представлен на рис. Б7;
- 5) расчет параметров УР. Для запуска расчетных алгоритмов ПК RastrWin необходимо нажать кнопку **Режим** (или в выпадающем меню **Расчеты / Режим**). Формы **Узлы** и **Ветви** с выведенными на них результатами расчета представлены на рис. Б8 и Б9;
- 6) анализ полученных результатов расчета установившегося режима электрической сети.

Результаты расчетов ПК RastrWin заносит в те же формы, куда вносились исходные данные. Если необходим другой формат представления данных, надо открыть дополнительные окна, например **Узлы + Ветви (Открыть / Узлы / Узлы + Ветви)**.

Таблица Б1

Параметры ветвей для составления схемы замещения тестовой сети

Сетевой элемент	R , Ом	X , Ом	B , мкСм	$K_T/\text{г}$	ΔS_{xx} , МВ·А
1–2	12,0	40,5	–281	–	–
2–3	1,4	34,7	–	0,0913	$0,036 + j0,260$
2–4	12,5	21,4	–266	–	–

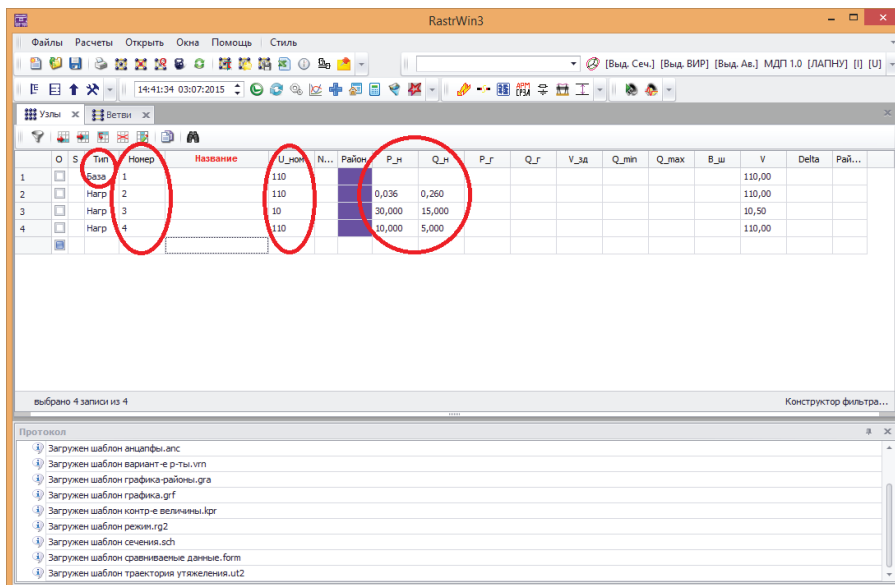


Рис. Б6. Форма **Узлы** после ввода исходных данных (красным цветом выделены области с введенной вручную информацией)

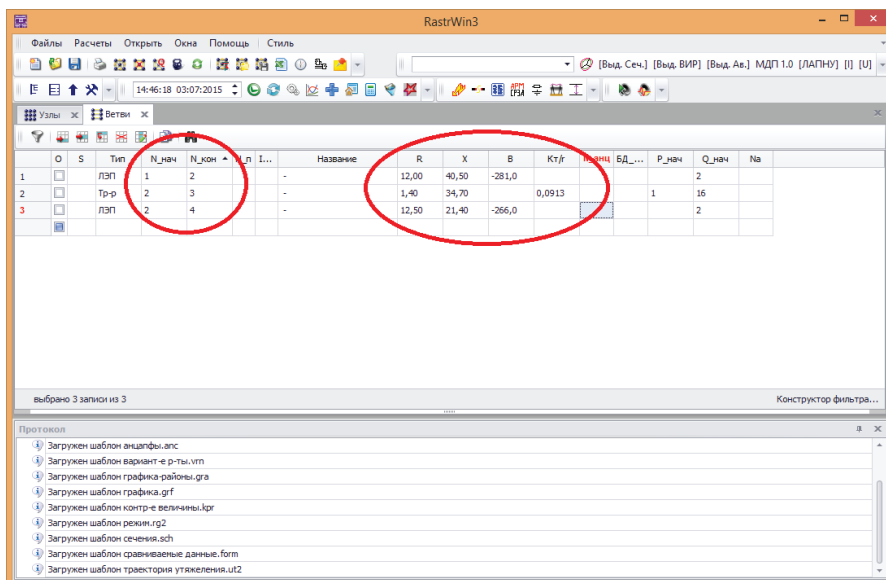


Рис. Б7. Форма **Ветви** после ввода исходных данных (красным цветом выделены области с введенной вручную информацией)

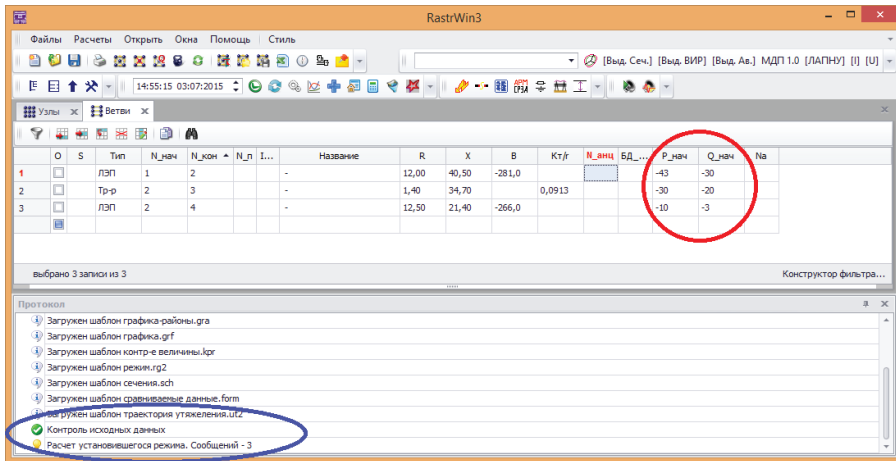


Рис. Б8. Форма **Ветви** с результатами расчетов УР (красным цветом выделены расчетные значения, синим цветом — сообщения в протоколе ПК RastrWin)

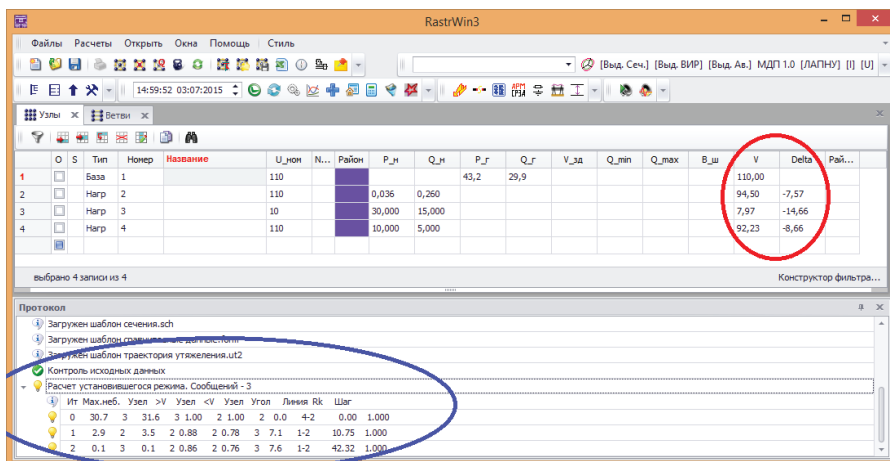


Рис. Б9. Форма **Узлы** с результатами расчетов (красным цветом выделены расчетные значения, синим цветом — сообщения в протоколе ПК RastrWin)

Добавление столбцов таблицы в форму

В случае необходимости, в формы **Узлы** и **Ветви** можно добавить столбцы.

Для добавления новых столбцов необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по строке заголовка формы (место показано стрел-

кой на рис. Б10) и в выпадающем меню выбрать пункт **Выбор колонок**. Откроется список столбцов таблицы, в котором можно найти нужный параметр. Добавление столбца в форму осуществляется по принципу «drag-and-drop» (зажать название столбца левой кнопкой мыши и перетащить его в форму (рис. Б11)).

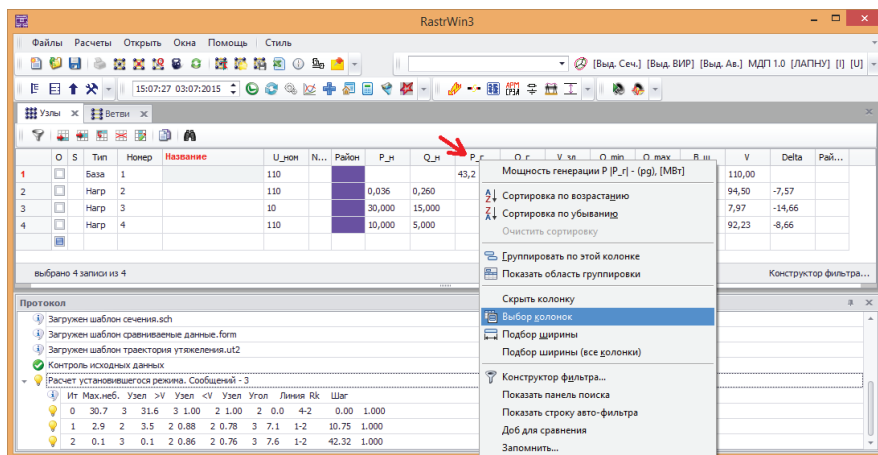


Рис. Б10. Вызов меню добавления столбцов в форму

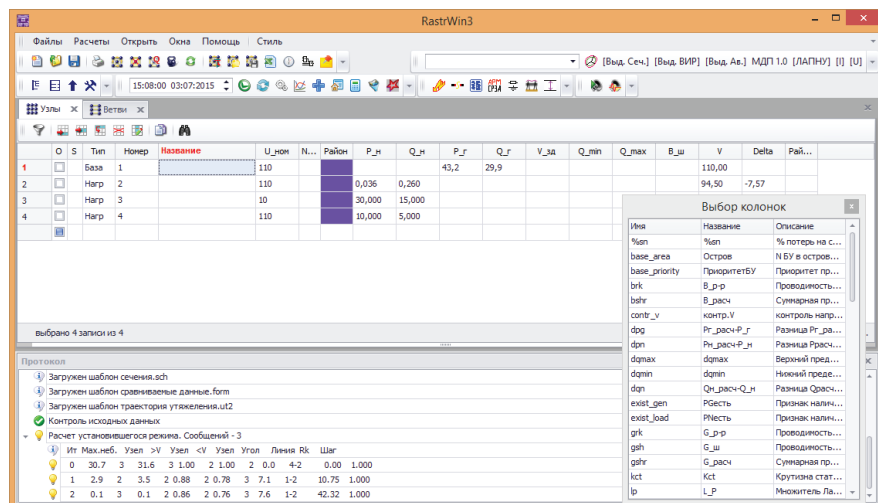


Рис. Б11. Меню выбора колонок таблицы для добавления в форму

Изменение настроек отображения данных в формах

В случае необходимости, можно изменять представление данных в формах ПК RstrWin. Для увеличения количества отображаемых знаков можно воспользоваться одним из следующих способов:

- 1) внести временную корректировку —
 - нажать правой кнопкой мыши на названии колонки формы, как показано стрелкой на рис. Б12;
 - в открывшемся меню выбрать первый пункт, в котором приведено краткое описание колонки;
 - в открывшемся окне отредактировать ширину колонки и точность отображения данных, как показано на рис. Б13.
- 2) Внести постоянную корректировку. Для этого необходимо исправить в шаблоне формы параметры отображения таблиц и форм.

Необходимо отметить, что увеличение или уменьшение количества отображаемых знаков значений параметров в форме не влияет на данные, которые хранятся в таблицах. Если число знаков после запятой в таблице больше, чем в форме, то программа округляет числа.

Если параметры отображения данных в формах изменять через настройки программы, то можно сразу отредактировать шаблоны на постоянной основе, а можно внести временные исправления.

Доступ к настройкам всех форм, таблиц и шаблонов осуществляется через пункт меню **Файлы / Настройки программы / Параметры**.

Коррекцию выравнивания данных (по левому или правому краю) в колонках формы можно выполнить через пункт меню **Настройка форм** в левой части окна **Параметры**, как показано на рис. Б14.

Для изменения ширины колонок необходимо редактировать настройки таблиц. Доступ к настройкам таблиц осуществляется через пункт меню **Данные / Таблицы** в левой части окна **Параметры**. В открывшемся перечне можно увидеть названия таблиц базы данных программы. Названия таблиц и форм не совпадают.

Рассмотрим пример коррекции ширины колонки и точности отображения для формы **Ветви**. Форма **Ветви** наследует свои настройки от таблицы «vetv». Пример окна для редактирования таблицы «vetv» представлен на рис. Б15. Для коррекции точности отображения данных в формах необходимо исправить поле **Точность** около названия соответствующей колонки. Для коррекции ширины колонки необходимо вносить исправления в поле **Ширина**.

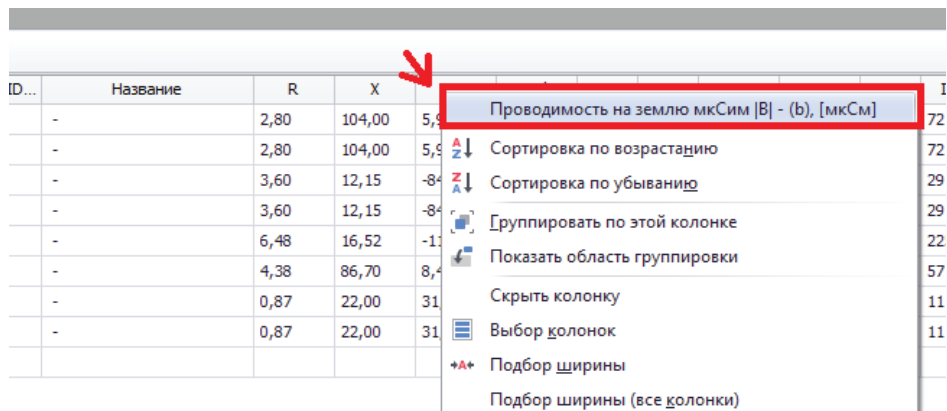


Рис. Б12. Пример окна с открытым меню для редактирования параметров колонки формы

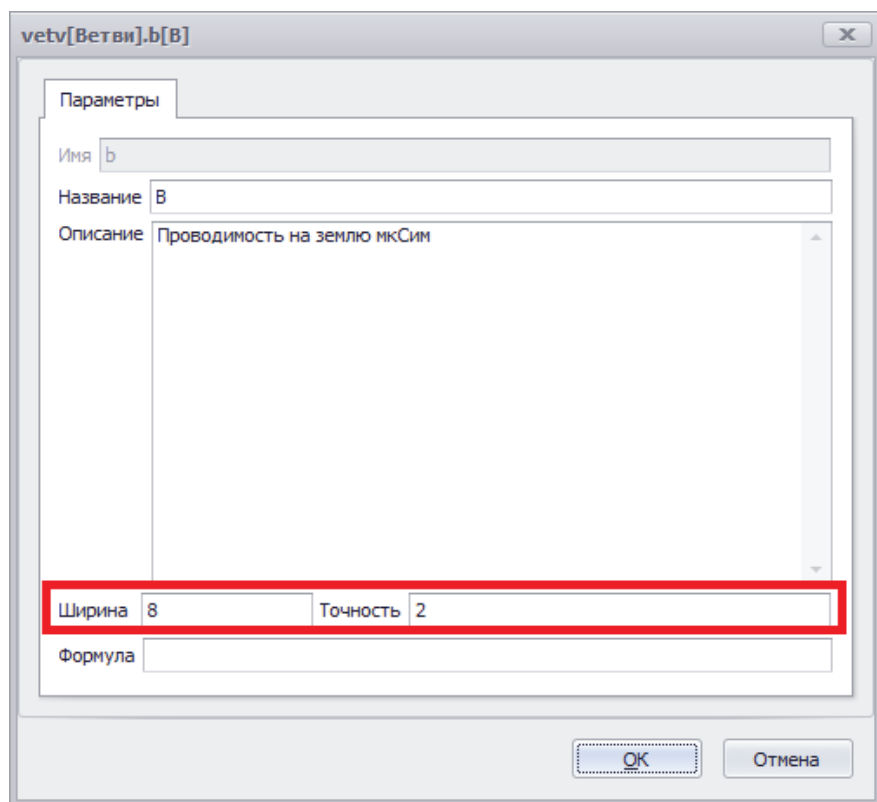


Рис. Б13. Пример окна, в котором можно отредактировать параметры отображения информации в колонке

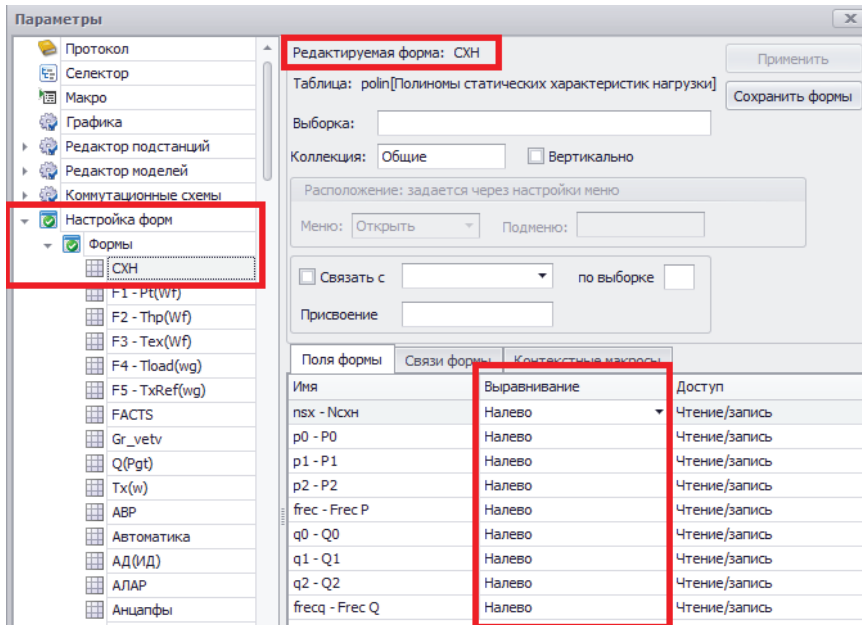


Рис. Б14. Пример окна редактирования параметров отображения формы СХН

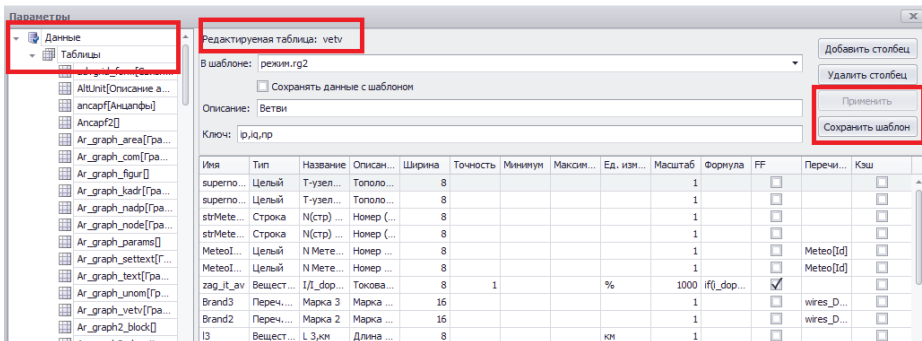


Рис. Б15. Пример окна редактирования параметров таблицы «vetv»

Сохранить все внесенные исправления можно одним из двух способов:

- 1) с помощью кнопки **Применить**, если требуются временные изменения во все вновь открываемые формы;
- 2) кнопки **Сохранить шаблон**. В этом случае исправления будут внесены в шаблон файла (название шаблона указано в окне) и будут применяться для всех вновь создаваемых или открываемых файлов по этому шаблону.

Лабораторная работа № 2.

Расчет установившегося режима радиальной электрической сети

Постановка задачи

Цель работы — расчет установившегося режима электрической сети по варианту домашнего задания.

Исходные данные — исходные данные своего варианта домашнего задания РГР «Расчет радиальной сети».

Задачи:

- 1) подготовить схему замещения электрической сети для расчета установившегося режима (УР);
- 2) выполнить расчет УР электрической сети для нормальной схемы;
- 3) выполнить расчет УР электрической сети при отключении различных элементов — одной линии электропередачи с самой высокой нагрузкой, одного понижающего трансформатора.

В отчете должно быть:

- 1) в графическом виде однолинейная схема исходной сети с нанесенными на нее результатами программного и ручного расчета УР (поток мощности в начале и конце ветвей, потери мощности в ветвях, модуль и угол напряжения во всех узлах, нагрузка и генерация). На схему должны быть добавлены условные обозначения для облегчения чтения результатов расчетов;
- 2) перечень узлов расчетной модели, которые моделируются в виде PQ-, PV- и Vδ-узлов;
- 3) результаты аналитической работы по сопоставлению результатов ручного расчета с результатами расчета ПК RastrWin;
- 4) ответ на вопрос, как взаимосвязаны модуль и угол напряжения с направлением потоков активной и реактивной мощности в сети.

Рекомендации к выполнению

Перед выполнением работы необходимы рассчитать параметры схемы замещения радиальной электрической сети. Важно отметить, что ис-

ходные данные вводятся в программу по отдельности по каждому элементу электрической сети. Не рекомендуется при выполнении расчетов в программе использовать эквивалентные ЛЭП и трансформаторы.

Для определения самой нагруженной ЛЭП необходимо открыть форму **Ветви** и найти самое большое значение тока в колонке **I max**. В данной колонке выводится наибольший из двух токов по ЛЭП (ток начала или ток конца), а для трансформатора выводится контролируемый ток. Место контроля тока трансформатора определяется в колонке **Место**. Программа автоматически отличает трансформатор от ЛЭП по наличию данных в колонке **Kt/r** (см. подгл. 4.4, «Трансформатор»).

Для того чтобы изменить состояние ветви (включена или отключена), есть переключатель в колонке **S** формы **Ветви**. Он может принимать одно из 4 значений:

- 1) ветвь включена. Нет картинки. Значение поля по умолчанию;
- 2) ветвь отключена с обоих концов. Картинка в виде красного креста;
- 3) ветвь отключена со стороны узла начала;
- 4) ветвь отключена со стороны узла конца.

Если просто нажать левой кнопкой мыши на ячейку колонки **S**, то ветвь будет полностью отключаться или включаться. Если необходимо смоделировать одностороннее отключение ветви, то надо открыть выпадающий список (нажать на стрелку в ячейке колонки **S**) и выбрать, со стороны какого узла отключать ветвь. Для моделирования одностороннего отключения ветви программа создает еще один дополнительный узел, на который временно переводится ветвь. Данный узел не отображается в таблице «Узлы» и не влияет на структуру введенных данных. После завершения расчетов временный узел удаляется.

По умолчанию в форме **Ветви** не представлены все необходимые колонки с результатами расчетов параметров УР. Недостающие колонки необходимо вручную добавить в форму.

Теория и примеры

Рекомендации к вопросу о нумерации узлов

Для нумерации узлов можно использовать два подхода:

- 1) нумеровать по порядку или в виде случайных натуральных чисел;
- 2) кодировать в номерах информацию о принадлежности узла.

Первый способ наиболее простой и хорошо подходит для небольших расчетных моделей. По своей сути это ручная версия алгоритма системы управления базой данных по созданию числовых ключевых полей таблиц. Главное, чтобы выбранный номер узла был уникальным в данной расчетной модели. Выбирать номера можно достаточно просто: по порядку, начиная с единицы, или случайное свободное число в разрешенном диапазоне. Если выбран второй подход, то в номере узла кодируется информация о его принадлежности. Например, можно закодировать класс напряжения, подстанцию и некоторую уникальную добавку. Такой номер может иметь следующую структуру:

$$XX.YY.ZZ$$

где XX — номер подстанции в схеме; YY — номер класса напряжения; ZZ — порядковый номер узла на классе напряжения YY для подстанции XX .

Второй подход позволяет несколько снизить трудоемкость навигации по большим расчетным моделям и уменьшить количество ошибок при вводе данных схемы замещения. Также рекомендуется при кодировании информации четные номера присваивать элементам электрической сети с четными диспетчерскими номерами, а нечетные — нечетным.

Многоконцевые ЛЭП можно представлять как отдельную ПС со своим уникальным номером. В этом случае отпаечные опоры одной ЛЭП будут иметь свой диапазон номеров.

Пример расчета режима радиальной электрической сети

Рассмотрим пример расчета УР радиальной сети, в которой содержатся только нагрузочные узлы. Схема сети представлена на рис. Б16.

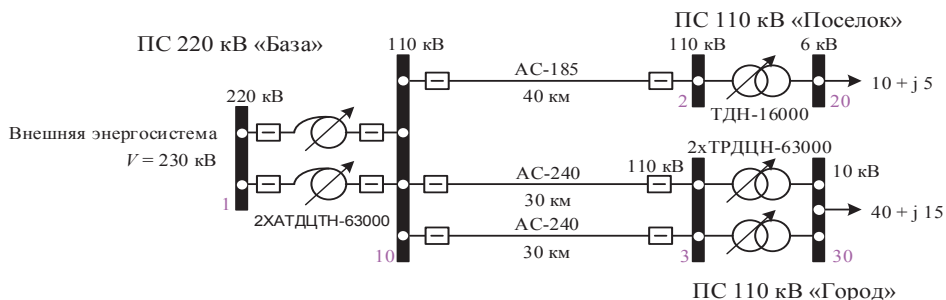


Рис. Б16. Схема тестовой радиальной электрической сети

Формы «Узлы» и «Ветви» с данными схемы замещения представлены на рис. Б18 и Б19. Поскольку схема электрической сети содержит небольшое количество узлов и ПС, то нумерация узлов выполнена упрощенно. Первая цифра номера — это номер ПС, а наличие нуля справа обозначает шины низкого напряжения данной ПС.

При составлении схемы замещения электрической сети не учитывались выключатели, установленные по концам линий электропередач и трансформаторов. Распределительные устройства высшего и низшего напряжения представлены в виде единой шины. Каждая единая шина представлена в схеме замещения одним узлом.

Трансформаторы в расчетной модели представлены в виде схемы замещения с шунтом. Параметры схемы замещения (продольные сопротивления и поперечные шунты) приведены к классу напряжения узла начала, то есть узла высшего напряжения.

Наибольший интерес представляет схема замещения автотрансформатора, которая представлена в расчетной модели на рис. Б19. Автотрансформаторы на ПС 220 кВ база имеют третичную обмотку низшего напряжения. По причине того, что на данной обмотке отсутствует какая-либо нагрузка, она фактически находится на холостом ходу и может быть исключена из расчетной модели. Оставшиеся две обмотки были эквивалентированы в одну для получения более простой схемы замещения. Результирующая схема замещения представлена на рис. Б17.

Результаты расчета УР представлены на рис. Б20 и Б21 (обведены рамкой). При этом в окне «Протокол» отсутствуют сигналы об аварийном завершении расчетов.

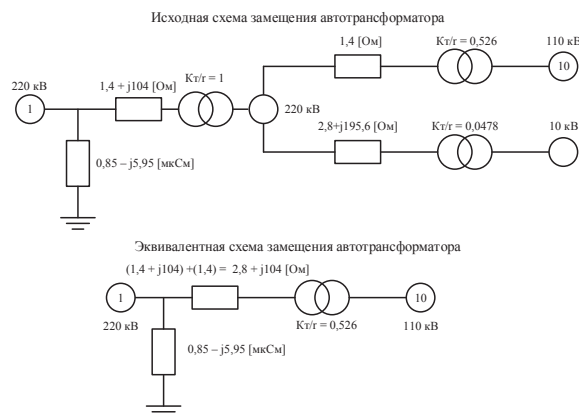


Рис. Б17. Эквивалентирование автотрансформатора с обмоткой низшего напряжения на холостом ходу

Узлы								
	S	Тип	Номер	U_ном	P_н	Q_н	P_г	Q_г
1		База	1	230				
2		Нагр	10	110				
3		Нагр	2	110				
4		Нагр	20	6	10,0	5,0		
5		Нагр	3	110				
6		Нагр	30	10	40,0	15,0		

Рис. Б18. Заполненная форма **Узлы**
для тестовой радиальной сети

Ветви										
	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	R	X	G	B	Kv/r
1		Тр-р	1	10	1	2,80	104,00	0,85	5,95	0,526
2		Тр-р	1	10	2	2,80	104,00	0,85	5,95	0,526
3		ЛЭП	10	2	1	3,60	12,15		-84,30	
4		ЛЭП	10	2	2	3,60	12,15		-84,30	
5		ЛЭП	10	3	1	6,48	16,52		-110,00	
6		Тр-р	2	20	1	4,38	86,70	1,44	8,47	0,057
7		Тр-р	3	30	1	0,87	22,00	4,46	31,00	0,091
8		Тр-р	3	30	2	0,87	22,00	4,46	31,00	0,091

Рис. Б19. Заполненная форма **Ветви**
для тестовой радиальной сети

Узлы													
	S	Тип	Номер	U_ном	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	
1		База	1	230									230,00
2		Нагр	10	110									118,12
3		Нагр	2	110									117,72
4		Нагр	20	6	10,0	5,0							6,40
5		Нагр	3	110									113,30
6		Нагр	30	10	40,0	15,0							10,19

Рис. Б20. Форма **Узлы** с результатами расчета УР
для тестовой радиальной сети

Ветви																
	S	Тип	N_нач	N_кон	N_г	P_нач	Q_нач	P_кон	Q_кон	dP	dQ	P_ш	Q_ш	I_нач	I_кон	I_max
1		Тр-р	1	10	1	-26	-12	-26	-10	0,043	1,608	0,045	0,31	72	136	72
2		Тр-р	1	10	2	-26	-12	-26	-10	0,043	1,608	0,045	0,31	72	136	72
3		ЛЭП	10	2	1	-5	-2	-5	-3	0,008	0,027		-1,17	26	29	29
4		ЛЭП	10	2	2	-5	-2	-5	-3	0,008	0,027		-1,17	26	29	29
5		ЛЭП	10	3	1	-42	-18	-41	-17	0,969	2,471		-1,47	222	225	225
6		Тр-р	2	20	1	-10	-6	-10	-5	0,042	0,841	0,020	0,12	57	1 006	57
7		Тр-р	3	30	1	-20	-9	-20	-7	0,032	0,804	0,057	0,40	111	1 209	111
8		Тр-р	3	30	2	-20	-9	-20	-7	0,032	0,804	0,057	0,40	111	1 209	111

Рис. Б21. Форма **Ветви** с результатами расчета УР
для тестовой радиальной сети

Лабораторная работа № 3.

Расчет потерь энергии в радиальной сети

Постановка задачи

Цель работы — расчет потерь электрической энергии за сутки в электрической сети с помощью ПК RastrWin.

Исходные данные — исходные данные своего варианта домашнего задания РГР «Расчет радиальной сети».

Для успешного выполнения работы необходимо вручную выполнить приближенный расчет потерь электрической энергии с учетом часов максимальных потерь (приближенная оценка потерь электрической энергии).

Задачи:

- 1) подготовить суточный график нагрузки (в мощностях);
- 2) выполнить расчет серии УР электрической сети согласно графику нагрузки. После каждого расчета зафиксировать значения потерь мощности;
- 3) выполнить расчет потерь электрической энергии за сутки;
- 4) с помощью приближенного метода сопоставить результаты расчета потерь электрической энергии с результатами расчета по графику нагрузки.

В отчете должно быть:

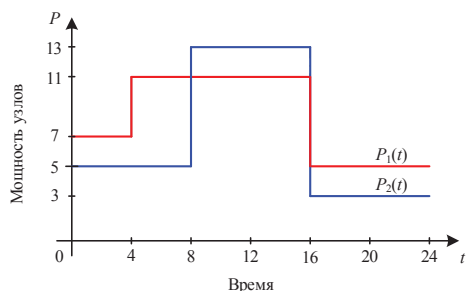
- 1) в графическом виде —
 - однолинейная схема исходной сети с нанесенными на нее результатами расчета УР (потоки мощностей по ветвям, потери мощности в ветвях, напряжение во всех узлах, величины нагрузки и генерации);
 - суточный график электрической нагрузки;
 - суточный график суммарных потерь мощности в сети;
- 2) расчет суммарных потерь энергии и мощности в сети;
- 3) итоги аналитической работы по сопоставлению результатов приближенной оценки потерь электрической энергии с результатами расчета на основе графика нагрузки.

Рекомендации к выполнению

Для расчета потерь мощности и энергии за сутки рекомендуется придерживаться алгоритма выполнения серии расчетов УР электрической сети:

- 1) подготовить график нагрузки в виде таблицы соответствия мощности нагрузки (в именованных единицах) расчетному интервалу времени;
- 2) внести данные по нагрузкам для первого интервала постоянства мощности и рассчитать установившийся режим. Пример оценки интервалов постоянства мощности на некотором сетевом элементе представлен на рис. Б22;
- 3) записать на листе бумаги или в табличном редакторе расчетные значения постоянных и переменных потерь активной и реактивной мощности в каждой ветви электрической сети, полученные после расчета УР;
- 4) повторить этапы 2 и 3, пока не закончатся интервалы постоянства мощности;
- 5) выполнить расчет потерь электрической энергии.

а



б

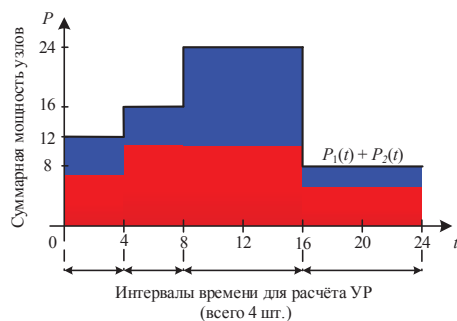


Рис. Б22. Пример выделения участков постоянства мощности нагрузки в сети на некотором сетевом элементе в зависимости от нагрузки двух близлежащих узлов:

а — суточные графики нагрузки двух узлов;

б — суммарный суточный график нагрузки

При изменяющейся нагрузке в узлах электрической сети необходимо оценивать потери для каждого участка суммарного графика на-

грузки, на котором суммарная нагрузка постоянна. При большом количестве нагрузочных и генераторных узлов в расчетной модели проще всего рассчитывать УР с определенным шагом по времени, например полчаса. При получасовом шаге выполнения расчетов, для оценки потерь электроэнергии за сутки, необходимо посчитать 48 УР.

В качестве средства визуализации графика нагрузки можно использовать какой-либо из табличных редакторов, например MS Excel или OpenOffice Calc.

Лабораторная работа № 4.

Расчет графика регулирования отпаяк РПН понижающих трансформаторов

Постановка задачи

Цель работы — расчет графика переключения отпаяк РПН понижающих трансформаторов в соответствии с графиком нагрузок.

Исходные данные — исходные данные своего варианта домашнего задания РГР «Расчет радиальной сети».

В качестве требуемого уровня напряжения на шинах нагрузки принять значение на 5 % больше, чем класс напряжения, $V_{\text{тр}} = 1,05 V_{\text{ном}}$. На шинах генератора в качестве требуемого уровня напряжения необходимо принять его номинальное напряжение.

Задачи:

- 1) для каждого участка постоянства мощности суммарного графика потребления электрической сети выбрать отпайку РПН понижающего трансформатора, обеспечивающую требуемый уровень напряжения —
 - в нормальных схемах на шинах нагрузки отклонение напряжения от требуемого не должно превышать 5 %;
 - во всех схемах модуль напряжения на шинах генераторов должен быть равен номиналу генератора;
- 2) в нормальных схемах уровень напряжения на шинах высшего напряжения должен быть не ниже класса напряжения и не выше предела по изоляционной стойкости;
- 3) сформировать график изменения номера отпайки РПН от времени.

В отчете должно быть:

- 1) в графическом виде однолинейная схема исходной сети с нанесенными на нее результатами расчета УР (поток мощности по ветвям, потери мощности в ветвях, напряжение во всех узлах, нагрузка и генерация);
- 2) график нагрузки каждого узла и суммарный график электропотребления в виде рисунка;
- 3) подробные расчеты рациональных отпаяк РПН;

- 4) расчетные напряжения на шинах потребителей до выбора рациональной отпайки и после;
- 5) выбранные отпайки РПН понижающих трансформаторов в виде графика, на котором изображена зависимость номера отпайки РПН от времени. На том же графике представить зависимость нагрузки от времени.

Рекомендации к выполнению

Для каждого интервала времени постоянства суммарной мощности электропотребления необходимо составить отдельную расчетную модель и сохранить ее на диске.

По причине того, что в схемах с несколькими классами напряжения на величину напряжения на шинах нагрузки может влиять сразу несколько средств регулирования, может возникнуть итерационный процесс регулирования напряжения. Например, понадобится несколько итераций регулирования напряжения, если сначала выполнить подгонку напряжения на шинах нагрузки под требуемый уровень, а потом — в питающей электрической сети более высокого класса напряжения. Причина возникновения итерационного процесса кроется в том, что на уровень напряжения на шинах нагрузки или генератора могут оказывать влияние как средства регулирования, установленные на своей ПС, так и средства регулирования соседних ПС.

Наибольшее влияние на уровни напряжения во всей сети оказывают положения отпайек РПН на ПС с самым высоким классом напряжения (в исследуемом фрагменте электрической сети) и положения ПБВ (редко РПН) на генераторных трансформаторах. По этой причине регулирование напряжения в электрической сети лучше всего начинать от центров питания шин генераторов и базового узла, что позволит уменьшить количество итераций регулирования напряжения в схеме (вплоть до 1).

Основным критерием, который указывает на необходимость регулирования напряжения в центрах питания, является пониженный уровень напряжения в высоковольтной питающей электрической сети. В общем случае напряжение в ней должно быть выше класса напряжения и ниже максимально допустимого напряжения по стойкости изоляции оборудования и проводников.

При выполнении расчетов прогнозных УР с большим горизонтом планирования рекомендуется на шинах генераторов поддерживать

номинальное напряжение. Это даст некоторый регулировочный запас на генераторах для эксплуатационного персонала при наступлении расчетных условий данного режима в будущем.

Для расчета коэффициента трансформации с учетом РПН (ПБВ) есть несколько способов:

- 1) ручной расчет коэффициента трансформации и внесение его в форму **Ветви**;
- 2) автоматический расчет коэффициента трансформации по заданному закону регулирования.

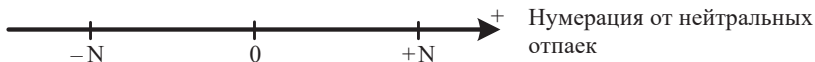
Теория и примеры

Способы нумерации отпаяк

Существует два основных способа нумерации отпаяк трансформаторов. Условно назовем их:

- 1) математическим (целые числа и нуль, рис. Б23, а);
- 2) эксплуатационным (натуральные числа, рис. Б23, б).

а



б

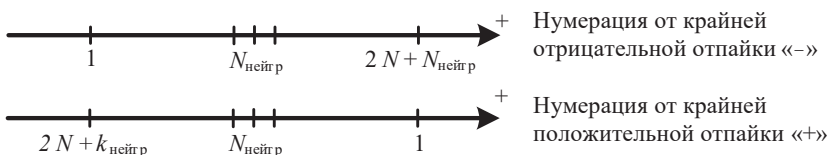


Рис. Б23. Математический (а) и эксплуатационный (б) способ нумерации отпаяк трансформатора:

N — число отпаяк в одну сторону регулирования;

$N_{\text{нейтр}}$ — число отпаяк в нейтральном выводе РПН (ПБВ)

Математический способ нумерации отпаяк хорошо использовать при выполнении расчетов коэффициентов трансформации. Такая нумерация позволяет автоматически учитывать положительную или отрицательную накопленную прибавку отпайки к коэффициенту трансформации нейтрального вывода РПН или ПБВ (под нейтральной понимается отпай-

ка, при которой коэффициент трансформации строго равен отношению номинальных напряжений трансформатора). Нейтральная отпайка всегда имеет номер нуль, вне зависимости от их фактического количества.

Эксплуатационный способ нумерации направлен на повышение удобства эксплуатации оборудования. Нумерация отпаяк выполняется с помощью только натуральных чисел, начиная с единицы. Нумерацию обычно выполняют от крайней отрицательной или крайней положительной отпайки.

Расчет отпаяк в табличном редакторе

Ручной расчет коэффициента трансформации наиболее удобно проводить в табличном редакторе. В примере табл. Б2 рассмотрен трансформатор с устройством РПН в обмотке высшего напряжения, имеющим разную цену отпаяк. Для нумерации отпаяк использован математический способ. Коэффициент трансформации рассчитан следующим образом:

$$\begin{aligned} k_i &= U_{\text{нн}} / (U_{\text{вн}} + s_i); \\ k_{\text{нейтр}} &= U_{\text{нн}} / U_{\text{вн}}; \\ s_{+i} &= s_{+i-1} + c_{+i}; \\ s_{-i} &= s_{-i+1} + c_{+i}; \\ s_i &= s_{-i} \cup \{0\} \cup s_{+i}, \end{aligned}$$

где k_i — коэффициент трансформации отпайки с номером i , о. е.; $U_{\text{нн}}$ — низшее номинальное напряжение, кВ; $U_{\text{вн}}$ — высшее номинальное напряжение, кВ; s_i — накопленная сумма отпаяк от нейтрали, кВ; $k_{\text{нейтр}}$ — коэффициент трансформации нейтральной отпайки с нулевым номером; s_{+i} — накопленная сумма отпаяк с положительными номерами, кВ; s_{-i} — накопленная сумма отпаяк с отрицательными номерами, кВ; i — текущий номер отпайки, $i = (-i \cup \{0\} \cup +i)$; $+i$ — множество отпаяк с положительными номерами, $+i \in \{+1, +2, \dots, +8\}$; $-i$ — множество отпаяк с отрицательными номерами $-i \in \{-1, \dots, -8\}$.

Расчет отпаяк с помощью ПК RastrWin

В ПК RastrWin есть возможность рассчитывать коэффициент трансформации по заданному номеру отпайки. Для этого необходимо задавать через форму **Анцапфы** зависимость коэффициента трансформации от номера отпайки. Доступ к форме **Анцапфы** можно получить через пункт меню **Открыть / Трансформаторы / Анцапфы**.

Таблица Б2

**Пример таблицы с расчетом коэффициентов трансформации
для двухобмоточного трансформатора**

Высшее номинальное напряжения, кВ				115
Низшее номинальное напряжение, кВ				10,5
Один процент от высшего номинального, кВ				1,78
Расчет коэффициента трансформации				
Номер отпайки	Цена отпайки		Сумма отпаяк от нейтрали, кВ	Коэффициент трансформации, о. е.
	%	кВ		
−8	2,5	2,875	−18,86	0,10921573
−7	2,5	2,875	−15,985	0,10604454
−6	2,5	2,875	−13,11	0,10305231
−5	1,78	2,047	−10,235	0,10022431
−4	1,78	2,047	−8,188	0,09830356
−3	1,78	2,047	−6,141	0,09645505
−2	1,78	2,047	−4,094	0,09467477
−1	1,78	2,047	−2,047	0,09295902
0	0	0	0	0,09130435
+1	1,78	2,047	2,047	0,08970755
+2	1,78	2,047	4,094	0,08816565
+3	1,78	2,047	6,141	0,08667586
+4	1,78	2,047	8,188	0,08523557
+5	1,78	2,047	10,235	0,08384238
+6	2,5	2,875	13,11	0,08196081
+7	2,5	2,875	15,985	0,08016185
+8	2,5	2,875	18,86	0,07844016

Важно отметить, что данные по зависимости коэффициента трансформации от номера отпаяк сохраняются по отдельному шаблону «анцапфы.анс». Следовательно, перед вводом каких-либо данных необходимо сначала создать таблицы по шаблону «анцапфы.анс» через пункт меню **Файлы / Новый**. В открывшемся окне найти и отметить шаблон «анцапфы.анс».

Введенные данные сохраняются в отдельном файле с расширением «.anc». Для сохранения на диске файла с данными необходимо нажать **Файлы / Сохранить как...** В открывшемся окне необходимо найти и выбрать тип файла «анцапфы.anc».

Форма **Анцапфы** имеет следующие колонки (более подробно см. в руководстве пользователя):

- 1) **N_bd** — уникальный ключ для связи с другими таблицами. В данной колонке необходимо указать уникальное натуральное число, которое будет ключом для связи с другими таблицами.
- 2) **Названия** — строковое название зависимости коэффициента трансформации от номера отпайки. Рекомендуется указывать марку трансформатора и сторону (для многообмоточных трансформаторов), чтобы упростить дальнейшее использование данных.
- 3) **ЕИ** — единицы измерения цены деления одной отпайки. Значение указывается в колонках **Шаг**.
- 4) **+/-** — направление нумерации отпаек. При задании номера отпайки через форму **Ветви** используется эксплуатационный способ нумерации. Знак плюс или минус в колонке указывает, где находится отпайка с первым номером (крайняя отрицательная или крайняя положительная соответственно), другим словами, указывается порядок нумерации: «+» — от крайней отрицательной к крайней положительной отпайке, «-» — наоборот.
- 5) **Тип** — перечисляемый тип данных. Указывается тип устройства, на котором планируется моделировать переключение отпаек.
- 6) **Место** — перечисляемый тип данных. Указывается место установки устройства для переключения отпаек.
- 7) **Кнейтр** — количество отпаек в нейтральном положении (коэффициент трансформации равен отношению номинальных напряжений). Может принимать значения только в виде натуральных чисел. Для большинства трансформаторов значение равно единице.
- 8) **V_нр** — номинальное напряжение нерегулируемой стороны (кВ).
- 9) **V_рег** — номинальное напряжение регулируемой стороны (кВ). К данному напряжению будет осуществляться прибавка отпаяк.
- 10) **N_anc** — множество колонок, в которых указывается количество отпаек с заданным шагом регулирования из колонок «Шаг». Перечисление начинается с крайне отрицательной отпайки.

- 11) **Шаг** — множество колонок, в которых указывается цена деления единичной отпайки. Количество отпайек с данной ценой деления принимается согласно соответствующей колонке «N_anc». Единицы измерения стоимости одной отпайки принимаются согласно значению из колонки «ЕИ».

Если возникла путаница, какая колонка «Шаг» относится к какой колонке «N_anc», можно посмотреть их наименования по таблице «ансапф». Для того чтобы из текущей формы узнать наименование колонки в таблице, необходимо нажать правой кнопкой мыши на название колонки в форме. В первой строке открывшегося меню будет строка следующего вида: «Полное название колонки формы | краткое название колонки формы | — (название колонки в таблице)». В правой части табличного наименования колонки будет стоять целое число от 1 до 10. Колонки «N_anc» и «Шаг» с одинаковым номером будут соответствовать друг другу. Заполнение необходимо начинать с колонок с номером 1. По умолчанию в форме «Анцапфы» первым колонкам будут соответствовать самые левые колонки «N_anc» и «Шаг».

Рассмотрим пример заполнения формы «Анцапфы» данными по РПН двухобмоточного трансформатора из предыдущего раздела. Результаты заполнения представлены на рис. Б24.

	N_bd	Названия	ЕИ	+/-	Тип	Место	Кнейт	V_нр	V_пер	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг	N_анц	Шаг
1	1	Тип Тр	%	-	РПН	ВН	1	10,5	115,0	3	-2,500	5	-1,780	5	1,780	3	2,500

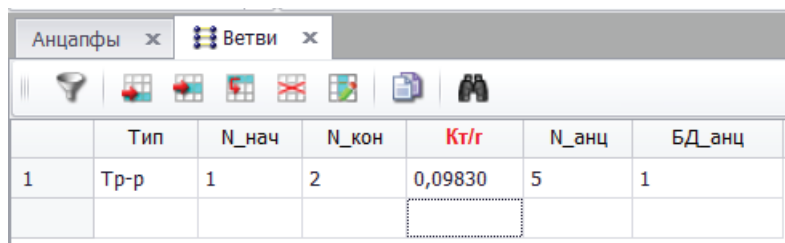
Рис. Б24. Пример заполнения формы **Анцапфы**

В рассмотренном примере РПН двухобмоточного трансформатора имеет разную цену деления отпайек в зависимости от удаления от нейтрального положения. Первые колонки «N_anc» и «Шаг» должны соответствовать крайним отрицательным отпайкам (наибольший коэффициент трансформации при делении низшего напряжения на высшее) вне зависимости от того, как задан порядок нумерации отпайек в колонке «+/-». Для отпайек с отрицательной добавкой необходимо явно указывать знак минус в колонках «Шаг».

Связь между формами «Ветви» и «Анцапфы» осуществляется через ключевые поля «БД_анц» и «N_bd» соответственно. Тип связи между таблицами — «один ко многим», который означает, что одной зависимости коэффициента трансформации от номера отпайки формы

«Анцапфы» может быть поставлено в соответствие несколько записей в форме «Ветви».

Связь между формами «Ветви» и «Анцапфы» выполняется путем указания значения ключа «N_bd» из формы «Анцапфы» в ключевом поле «БД_анц» формы «Ветви». В этом случае, если указать в колонке **N_анц** эксплуатационный номер отпайки, программа выполнит расчет коэффициента трансформации, рис. Б25.



	Тип	N_нач	N_кон	Кт/г	N_анц	БД_анц
1	Тр-р	1	2	0,09830	5	1

Рис. Б25. Пример связи записи формы **Ветви** с записью в форме **Анцапфы**

В колонке **N_анц** формы **Ветви** указывается эксплуатационный номер отпайки. В данном примере эксплуатационная нумерация выполнена с увеличением номеров от крайней отрицательной до крайней положительной отпайки. Эксплуатационный номер «5» соответствует «-4» отпайке при математической нумерации, приведенной в табл. Б2.

Как видно из рис. Б25, значение коэффициента трансформации, рассчитанное программой, совпадает со значением, полученным в результате ручного расчета с использованием номинальных напряжений обмоток трансформатора. Следовательно, зависимость коэффициента трансформации от номера отпайки в форме «Анцапфы» задана верно.

Лабораторная работа № 5.

Расчет кольцевой электрической сети

Постановка задачи

Цель работы — расчет установившегося режима кольцевой электрической сети по варианту домашнего задания.

Исходные данные — исходные данные своего варианта домашнего задания РГР «Расчет кольцевой электрической сети».

Задачи:

- 1) подготовить схему замещения сети в формате ПК RastrWin;
- 2) выполнить расчет установившегося режима кольцевой электрической сети, представляя узел с генератором в виде PQ-узла;
- 3) сопоставить результаты ручного расчета с результатами расчета с помощью ПК RastrWin;
- 4) представить узел с генератором в виде PV-узла и рассчитать УР;
- 5) выполнить анализ уровней напряжения и направлений потоков мощностей при условии представления генераторного узла в виде PV-узла;
- 6) рассчитать УР электрической сети при поочередном отключении одного элемента — самой нагруженной ЛЭП, автотрансформатора связи. Наиболее нагруженную ЛЭП определять по уровню токовой загрузки. Генераторный узел представить в виде PV-узла.

В отчете должно быть:

- 1) однолинейная схема замещения электрической сети с нанесенными на нее результатами ручного и программного расчета УР (потоки мощности в начале и конце ветвей; потери мощности в ветвях; модуль и угол напряжения во всех узлах; величины нагрузок и генерации; расчетные значения сопротивлений, проводимостей шунтов и коэффициентов трансформации). Добавить условные обозначения для облегчения чтения результатов расчетов;
- 2) исходные данные по узлам и ветвям из форм **Узлы** и **Ветви** для проверки корректности расчетной модели. Лучше всего, если это будет снимок части экрана с формами **Узлы** и **Ветви**;

- 3) расчеты параметров модели генератора, необходимые для моделирования его в виде PV-узла, на основе справочных данных;
- 4) итог аналитической работы по сопоставлению результатов ручного расчета с результатами расчета ПК RastrWin;
- 5) ответ на вопрос, чем обусловлено отличие результатов ручного расчета УР от результатов расчета УР, полученных с помощью ПК RastrWin.

Рекомендации к выполнению

Ввод данных кольцевой электрической сети выполняется аналогично вводу данных радиальной сети.

В рамках данной работы предполагается, что генератор задается в расчетной модели без учета его PQ-диаграммы. Регулировочный диапазон по реактивной мощности можно задать упрощенно из расчета, что максимум реактивной мощности соответствует номинальному коэффициенту мощности генератора. Минимум по реактивной мощности равен примерно -10% от максимума реактивной мощности. Генератор на своих шинах должен поддерживать свое номинальное напряжение.

При отключении автотрансформатора следует обратить внимание на то, что должны отключаться все его обмотки.

Теория и примеры

Рассмотрим пример расчета простой кольцевой электрической сети с электростанцией. Схема сети представлена на рис. Б26. Все распределительные устройства высшего и низшего напряжения представлены в виде единой шины. В качестве узлов расчетной модели приняты единые шины ПС. Шины генераторов на ПС 110 кВ «Станция» заданы в виде отдельных узлов.

Номер узла расчетной модели состоит из трех цифр:

- 1) первая цифра — это номер ПС:
 - «1» — ПС 220 кВ «База»;
 - «2» — ПС 110 кВ «Завод»;
 - «3» — ПС 110 кВ «Город»;

- «4» — ПС 110 кВ «Станция».
- 2) Вторая цифра — это номер класса напряжения:
- «0» — 220 кВ;
 - «1» — 110 кВ;
 - «2» — 10 кВ.
- 3) Третья цифра — это порядковый номер узла для данной ПС на данном классе напряжения.

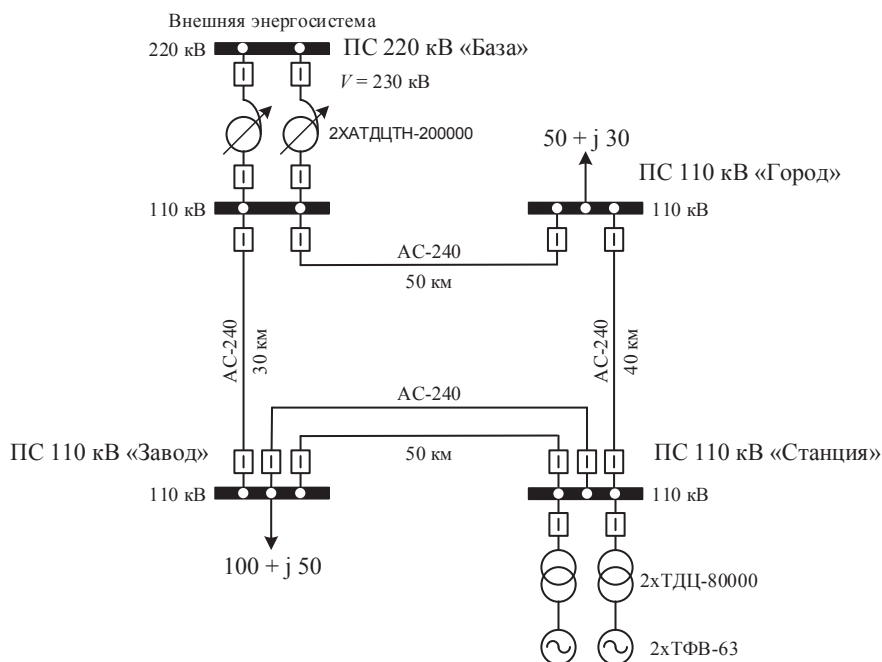


Рис. Б26. Тестовая схема
для простой кольцевой сети

В качестве нижней границы регулирования реактивной мощности генераторов принято значение $-4,7$ Мвар. Оно является допущением и не входит в справочные данные по генератору.

Проводимости шунтов трансформаторов вычислены на основе справочных данных по мощности потерь холостого хода трансформаторов. Автотрансформаторы на ПС 220 кВ «База» эквивалентированы до одной ветви, как показано на рис. Б17.

Формы Узлы и Ветви с параметрами схемы замещения представлены на рис. Б27 и Б28. Результаты расчета УР приведены на рис. Б29 и Б30.

Узлы

	S	Тип	Номер	Название	U_ном	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max
1		База	101	Внешняя ЭС 220 кВ	220			27,3	58,3	230,0		
2		Нагр	111	Внешняя ЭС 110 кВ	110							
3		Нагр	211	ПС 110 кВ Завод	110	100,0	50,0					
4		Нагр	311	ПС 110 кВ Город	110	50,0	30,0					
5		Нагр	411	ПС 110 кВ Станция 110 кВ	110							
6		Ген	421	ПС 110 кВ Станция ТГ-1	11			63,0	18,6	10,5	-4,7	47,0
7		Ген	422	ПС 110 кВ Станция ТГ-2	11			63,0	18,6	10,5	-4,7	47,0

Рис. Б27. Данные по узлам для тестовой кольцевой сети

Узлы											
Ветви											
	S	Тип	N_нач	N_кон	N_л	Название	R	X	G	B	Кт/л
1		ЛЭП	111	211	1	Внешняя ЭС 110 кВ - ПС 110 кВ Завод	3,60	12,15		-84,3	
2		ЛЭП	111	311	1	Внешняя ЭС 110 кВ - ПС 110 кВ Город	6,00	20,25		-140,5	
3		ЛЭП	311	411	1	ПС 110 кВ Город - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	4,80	16,20		-112,5	
4		ЛЭП	211	411	1	ПС 110 кВ Завод - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	6,00	20,25		-140,5	
5		ЛЭП	211	411	2	ПС 110 кВ Завод - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	6,00	20,25		-140,5	
6		Тр-р	101	111	1	Внешняя ЭС 220 кВ - Внешняя ЭС 110 кВ	0,60	30,40	2,4	18,9	0,526
7		Тр-р	101	111	2	Внешняя ЭС 220 кВ - Внешняя ЭС 110 кВ	0,60	30,40	2,4	18,9	0,526
8		Тр-р	411	421	1	ПС 110 кВ Станция 110 кВ - ПС 110 кВ Станция ТГ-1	0,71	19,20	5,3	36,3	0,087
9		Тр-р	411	422	2	ПС 110 кВ Станция 110 кВ - ПС 110 кВ Станция ТГ-2	0,71	19,20	5,3	36,3	0,087

Рис. Б28. Данные по ветвям для тестовой кольцевой сети

Узлы

Ветви

	S	Тип	Номер	Название	U_ном	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V	Delta
1		База	101	Внешняя ЭС 220 кВ	220			27,3	58,3	230,0			230,00	
2		Нагр	111	Внешняя ЭС 110 кВ	110								119,03	-0,43
3		Нагр	211	ПС 110 кВ Завод	110	100,0	50,0						114,71	-0,92
4		Нагр	311	ПС 110 кВ Город	110	50,0	30,0						110,00	-0,47
5		Нагр	411	ПС 110 кВ Станция 110 кВ	110								118,10	2,34
6		Ген	421	ПС 110 кВ Станция ТГ-1	11			63,0	18,6	10,5	-4,7	47,0	10,50	7,15
7		Ген	422	ПС 110 кВ Станция ТГ-2	11			63,0	18,6	10,5	-4,7	47,0	10,50	7,15

Рис. Б29. Форма Узлы с результатами расчета УР тестовой кольцевой сети

Узлы		Ветви															
																	
	S	Тип	N_нач	N_кон	N_л	Название	P_нач	Q_нач	dP	dQ	P_кон	Q_кон	P_ш	Q_ш	I_нач	I_кон	
1		ЛЭП	111	211	1	Внешняя ЭС 110 кВ - ПС 110 кВ Завод	-20,3	-35,7	0,44	1,48	-19,9	-35,4		-1,15	199	204	
2		ЛЭП	111	311	1	Внешняя ЭС 110 кВ - ПС 110 кВ Город	-14,8	-47,7	1,10	3,70	-13,7	-45,8		-1,85	242	251	
3		ЛЭП	311	411	1	ПС 110 кВ Город - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	50,9	39,7	1,63	5,50	52,5	43,7		-1,47	339	334	
4		ЛЭП	211	411	1	ПС 110 кВ Завод - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	40,0	7,2	0,75	2,52	40,7	7,8		-1,90	204	203	
5		ЛЭП	211	411	2	ПС 110 кВ Завод - ПС 110 кВ Станция 110 кВ	40,0	7,2	0,75	2,52	40,7	7,8		-1,90	204	203	
6		Тр-р	101	111	1	Внешняя ЭС 220 кВ - Внешняя ЭС 110 кВ	-13,7	-29,2	0,01	0,56	-13,5	-27,6	0,12	1,00	81	149	
7		Тр-р	101	111	2	Внешняя ЭС 220 кВ - Внешняя ЭС 110 кВ	-13,7	-29,2	0,01	0,56	-13,5	-27,6	0,12	1,00	81	149	
8		Тр-р	411	421	1	ПС 110 кВ Станция 110 кВ - ПС 110 кВ Станция ТГ-1	62,7	12,4	0,21	5,66	63,0	18,6	0,07	0,51	313	3 612	
9		Тр-р	411	422	2	ПС 110 кВ Станция 110 кВ - ПС 110 кВ Станция ТГ-2	62,7	12,4	0,21	5,66	63,0	18,6	0,07	0,51	313	3 612	

Рис. Б30. Форма **Ветви** с результатами расчета УР тестовой кольцевой сети

Раздел В.

Расчет и анализ сложноразветвленных электрических сетей

Лабораторная работа № 1.

Создание расчетной модели фрагмента энергосистемы

Постановка задачи

Цель работы — создание в ПК RastrWin расчетной модели фрагмента энергосистемы.

Исходные данные — индивидуальные варианты задания РГР «Расчет сложноразветвленной сети».

Задачи:

- 1) составить схему замещения и рассчитать для нее все необходимые параметры;
- 2) рассчитать УР и сравнить полученный результат с ручным расчетом;
- 3) выполнить модификацию электрической сети —
 - выбрать тип и количество генераторов на электростанциях;
 - тип и количество трансформаторов на всех ПС;
 - схемы распределительных устройств (РУ) высшего, низшего, а при необходимости и среднего напряжения;
- 4) составить схему замещения для модифицированной электрической сети. Потери в поперечных проводимостях сетевых элементов задавать в виде шунтов;
- 5) генераторные узлы расчетной модели представить в виде PV-узлов;

б) выполнить расчет УР модифицированной электрической сети. В отчете должно быть:

- 1) в графическом виде —
 - представлена однолинейная схема исходной сети с нанесенными на нее результатами расчета УР (потoki мощностей в начале и конце ветвей, потери мощности в ветвях, модуль и угол напряжения во всех узлах, величины нагрузок и генерации);
 - представлена модифицированная однолинейная схема с нанесенными на нее результатами расчета УР;
- 2) тип и количество генераторов и трансформаторов, выбранных на каждой ПС. Также необходимо привести расчеты, на основании которых были выбраны генераторы и трансформаторы;
- 3) в графическом виде представить выбранные схемы РУ для всех ПС. На схемах также указать все высоковольтные ЛЭП, отходящие от ПС. Привести описание критериев выбора схем РУ ПС;
- 4) формы **Узлы** и **Ветви** из ПК RastrWin для исходной и модифицированной электрической сети.

Рекомендованный порядок выполнения работы

На первом этапе выполнения работы необходимо создать в программе расчетную модель для индивидуального варианта РГР. Это позволит выполнить экспресс-проверку результатов ручного расчета. Далее необходимо приступить к выбору электрического оборудования на ПС. Выбирать рекомендуется сначала генераторы, а потом трансформаторы. В рамках данной работы выбор трансформаторов можно выполнять по упрощенным критериям:

- 1) на подстанциях электрических станций полная мощность повышающего трансформатора должна быть больше полной мощности генератора (при блочной схеме подключения генератора);
- 2) на нагрузочных подстанциях понижающие трансформаторы устанавливать по две штуки, а мощность одного трансформатора выбирать из условия возможности кратковременной перегрузки на 40 % [8] ($|S_{\text{тр}}| > |S_{\text{нагр}}| / 1,4$).

После выбора силового оборудования можно приступить к выбору схем РУ для всех ПС. Подробное описание принципов выбора схем распределительных устройств подстанций приведено в справочной литературе [3, 4 и 9], в стандарте ОАО «ФСК ЕЭС» [7].

После выбора схем распределительных устройств подстанций важное значение приобретает решение задачи по выбору узлов в расчетной модели электрической сети. Решение этой задачи зависит от необходимости рассчитывать режимы раздельной работы секций шин. Пример выбора узлов расчетной схемы приведен на рис. В1.

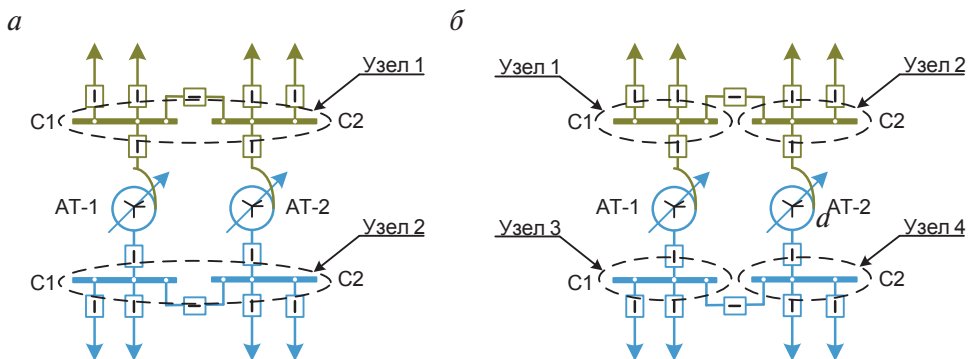


Рис. В1. Пример выбора узлов расчетной модели:

а — без учета возможности расчета УР при раздельной работе секций шин; *б* — с учетом возможности

Как правило, в ПК RastrWin линейные выключатели и обходная система шин не моделируются.

Если в качестве узла расчетной модели выбрано всё распределительное устройство, то секционные выключатели считаются всегда включенными. Это обусловлено тем, что в форме «Ветви» есть отдельные положения переключателя включенного состояния ветви, которые позволяют моделировать односторонние отключения ветвей. Отсутствие в модели обходной системы шин связано с тем, что она предназначена для перевода на нее присоединений на время ремонта оборудования в ячейке выключателя (линейного или трансформаторного). Это практически не оказывает влияния на результаты расчета УР, и в ПК RastrWin моделировать обходную системы шин, как правило, нецелесообразно.

Для каждого РУ всех ПС необходимо распределить присоединения по секциям шин. При этом необходимо руководствоваться следующими принципами:

- 1) количество присоединений на секциях шин должно быть приблизительно одинаковым;



присоединений к секциям шин



Рис. В3. Пример ошибочного подключения присоединений

- 2) для одной или двух ЛЭП на участке, секции шин с четными номерами должны соединяться с секциями шин другой ПС с четным номером, а с нечетными номерами — к нечетным. Если ЛЭП больше двух, то линии с номерами, кратными 3 и 4, необходимо подключать «крест накрест», то есть четные секции должны соединяться с нечетными. В ремонтных схемах это увеличивает надежность электроснабжения потребителей;
- 3) если две подстанции соединяет несколько ЛЭП, то их необходимо равномерно распределить по секциям шин подстанций.

Пример корректного подключения ЛЭП и трансформаторов к секциям шин приведен на рис. В2. На рис. В3 представлен пример ошибочного распределения присоединений по секциям шин:

- 1) на ПС «Запад» неправильно подключены трансформаторы и ЛЭП к секциям шин. На каждой секции шин по два присоединения, но при отключении любой из них, оба трансформатора на ПС 110 кВ «Запад» теряют питание. Это является недопустимым режимом работы.
- 2) На ПС «Восток» ошибочно подключены ЛЭП: ВЛ «Восток — Запад 2» и ВЛ «Центр — Восток 1». При такой схеме подключения линий электропередач, отключение первой секции шин приведет к потере питания всей ПС 110 кВ «Запад», а при отключении второй секции шин, возникнет потеря питания сразу двух подстанций: ПС 110 кВ «Запад» и ПС 110 кВ «Восток».

Теория и примеры

Рекомендации к вопросу о представлении однолинейных схем в ПК RastrWin

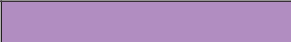
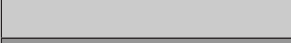
Графика в ПК RastrWIN хранится в отдельном файле с расширением «.grf». Перед началом работы рекомендуется создать новый файл графики. В противном случае есть риск испортить шаблон файла графики «.grf». Для того чтобы сохранить файл графики, необходимо нажать **Файлы \ Сохранить как...** и в открывшемся окне выбрать тип файла графика (*.grf). После этого надо ввести имя файла графики и нажать кнопку **Сохранить**. Загружается файл графики отдельно.

Перед началом работы с графикой в ПК RastrWIN рекомендуется ознакомиться с соответствующим разделом документации пользователя: **Помощь \ Справка \ RastrWIN3 Документация пользователя \ Раздел 4 Графика**. Это позволит изучить актуальные горячие клавиши и основные элементы интерфейса пользователя.

Цветовую кодировку классов напряжений на графике рекомендуется принять согласно стандарту АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.010.003—2015 «Правила отображения технологической информации». Цветовая кодировка приведена в табл. В1.

Таблица В1

Цветовая кодировка классов напряжений для условно-графических изображений на однолинейных схемах

Класс напряжения	Образец цвета	RGB кодировка
1. 1150 кВ		205:138:255
2. 750 кВ (800 кВ ППТ)		065:065:240
3. 500 кВ		184:000:000
4. 400 кВ (ЛЭП, цепи ППТ)		135:253:194
5. 330 кВ		000:204:000
6, 7. 220 кВ		204:204:000
		128:128:000
8. 150 кВ		170:150:000
9. 110 кВ		070:153:204
10. От 27 до 60 кВ		194:090:090
11. От 6 до 24 кВ		164:100:164
12. Генераторное напряжение		204:100:204
13, 14. Без напряжения		204:204:204
		150:150:150
15. Заземлено		255:153:000
16. Перегрузка		255:000:000
17. Неизвестно		140:140:140

При создании графики в ПК RastrWin рекомендуется использовать инструменты на панели графики слева направо, как представлено на рис. В4. Такой подход позволит несколько уменьшить трудоемкость создания графического представления однолинейной схемы.

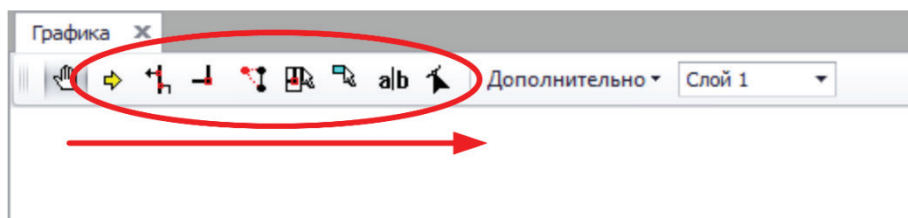


Рис. В4. Порядок использования инструментов для рисования однолинейных схем

Пример создания однолинейной схемы в ПК RastrWin

Рассмотрим процесс создания графики для схемы электрической сети, представленной на рис. В2.

На первом этапе необходимо примерно расставить узлы относительно друг друга, используя инструмент «Ввод» (рис. В5). На данном этапе не имеет значения расположение ветвей относительно друг друга. Для того чтобы не путаться в схеме, рекомендуется узлы расставлять примерно в соответствии с исходной однолинейной схемой (см. рис. В2). В результате этой операции может получиться картинка, неудобная для зрительного восприятия (рис. В6).

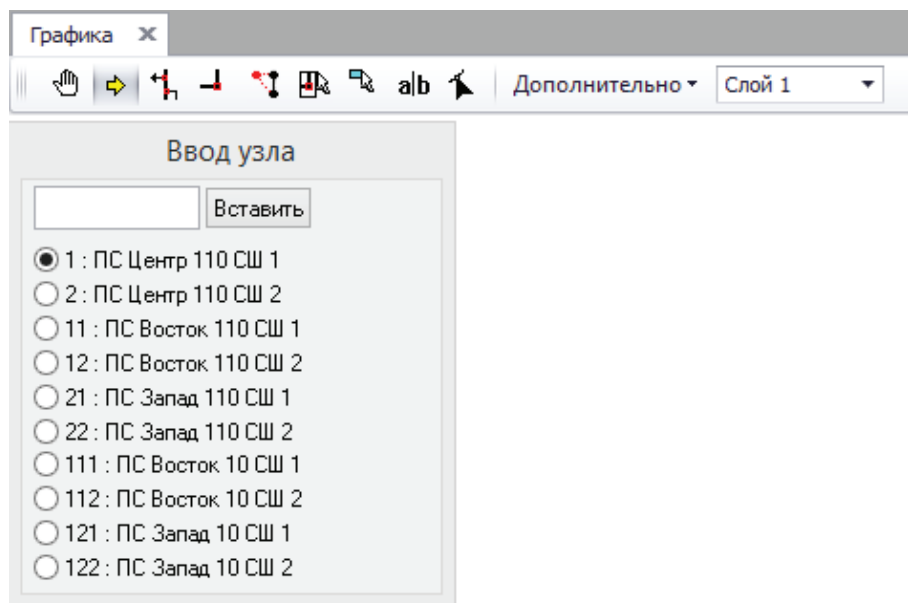


Рис. В5. Первоначальное состояние графики в ПК RastrWin

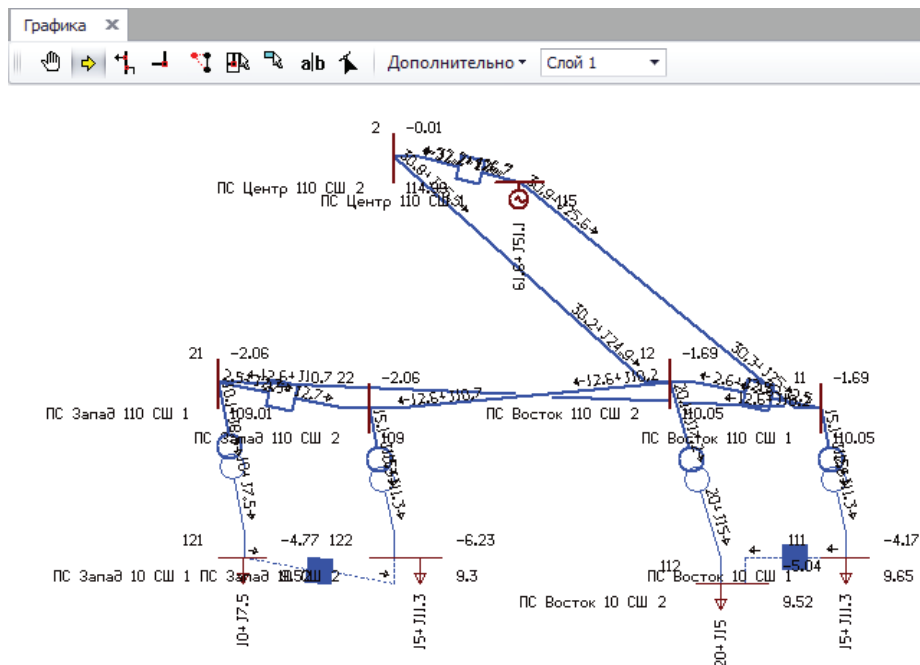


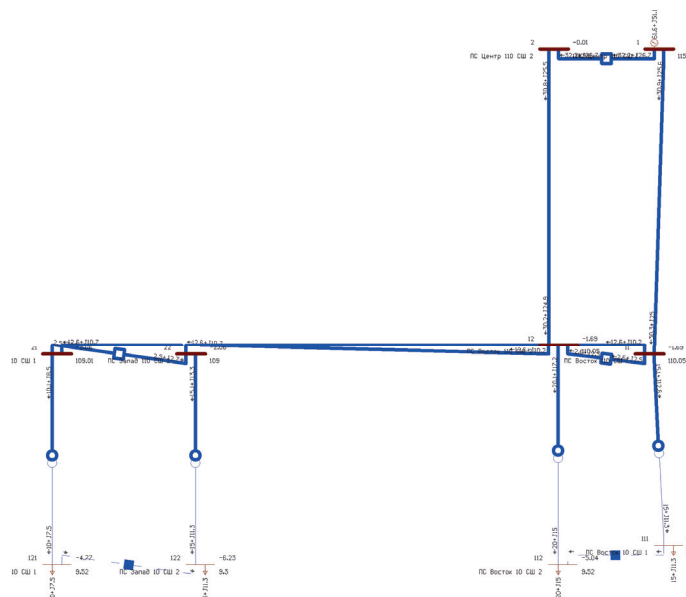
Рис. В6. Пример результата первоначальной расстановки узлов на графике

При расстановке узлов, внутренние алгоритмы ПК RastrWin пытаются определить наиболее удачную ориентацию шин друг относительно друга. При этом ветви могут выходить из одной общей точки, что неприемлемо. В результате, после примерной расстановки всех узлов, для удобной картинки необходимо каждый из них подвигать левой клавишей мыши. При этом можно принудительно изменить ориентацию узла с помощью клавиш:

- 1) **Shift** — горизонтальная ориентация;
- 2) **Alt** — вертикальная ориентация;
- 3) **Shift + Alt** — узел в виде точки, а не шины.

При перемещении узлов необходимо контролировать расстояние между ними. Проблема заключается в том, что в ПК RastrWin практически нет ограничений на расстояние между узлами. При увеличении длины линий на графике, настройки толщины линий шрифтов надписей остаются постоянными. Это приводит к тому, что при выводе на печать полученной графики, надписи могут быть нечитаемы. Примеры расположения узлов на графике представлены на рис. В7.

a



б

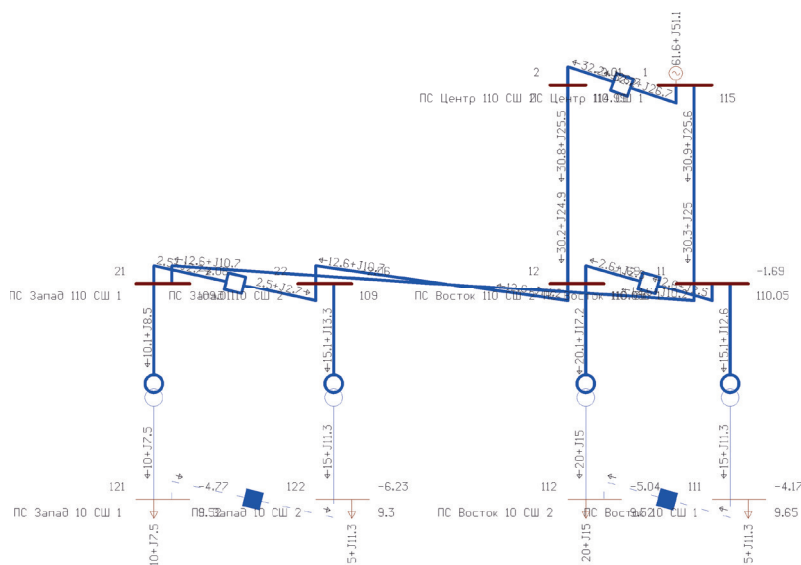


Рис. В7. Пример расстановки узлов на графике:

a — плохо читаемые надписи из-за большого расстояния между узлами;

б — более удачное размещение узлов на графике

После того как расстановка узлов на графике завершена, необходимо упорядочить ориентацию узлов и размещение присоединений, поэтому на втором этапе необходимо переключиться в режим **Присоедине-**

ние и начать двигать присоединения по узлам для получения их более удачного взаимного расположения. Результат представлен на рис. В8.

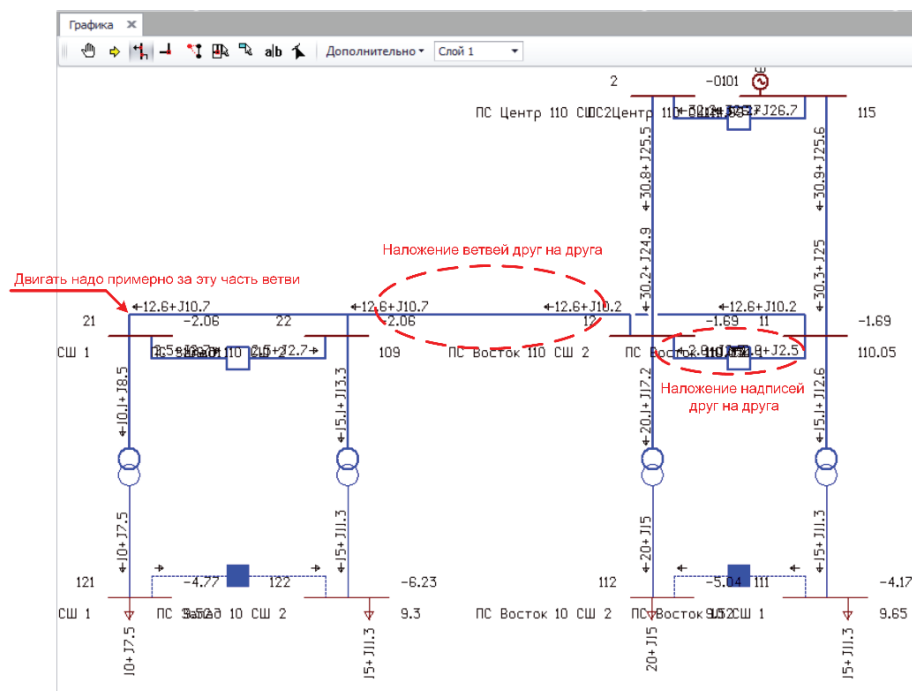


Рис. В8. Результат применения инструмента **Присоединение** (красным показаны комментарии к схеме)

Далее необходимо исправить наложение ветвей и надписей друг на друга. Для изменения маршрута прохождения ветвей по схеме необходимо использовать инструмент **Изгиб**. С помощью данного инструмента расставляются точки принудительного изгиба линий графики. Для удаления точки изгиба, ее необходимо совместить с другой точкой изгиба (рис. В9).

Перемещение надписей осуществляется с помощью инструмента **Текст**, левой кнопкой мыши. При необходимости добавить или изменить надписи на графике следует в окне **Графика** зайти в меню **Дополнительно \ Параметры \ Текст** (рис. В10). На график были добавлены максимальные модули тока по ветвям (синий цвет). Изменены цвета углов напряжения (пурпурный) и номеров узлов (зеленый).

Необходимо отметить, что список параметров, которые можно добавить на график, отсортирован по своим внутренним системным наименованиям (см. гл. 3).

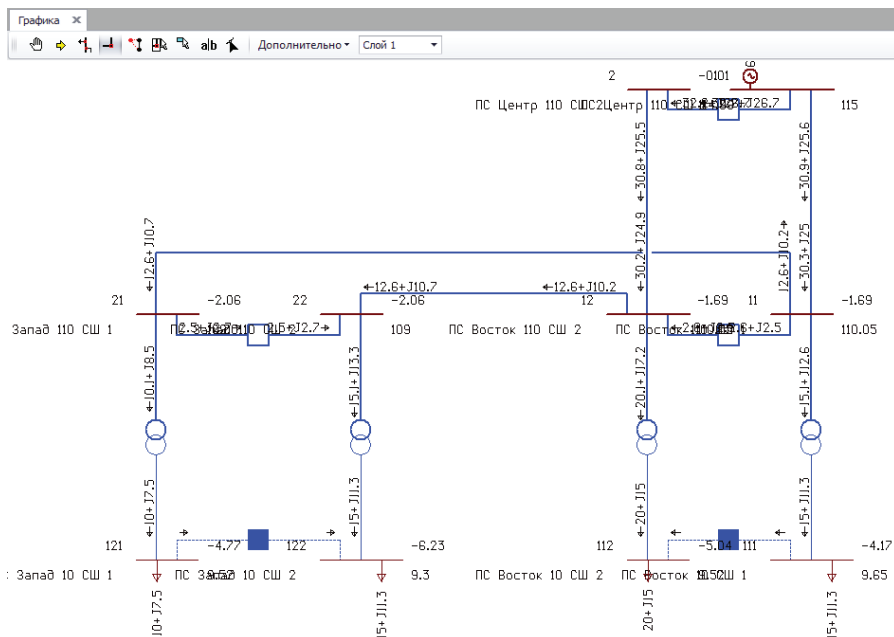


Рис. В9. Результат применения инструмента Изгиб

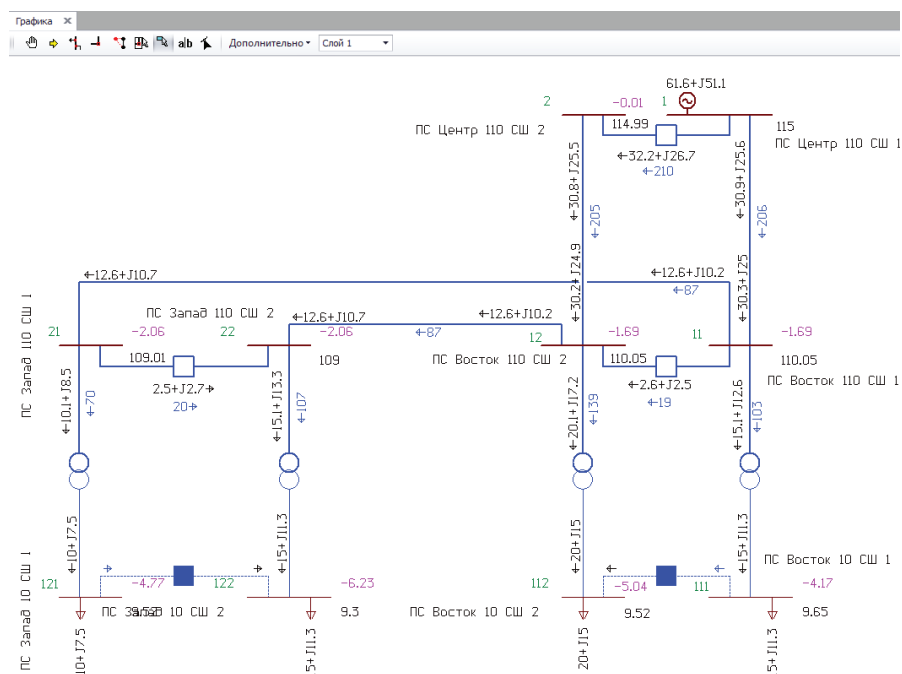


Рис. В10. Результаты коррекции надписей на графике

Для удаления надписи с графики необходимо нажать на нее правой кнопкой (действие не подлежит отмене). Если надпись удалена случайно, то необходимо с помощью инструмента **Ввод** удалить узел и затем поставить его на место, после чего расставить ветви и надписи на свои места.

Стандартами многих организаций предусмотрено цветовое различие по классам напряжений. Корректировка цветов ветвей и узлов в зависимости от класса напряжения осуществляется в два этапа:

- 1) в меню окна **Графика** нажать **Дополнительно \ Параметры \ Общие**. В открывшемся окне настроечный параметр «Выделение цветом «U-цвет» необходимо переключить в положение «Да»;
- 2) задать для каждого класса напряжения в схеме цветовую палитру. Для этого необходимо в меню окна **Графика** нажать **Дополнительно \ Параметры \ Гр\Напряжения**. В открывшемся окне можно задать индивидуальный цвет для каждого класса напряжения в схеме.

Рекомендуется принять цветовую палитру классов напряжения в соответствии с табл. В1. Для добавления своего цвета в стандартную палитру необходимо в пользовательской цветовой палитре нажать правой кнопкой мыши на белом квадрате, как показано на рис. В11.

Полученный результат после коррекции цветов ветвей представлен на рис. В12.

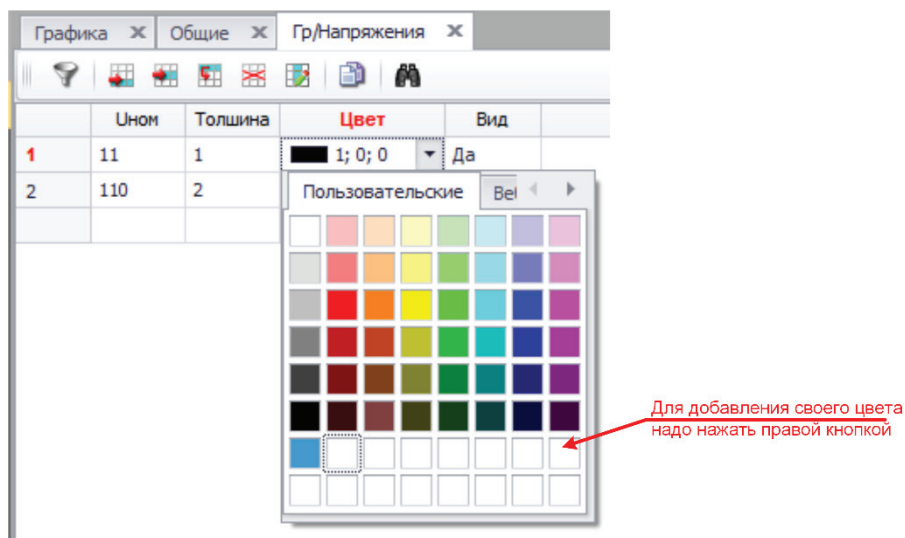


Рис. В11. Меню добавления пользовательского цвета

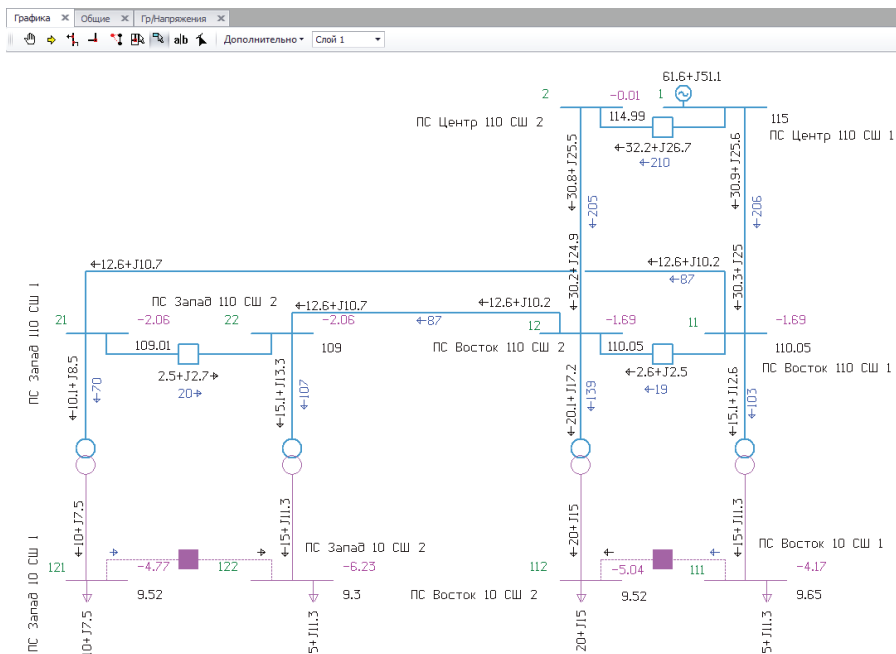


Рис. В12. Результат коррекции цветов ветвей

Вывод графики на печать

Есть несколько способов вывести полученную графику на печать:

- 1) сделать скрин экрана и вставить в MS Paint;
- 2) выполнить экспорт в формат «.dxf». Далее можно редактировать в большинстве векторных графических редакторов;
- 3) использовать инструмент **Выделить** в окне **Графика**;
- 4) использовать макрос экспорта в формат «.svg».

Для экспорта в формат «.dxf» необходимо в окне **Графика** нажать **Дополнительно \ Экспорт DXF**. При сохранении надо в конце имени файла дописать «.dxf».

При использовании инструмента **Выделить** следует придерживаться следующего алгоритма:

- 1) нажать в окне **Графика** на кнопку **Выделить**;
- 2) рамкой выделить фрагмент графики, который необходимо экспортировать;
- 3) нажать правой кнопкой мыши в свободном месте схемы;
- 4) в открывшемся меню нажать кнопку **Копировать**;
- 5) в зависимости от задач —

- вставить в MS Paint, если требуется точечный рисунок;
- в MS Word, если требуется векторный рисунок, в формате «.wmf».

Необходимо отметить, что разрешение полученного таким образом рисунка зависит от двух факторов: разрешения экрана и параметра «Масштаб буфера» (**Дополнительно \ Параметры \ Общие**), который является множителем к разрешению экрана. По умолчанию его значение равно 10. Если, при сохранении рисунка, линии будут слишком тонкие, то необходимо уменьшить значение параметра «Масштаб буфера».

Экспорт в векторный формат «.svg» осуществляется с помощью встроенного макроса на языке VB Script. Макрос запускается следующим образом: **Расчеты \ Выполнить \ Графика \ Экспорт в SVG**.

Лабораторная работа № 2.

Регулирование напряжения

Постановка задачи

Цель работы — на основе расчетов УР показать, что в заданной сети возможно поддерживать допустимые уровни напряжения, используя средства централизованного и местного регулирования.

Исходные данные — модифицированная расчетная модель, которая получена в ходе выполнения предыдущего задания (см. лаб. работу № 1).

Коэффициент неравномерности графика нагрузки принять равным 0,6.

В качестве требуемого уровня напряжения на шинах нагрузки принять значение на 5 % больше, чем класс напряжения, $V_{\text{тр}} = 1,05V_{\text{ном}}$. На шинах генератора в качестве требуемого уровня напряжения необходимо принять его номинальное напряжение.

Основные классы напряжений и максимально допустимые уровни напряжений элементов электрической сети перечислены в табл. В2.

Таблица В2

Наибольший рабочий уровень напряжения по изоляционной стойкости в зависимости от класса напряжения электрической сети

Показатели	Класс напряжения $V_{\text{ном}}$, кВ										
	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
Наибольшее рабочее напряжение $V_{\text{из}}$, кВ	6,90	11,50	23,00	40,25	126,50	172,50	253,00	363,0	525,00	787,50	1207,50
Кратность, о. е.	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,1	1,05	1,05	1,05

Задачи:

- 1) отрегулировать напряжение в нормальной схеме при различных уровнях нагрузок ПС —
 - режиме максимальных нагрузок;
 - режиме минимальных нагрузок.

- 2) При максимальных нагрузках необходимо отрегулировать напряжение для следующих послеаварийных ситуаций:
 - отключения одного генератора;
 - отключения одной самой нагруженной ЛЭП (в качестве критерия рассматривать величину тока, протекающего по одной цепи).
- 3) Обеспечить, чтобы модуль напряжения в узлах электрической сети соответствовал следующим требованиям (в реальных схемах требования к уровням напряжения могут отличаться):
 - в нормальных схемах на шинах нагрузки отклонение напряжения вверх или вниз от требуемого $V_{тр}$ не должно превышать 5 %;
 - в послеаварийных схемах на шинах нагрузки отклонение напряжения от требуемого $V_{тр}$ не должно превышать 10 % или быть выше изоляционной стойкости $V_{из}$ (что меньше);
 - во всех схемах модуль напряжения на шинах генераторов должен быть равен номиналу генератора;
 - в нормальных схемах уровень напряжения на шинах высшего напряжения должен быть не ниже класса напряжения $V_{ном}$ и не выше предела по изоляционной стойкости $V_{из}$;
 - в послеаварийных схемах уровень напряжения на шинах высшего напряжения должен быть не ниже $0,85V_{ном}$ от класса напряжения и не выше предела по изоляционной стойкости $V_{из}$.
- 4) Сформировать перечень расчетных сценариев для анализа отключений различных сетевых элементов, указанных в п. 2 задачи.

В отчете должно быть:

- 1) в графическом виде однолинейные схемы электрической сети до регулирования напряжения и после;
- 2) описание использованных способов и средств регулирования напряжения. При установке компенсирующих устройств необходимо представить расчеты по выбору мощности компенсирующего устройства;
- 3) описание расчетных сценариев (какое оборудование было включено, а какое — отключено) и данные из форм «Варианты_Название» и «Варианты_Содержание»;
- 4) для нормальных схем данные из форм «Узлы» и «Ветви».

Рекомендованный порядок выполнения работы

ПК RastrWin не позволяет хранить информацию о графике нагрузки каждого узла. Пользователь вручную моделирует изменение нагрузки в узлах с течением времени.

Для выполнения данной работы необходимо создать две расчетные модели для нормальной схемы: максимальные и минимальные нагрузки. Также необходимо сделать две расчетные модели для режимов отключений элементов сети. Всего должно получиться 4 стартовых файла с расчетными моделями до регулирования напряжения.

Рекомендуется сохранить на диске как стартовые файлы до регулирования напряжения, так и файлы моделей после регулирования напряжения.

Создать расчетные сценарии по отключению сетевых элементов из нормальной схемы можно с помощью средств ПК RastrWin. Такой подход, в случае необходимости установки компенсирующего устройства, позволит проверять корректность его выбора по всему множеству режимов. При этом нормальные схемы с различными нагрузками в узлах всё равно лучше создавать вручную.

Регулирование напряжения в узлах расчетной модели необходимо начинать от источников питания, так как они оказывают влияние на всю сеть. Регулирование напряжения на шинах потребителей можно начинать только после того, как напряжение в питающей сети и на шинах генераторов вошло в требуемый диапазон. Если же сначала выполнить регулирование напряжения на шинах нагрузки, а потом в питающей сети, то может возникнуть итерационный процесс по подгонке уровней напряжения в узлах сети. Это может значительно повысить трудоемкость выполнения данной работы.

Теория и примеры

Групповая коррекция нагрузок в расчетной модели

Изменять нагрузку в расчетной модели можно несколькими способами:

- 1) изменять вручную значения в колонках «Рн» и «Qн» в форме **Узлы**;
- 2) скопировать в MS Excel данные из формы **Узлы**. Пересчитать нагрузку с помощью средств MS Excel и скопировать обратно;

- 3) использовать инструмент для групповой коррекции значений мощности в колонках формы **Узлы**;
- 4) использовать макрос коррекции потребления района.

В случае использования макроса для коррекции потребления района, программа автоматически будет пытаться подобрать заданную величину потребления всех узлов расчетной модели, отнесенных к данному району (с учетом потерь в сети). Коррекция потребления района осуществляется по следующему алгоритму:

- 1) создать район для электрической сети 110 кВ — меню **Открыть \ Районы \ Районы**;
- 2) заполнить поля «Район» и «Nr-н». Номер района «Nr-н» (только натуральное число) — ключ таблицы, необходимый для привязки узлов и ветвей к соответствующему району;
- 3) присвоить всем нагрузочным узлам сети единый номер района в поле **Район** формы **Узлы**, который был присвоен районам в поле «Nr-н» таблицы «Районы»;
- 4) из формы **Районы** взять суммарное потребление активной мощности района и умножить его на коэффициент неравномерности графика нагрузки. Полученное число зафиксировать (например, на листе бумаги);
- 5) воспользоваться макросом для коррекции потребления района: меню **Расчеты \ Выполнить \ Коррекция \ Задать потребление района**;
- 6) дождаться загрузки окна браузера, в котором будет отображаться меню коррекции потребления района;
- 7) в появившемся меню указать номер корректируемого района и скорректированное итоговое потребление района. ПК RastrWIN автоматически изменит величину нагрузки во всех узлах района пропорционально их текущей активной мощности с учетом потерь мощности по ветвям, и при этом у нагрузок будет сохраняться постоянное соотношение между активной и реактивной мощностью ($\cos \varphi = \text{const}$).

Автоматический подбор необходимой мощности БСК или ШР

Чтобы ввести уровни напряжений в допустимый диапазон в узлах расчетной модели, разработано несколько способов для оценки требуемой мощности компенсирующего устройства. Рассмотрим один из них:

- 1) выбрать узел, в котором предполагается установить компенсирующее устройство (обычно это узел с наибольшим отклонением напряжения от требуемого значения);
- 2) открыть форму **Узлы**;
- 3) перевести узел предполагаемого размещения компенсирующего устройства из PQ-узла в PV-узел, для этого задать —
 - в форму **Узлы** диапазон регулирования реактивной мощности (поля «Qmin» и «Qmax»), на два-три порядка превышающий наибольшее значение мощности нагрузки;
 - в качестве фиксируемого модуля напряжения (поле «Vзд») требуемый уровень напряжения в данном узле;
- 4) рассчитать УР;
- 5) в случае успешного выполнения п. 4, в поле «Qг» будет рассчитана мощность компенсирующего устройства, необходимая для поддержания заданного модуля напряжения в узле. Зафиксировать данное число на бумаге;
- 6) ориентируясь на рассчитанное значение реактивной мощности, необходимо подобрать из справочника тип, мощность и количество компенсирующих устройств в узле;
- 7) вернуть узел обратно в тип PQ и учесть выбранное компенсирующее устройство —
 - приравнять к нулю поля «Qmin» и «Qmax»;
 - приравнять к нулю поля «Qг» и «Vзд»;
 - в поле «Вш» задать проводимость выбранного компенсирующего устройства в микросименсах с учетом знака (емкостной проводимости соответствует знак минус);
- 8) рассчитать УР с учетом компенсирующего устройства;
- 9) проверить уровни напряжений; если они не соответствуют требуемым, то выполнить коррекцию мощности компенсирующего устройства.

С помощью такого алгоритма можно проверить все схемно-режимные ситуации, а также подобрать и проверить мощность компенсирующего устройства сразу для всего множества режимов.

Создание расчетных сценариев

Под расчетным сценарием в настоящей работе понимается перечень изменений параметров расчетной модели (сопротивление ветвей, мощность узлов, состояние узлов и ветвей). В практике такие сцена-

рии применяются, когда заранее известны отличия исследуемой схемно-режимной ситуации от нормального режима.

В общем случае для формирования набора расчетных сценариев можно пойти двумя путями:

- 1) использовать имеющиеся средства ПК RastrWIN;
- 2) формировать расчетные сценарии во внешнем файле.

Рассмотрим формирование расчетных сценариев средствами ПК RastrWIN. Для этого необходимо создать файл для хранения информации о сценариях расчета: **Файл / Новый / вариант-е р-ты.vrn**. После того как создан файл, можно приступить к формированию таблицы с информацией о расчетных сценариях.

В терминах ПК RastrWIN расчетный сценарий называется «вариантный расчет». Для этого необходимо открыть две формы. В одной задается название варианта, а в другой — перечень изменений параметров схемы относительно нормальной схемы. Связь между формами обеспечивается через ключ «Номер». Открыть формы можно с помощью следующих пунктов меню:

- 1) формы с названиями расчетных сценариев **Открыть / Вариант. р-ты / Варианты_Название**;
- 2) таблицы перечня изменений параметров схемы **Открыть / Вариант. р-ты / Варианты_Содержание**.

Подробное описание структуры данных в формах «Варианты_Название» и «Варианты_Содержание» приведено в руководстве пользователя ПК RastrWIN, в разделе «Вариантные расчеты».

Рассмотрим процесс создания расчетных сценариев на тестовой схеме (рис. В2):

- 1) отключение 1 Тр на ПС 110/10 «Запад» —
 - 1 Т на ПС 110/10 «Запад» отключен;
 - секционный выключатель 10 кВ на ПС 110/10 «Запад» включен;
- 2) отключение ВЛ 110 кВ «Восток — Запад 1» — ВЛ 110 кВ «Восток — Запад 1» отключена;
- 3) отключение 1 СШ 110 кВ на ПС 110/10 «Восток» —
 - 1 СШ 110 кВ на ПС 110/10 «Восток» отключена;
 - секционный выключатель 10 кВ на ПС 110/10 «Запад» включен;
 - секционный выключатель 110 кВ на ПС 110/10 «Запад» отключен;
 - ВЛ 110 кВ «Восток — Запад 1» отключена;

- ВЛ 110 кВ «Центр — Восток 1» отключена;
- 1 Т на ПС 110/10 «Восток» отключен.

Важно отметить, что при составлении расчетных сценариев специалист должен учитывать переключения в электрических схемах, осуществляемые не только оперативным персоналом, но и сетевой противоаварийной автоматикой. Более того, необходимо учитывать схемы распределительных устройств подстанций.

Пример заполнения таблиц вариантных расчетных сценариев приведен на рис. В13 и В14. Нумерация узлов представлена на рис. В10.

	S	O	Номер	Название
1	☐	☐	1	Отключение 1 Тр на ПС 110/10 Запад
2	☐	☐	2	Отключение ЛЭП 110 кВ Восток - Запад 1
3	☐	☐	3	Отключение 1 СШ 110 кВ на ПС 110/10 Восток

выбрано 3 записи из 3

Конструктор фильтра...

Рис. В13. Пример заполнения формы **Варианты_Название**

S	Номер	A	FOL	Тип	Ny/Nb	Ne	Np	Значен...	Значен...	Значен...
1	1	☐	☐	Ветвь сост.	21	121		0		
2	1	☐	☐	Ветвь сост.	121	122		1		
3	2	☐	☐	Ветвь сост.	11	21		0		
4	3	☐	☐	Узел сост.	11			0		
5	3	☐	☐	Ветвь сост.	11	12		0		
6	3	☐	☐	Ветвь сост.	111	112		1		
7	3	☐	☐	Ветвь сост.	1	11		0		
8	3	☐	☐	Ветвь сост.	11	21		0		

выбрано 8 записей из 8

Конструктор фильтра...

Протокол

Загружен файл C:\Users\tas\Desktop\Новая папка\2.rg2 по шаблону режим.rg2 время 0.29 сек

Загружен файл C:\Users\tas\Desktop\Новая папка\3.rg2 по шаблону режим.rg2 время 0.29 сек

Рис. В14. Пример заполнения формы **Варианты_Содержание**

Запуск формирования файлов с расширением «tg2» для серии УР осуществляется следующим образом:

- 1) нажать пункт меню **Расчеты / Выполнить / Варианты / Вариантные расчеты + dxf**. При этом в той же папке будут записаны файлы графического представления результатов расчетов в векторном формате, пригодном для редактирования в программных пакетах векторной графики. Пример окон представлен на рис. В13 и В14;
- 2) в появившемся окне необходимо указать папку, куда сохранить результаты расчетов (рис. В15);
- 3) во втором появившемся окне указать путь до базового файла с расчетной схемой в формате «tg2» (рис. В16);
- 4) дождаться окончания расчетов. Результаты будут помещены в папку, выбранную на первом шаге (рис. В17);
- 5) проанализировать результаты расчетов.

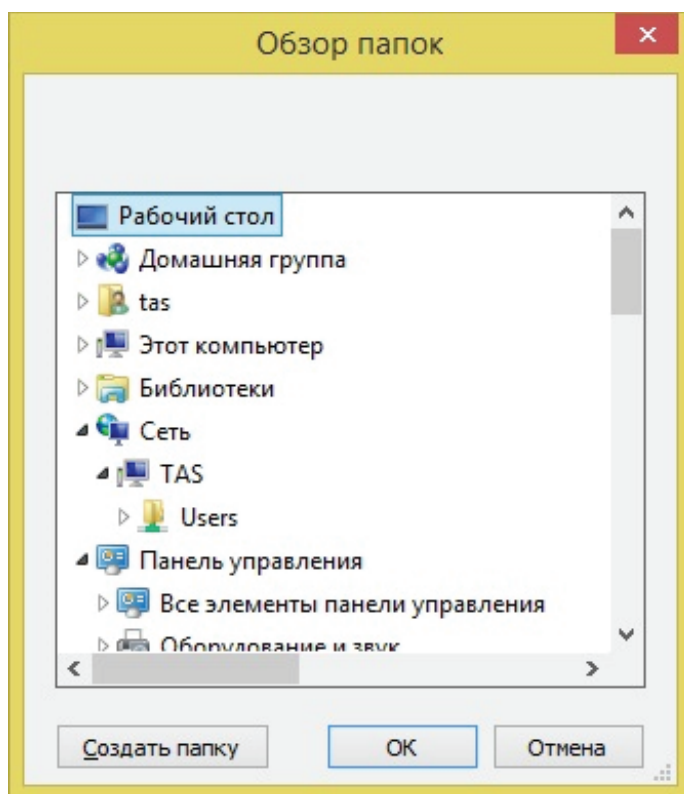


Рис. В15. Первый шаг вариантных расчетов

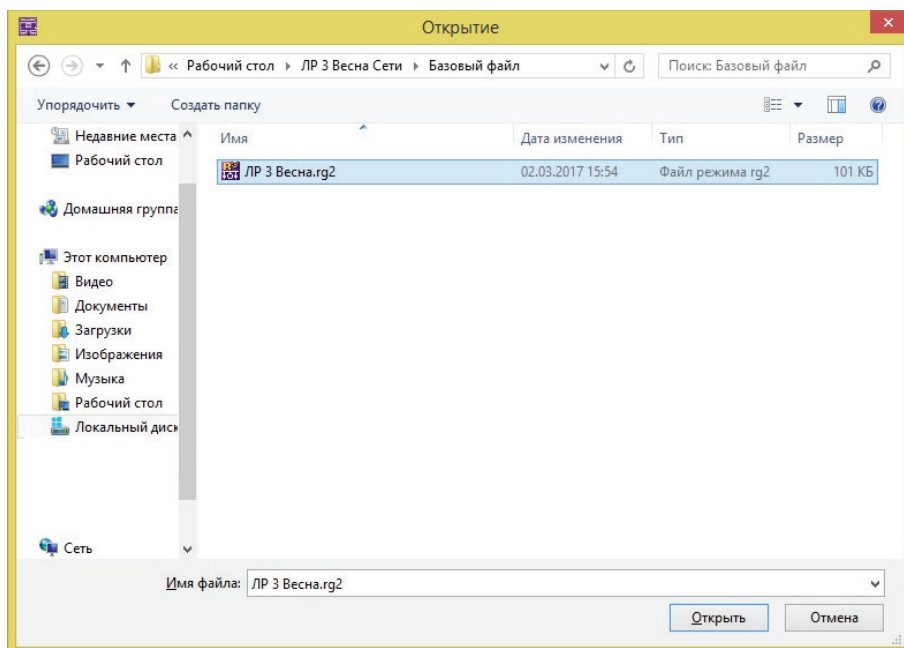


Рис. В16. Второй шаг вариантных расчетов

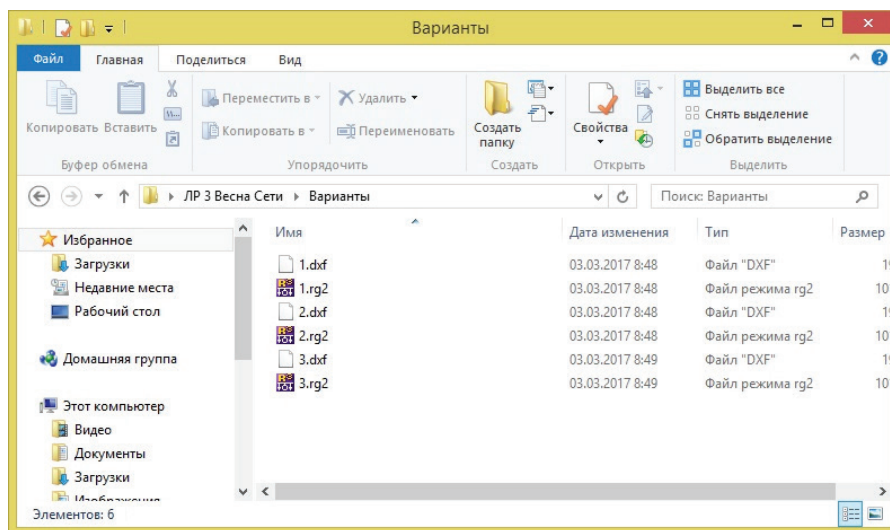


Рис. В17. Третий шаг вариантных расчетов

Под базовым файлом «rg2» понимается файл, в который будут внесены изменения и на основе которого будут получены различные схемно-режимные ситуации для дальнейшего анализа.

Лабораторная работа № 3.

Оценка перегрузочной способности по току электрической сети

Постановка задачи

Цель работы — освоение процедуры автоматизированного анализа параметров установившегося режима в нормальных, ремонтных и послеаварийных установившихся режимах.

Исходные данные — индивидуальные варианты (модифицированные) схемы из предыдущего задания.

Задачи:

- 1) добавить в форму **Ветви** информацию о перегрузочной способности сетевого оборудования (ЛЭП, Тр и выключатели);
- 2) выполнить расчеты установившихся режимов для нормальной схемы и всех составленных расчетных сценариев;
- 3) выполнить анализ перегрузочной способности по току электрической сети для нормальных и послеаварийных схем. При выявлении перегрузки сетевого оборудования предложить меры по их устранению. Требования —
 - при перегрузках в нормальных и единичных ремонтных схемах необходимо выполнить мероприятия по усилению электрической сети;
 - при перегрузках в послеаварийных схемах сформировать перечень режимных мероприятий для устранения перегрузок.

В отчете должно быть:

- 1) формы «Токовая загрузка ЛЭП» и «Токовая загрузка Тр-ров»;
- 2) в графическом виде результаты расчетов УР для всех рассмотренных расчетных сценариев. На схемах необходимо представить следующую информацию¹ —
 - поток мощности в начале или конце сетевого элемента (черный цвет);
 - максимальный ток по сетевому элементу (синий цвет);
 - токовую загрузку сетевого элемента, в процентах (красный цвет);

¹ При отсутствии возможности цветной печати можно использовать маркеры для выделения разными цветами.

- 3) рекомендации по устранению токовой перегрузки или ограничения нагрузки (при наличии перегрузки сетевого оборудования или отключении нагрузки) и в графическом виде откорректированный УР.

Рекомендованный порядок выполнения работы

На первом шаге выполнения данной работы необходимо сначала внести корректировки в форму «Ветви», в части информации о допустимых токовых нагрузках сетевых элементов. Далее необходимо выполнить корректировку графики в ПК RastrWin для вывода информации о максимальных токах по ветвям и об уровне их токовой загрузки.

Последним этапом выполнения работы будет проверка допустимости токовых нагрузок всех ветвей при их поочередном отключении. Для этого рекомендуется использовать штатный макрос ПК RastrWin для поочередного отключения ветвей.

Теория и примеры

Расчет номинальных токов оборудования

Для оценки величины токовой загрузки сетевых элементов необходимо соответствующую информацию занести в форму «Ветви». Рассмотрим решение данной задачи на примере электрической сети, представленной на рис. В2. Параметры схемы замещения приведены в табл. В3. В данной схеме холостой ход трансформаторов представлен в виде шунтов.

Таблица В3

Параметры схемы замещения тестовой схемы

Марка	R , Ом	X , Ом	G , мкСм	B , мкСм	ДДТН, А
АС-240, 40 км	4,80	16,2	0,00	-112,40	605,0
АС-240, 20 км	2,40	8,1	0,00	-56,20	605,0
ТРДН-40000-110/10	1,40	34,7	2,62	19,66	201,0
ТРДН-25000-110/10	2,54	55,9	2,04	13,22	125,7

Длительно-допустимая токовая нагрузка (ДДТН) сетевых элементов может быть получена по данным собственника оборудования, а за их отсутствием — по справочным данным [3]. ДДТН можно оценить следующим образом:

- 1) выключатели — номинальный ток, который не зависит от температуры окружающей среды;
- 2) трансформаторы тока (ТТ) — номинальный ток, который не зависит от температуры окружающей среды;
- 3) разъединители — номинальный ток, который не зависит от температуры окружающей среды;
- 4) ЛЭП — ток при температуре окружающей среды +25 °С, зависит от температуры окружающей среды;
- 5) трансформаторы — паспортные данные трансформатора, зависят от температуры окружающей среды.

ДДТН для трансформаторов можно оценить по формуле

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{3} S_{\text{ном}} \cdot V_{\text{ном}},$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность трансформатора, МВ·А; $V_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение обмотки трансформатора, к классу напряжения которой приводится ток, кВ.

Информация о значениях допустимого тока для сетевого оборудования хранится в форме «Ветви». В общем случае информацию о допустимой токовой загрузке сетевых элементов в ПК RastrWIN можно хранить несколькими способами. Выбор того или иного способа моделирования зависит от наличия исходных данных. В настоящей работе предложен следующий способ учета допустимых токов сетевого оборудования:

- 1) информацию о ДДТН ЛЭП и трансформаторов записывать в колонку «Iдоп_25_ДДТН»;
- 2) информацию о ДДТН выключателей, разъединителей и ТТ записывать в колонку «I_доп_обор_ДДТН».

При наличии информации об аварийно-допустимых токовых нагрузках (АДТН), ее записывают в колонках «Iдоп_25_АДТН» и «I_доп_обор_АДТН». Чаще всего значение АДТН равно ДДТН. Величина АДТН используется при анализе допустимой величины токовой загрузки при аварийных отключениях. Как правило, данные режимы непродолжительны. Длительность и возможную величину АДТН необходимо уточнять по паспортным данным оборудования.

Рассмотрим пример выполнения температурной коррекции допустимого тока для жаркого летнего дня с температурой +35 °С (**Расчеты / Доп. ток от Т...**). Предположим, что на всех ветвях 110 кВ установлены выключатели с номинальным током в 1 000 А. Заполненная форма «Ветви» представлена на рис. В18.

Тип	N_нач	N_кон	Название	I_загр.	I_доп_25_ДДТН	I_доп_обор_ДДТН	I_доп_расч_ДДТН	I_доп_обор_А	I_доп_25_АДТН	I_доп_расч_АДТН	N_I(t)_ДДТН	N_I(t)_АДТН	Tс
1	Выкл	1	2	ПС Центр 110 ОШ 1 - ПС Центр 110 ОШ 2	20,1	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0			
2	ЛЭП	1	11	ПС Центр 110 ОШ 1 - ПС Восток 110 ОШ 1	38,8	605,0	1 000,0	532,4	1 000,0	605,0	532,4	1	1
3	ЛЭП	2	12	ПС Центр 110 ОШ 2 - ПС Восток 110 ОШ 2	38,7	605,0	1 000,0	532,4	1 000,0	605,0	532,4	1	1
4	Выкл	11	12	ПС Восток 110 ОШ 1 - ПС Восток 110 ОШ 2			1 000,0	1 000,0	1 000,0		1 000,0		
5	ЛЭП	11	21	ПС Восток 110 ОШ 2 - ПС Запад 110 ОШ 1	16,5	605,0	1 000,0	532,4	1 000,0	605,0	532,4	1	1
6	ЛЭП	12	22	ПС Восток 110 ОШ 2 - ПС Запад 110 ОШ 2	16,5	605,0	1 000,0	532,4	1 000,0	605,0	532,4	1	1
7	Выкл	21	22	ПС Запад 110 ОШ 1 - ПС Запад 110 ОШ 2			1 000,0	1 000,0	1 000,0		1 000,0		
8	Тр-р	11	111	ПС Восток 110 ОШ 1 - ПС Восток 10 ОШ 1	39,4	347,8	1 000,0	306,1	1 000,0	347,8	306,1	1	1
9	Тр-р	12	112	ПС Восток 110 ОШ 2 - ПС Восток 10 ОШ 2	39,5	347,8	1 000,0	306,1	1 000,0	347,8	306,1	1	1
10	Тр-р	21	121	ПС Запад 110 ОШ 1 - ПС Запад 10 ОШ 1	45,8	217,4	1 000,0	191,3	1 000,0	217,4	191,3	1	1
11	Тр-р	22	122	ПС Запад 110 ОШ 2 - ПС Запад 10 ОШ 2	45,9	217,4	1 000,0	191,3	1 000,0	217,4	191,3	1	1
12	Выкл	111	112	ПС Восток 10 ОШ 1 - ПС Восток 10 ОШ 2									
13	Выкл	121	122	ПС Запад 10 ОШ 1 - ПС Запад 10 ОШ 2									

Рис. В18. Форма **Ветви** после внесения данных о допустимых токах сетевых элементов

При выполнении расчетов УР необходимо учитывать влияние метеорологических факторов на величину ДДТН и АДТН сетевого элемента (особенно воздушной линии электропередачи). В общем случае на величину допустимого тока влияют: интенсивность солнечного излучения, скорость и направление ветра, температура окружающей среды. При этом в расчетах УР возможно учесть только среднее значение температуры окружающей среды на прогнозируемом интервале времени, особенно при выполнении расчетов в перспективе на несколько лет.

Зависимость допустимого тока сетевого элемента от температуры окружающей среды моделируется в виде кусочно-линейной функции, представленной на рис. В19. Данная зависимость формируется по точкам в форме **График_Идоп_от_Т**. Доступ к данной форме можно получить из основного меню **Открыть / Ветви / График_Идоп_от_Т**. У пользователя программного пакета имеется возможность создать несколько температурных зависимостей.

Для того чтобы рассчитать допустимые токи в зависимости от температуры, необходимо выполнить следующие действия:

- 1) внести в форму **Ветви** информацию о номере температурной зависимости в поле «N_I (t) _ДДТН» и «N_I (t) _АДТН». Номер зависимости по умолчанию «1»;

- 2) запустить макрос расчета допустимого тока в зависимости от температуры **Расчеты / Доп. ток от Т...** или кнопка **F9**. Пример окна представлен на рис. В20;
- 3) в поле «Температура» внести данные о температуре окружающей среды для всей расчетной модели;
- 4) значение полей «Аварийная нагрузка (%)» и «Выборка» пока можно оставить по умолчанию, как показано на рис. В20;
- 5) нажать кнопку **ОК**.

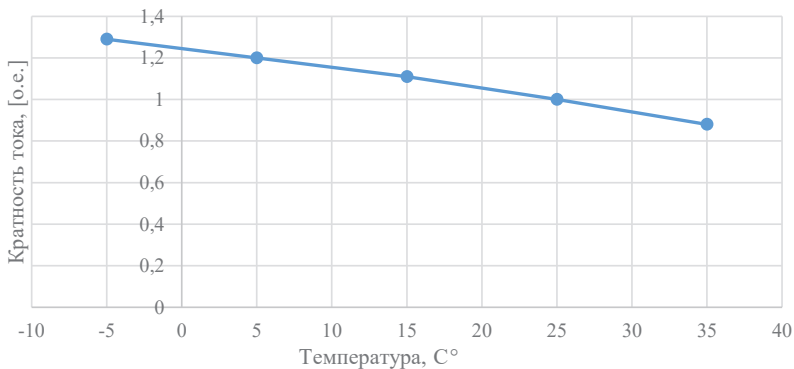


Рис. В19. Кратность допустимого тока в зависимости от температуры (которая по умолчанию есть в ПК RastrWin (номер 1))

Рис. В20. Графический интерфейс макроса коррекции допустимого тока от температуры

В процессе работы макроса в форме «Ветви» заполнится колонка «I_{доп_расч}» и, при наличии расчетных значений тока, вычисляется колонка «I_{загр.}», в которой хранится информация о токовой нагрузке в процентах.

Важно отметить, что макрос расчета допустимых токов необходимо запустить хотя бы один раз, так как он заполняет колонки с данными по расчетным допустимым токам формы «Ветви». Без этих данных процентная токовая загрузка ветвей рассчитываться не будет.

Графическое представление на однолинейной схеме величины токовой загрузки

При выполнении серии расчетов УР не всегда удобно выполнять экспресс-анализ различных параметров в табличном виде. Альтернативой этому является графическое представление результатов расчетов, которое было предложено при выполнении работы № 1. Для коррекции графического представления результатов расчета УР в части информации по ветвям можно воспользоваться следующим алгоритмом:

- 1) в окне **Графика** открыть меню **Дополнительно / Параметры / Текст**;
- 2) выбрать в выпадающем меню **Слой** пункт **Слой 1**, он обычно стоит по умолчанию;
- 3) для вывода дополнительных или изменения отображаемых данных необходимо внести коррекцию в настройки текста текущего слоя графики. Для этого нужно выбрать из списка **Параметр** один из параметров, например **Ветвь 3**. Изменить его цвет на синий и в выпадающем меню **Тип** выбрать пункт **i_{max}**. По умолчанию программа в качестве максимального тока по трансформаторной ветви принимает ток высшей стороны (можно изменять в форме **Ветви** параметр «msi» или «место»). Пример окон для редактирования настройки отображаемого текста представлен на рис. В21;
- 4) выбрать из списка параметров пункт **Ветвь 3**. Изменить его цвет на красный и в выпадающем меню **Тип** выбрать пункт **i_{zag}**. В выпадающем меню **Привязка** выбрать пункт **Ветвь-прав верх**. Убрать галочку с пункта «Направление» (убирает стрелку условно-положительного направления) и поставить галочку в пункте «Видимость».

Для удобства пользователя, в программе есть возможность создать несколько слоев для представления различных наборов результатов расчетов УР на одном и том же графическом представлении. В настоящей работе рекомендуется использовать только «Слой 1».

После выполнения настроек представления различных параметров узлов и ветвей рекомендуется воспользоваться инструментом для редактирования местоположения текстового отображения параметров.

Для этого в окне **Графика** нажать в верхнем меню кнопку **Текст**, которая переключает графический движок ПК RastrWIN в режим редактирования местоположения надписей на графическом отображении результатов расчета УР. Клавиша пробел в этом режиме позволяет поворачивать надпись на 90°.

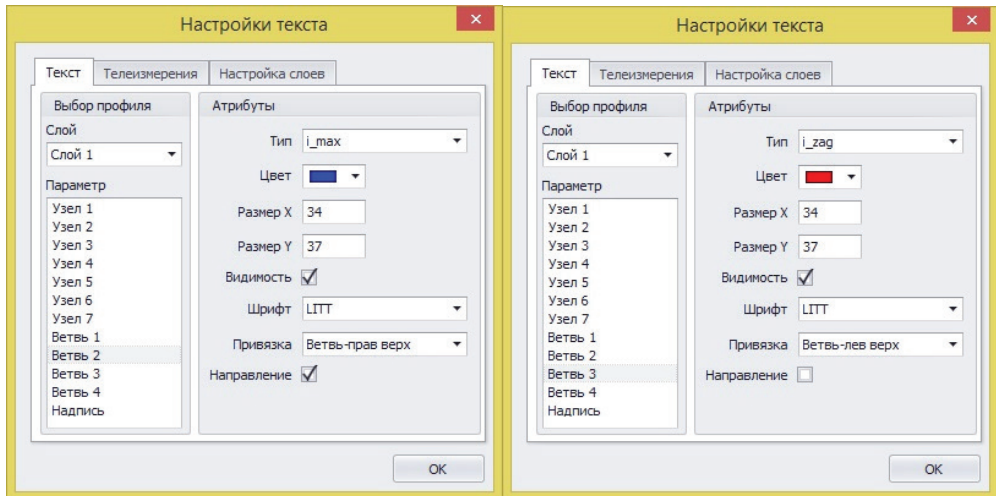


Рис. В21. Настройка параметров отображения по ветвям

Макрос для поочередного отключения ветвей

Альтернативой созданию расчетных сценариев (вариантные расчеты) является простой перебор отключения некоторого множества ветвей и вывод набора контролируемых параметров в таблицу. Для этого надо:

- 1) создать перечень контролируемых параметров —
 - создать таблицы и формы с описанием контролируемых параметров **Файлы / Новый / контр-е величины.kpr**;
 - заполнить формы контролируемых параметров. Для этого в форме **Ветви** нажать правой кнопкой мыши на интересующий параметр и выбрать пункт меню **Добавить в KB**, как представлено на рис. В22 (в качестве контролируемых могут быть любые параметры, а не только токовая нагрузка ветвей). После этого данный параметр должен появиться в форме «Описание».
- 2) Отметить ветви, которые будут отключаться. В форме **Ветви**, в колонке «О» («Отмеченная [O]-(sel)»), поставить галочки напро-

тив ветвей, которые будут поочередно отключаться, например, как показано на рис. В23. Можно отмечать ветви в окне **Графика**, в таком случае они будут отличаться по цвету.

- 3) Запустить расчет. Для выполнения расчетов необходимо запустить встроенный макрос **Расчеты / Выполнить / Варианты / Поочередное отключение отмеченных ветвей**. Результаты расчетов будут сведены и представлены в форме **Значение**.

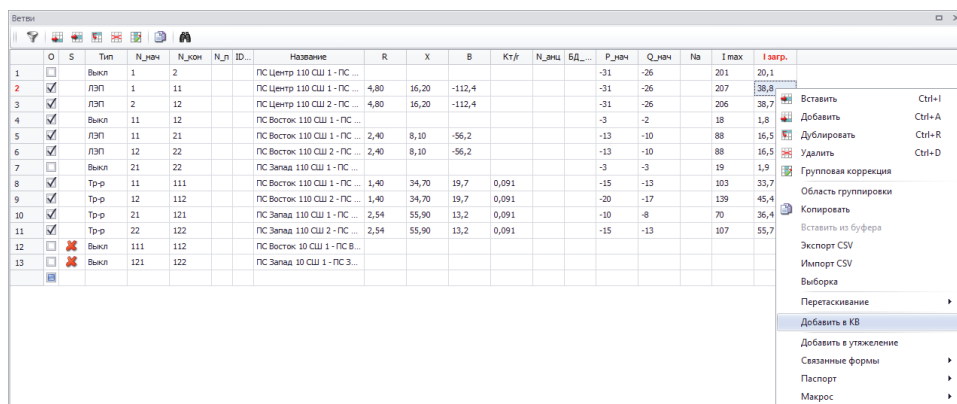


Рис. В22. Меню добавления параметров в список контролируемых величин (форма **Описание**)

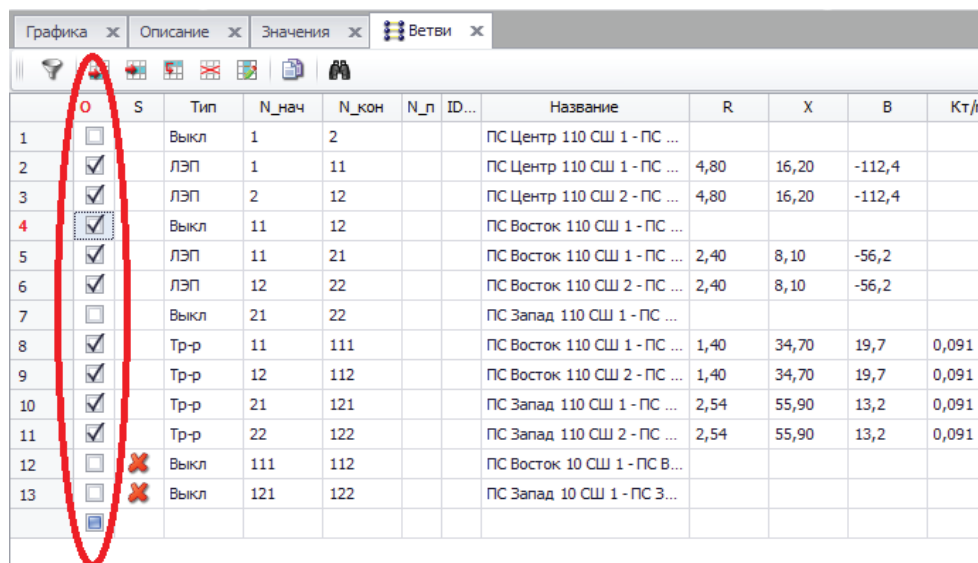


Рис. В23. Пример формирования списка отмеченных ветвей, который приведет к ошибочным расчетам

В список контролируемых параметров за один раз добавляется только одна ячейка таблицы. Нельзя добавить группу ячеек или колонку целиком.

В качестве недостатка использования макроса для поочередного отключения ветвей можно отметить, что на диске не сохраняются варианты схемы и, как следствие, нет возможности загрузить в рабочую область интересующую схемно-режимную ситуацию для более тщательного анализа.

Более существенным недостатком этого макроса является то, что в процессе расчетов не выполняется контроль автоматического отключения несвязанных фрагментов сети, что может приводить к некорректным расчетам. Например, для исследуемой схемы поочередное отключение всех трансформаторов привело к отключению всех шин нагрузки, как показано на рис. В24. Областью применимости данного макроса является перебор отключения ветвей, который не приводит к разделению исходной сети на не связанные между собой фрагменты. В рассматриваемом примере надо сделать одно из двух:

- 1) исключить из расчета трансформаторы на ПС 110 кВ «Запад» и ПС 110 кВ «Восток»;
- 2) включить секционные выключатели на шинах низкого напряжения ПС 110 кВ «Запад» и ПС 110 кВ «Восток».

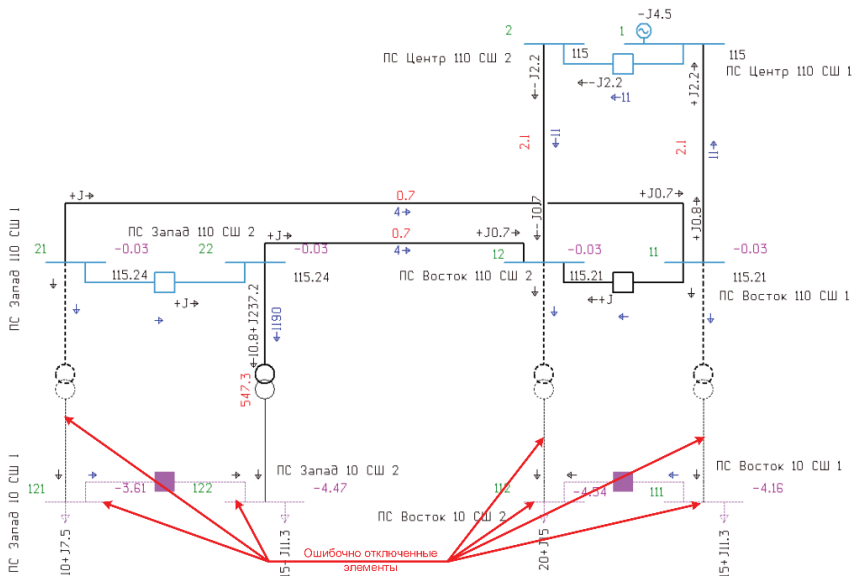


Рис. В24. Пример ошибочно отключенных элементов при запуске макроса для поочередного отключения ветвей

Для проверки наличия перегрузки трансформаторов на ПС рассмотрим второй случай, когда на ПС 110 кВ «Восток» и ПС 110 кВ «Запад» включены секционные выключатели на стороне низкого напряжения (ветви «121–122» и «111–112»). Результаты расчетов будут сведены и представлены в форме «Значение» (рис. В25).

Графика ж												Ветви ж												Узлы ж												Значения ж												Общие ж																																																																							
																																																																																																																							
Ном...												Название												Загр_1 11												Загр_2 12 0												Загр_11 21 0												Загр_12 22 0												Загр_12 112 0												Загр_11 111 0												Загр_21 121 0												Загр_22 122 0											
1												ПС Центр 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 1												82,3												17,4												17,6												36,8												36,7												42,8												42,8																							
2												1 ПС Центр 110 СШ 2 - ПС Восток 110 СШ 2												82,3												17,6												17,4												36,7												36,7												42,8												42,8																							
3												2 ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 2												38,8												38,7												16,5												16,5												34,8												34,7												40,4												40,4											
4												3 ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Запад 110 СШ 1												39,2												39,2												33,4												34,8												34,7												40,8												40,9																							
5												4 ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Запад 110 СШ 2												39,3												39,1												33,4												34,8												34,7												40,8												40,9																							
6												5 ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 10 СШ 1												40,0												40,0												16,6												16,5												73,1												40,4												40,5																							
7												6 ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Восток 10 СШ 2												40,1												39,9												16,5												16,6												73,1												40,4												40,5																							
8												7 ПС Запад 110 СШ 1 - ПС Запад 10 СШ 1												39,9												39,8												17,6												17,7												34,8												34,8												40,1												86,1											
9												8 ПС Запад 110 СШ 2 - ПС Запад 10 СШ 2												39,9												39,8												17,7												17,6												34,8												34,8												86,1																							

Рис. В25. Результат выполнения макроса для поочередного отключения отмеченных ветвей

Лабораторная работа № 4.

Выбор сечений линий электропередач

Постановка задачи

Цель работы — выбор сечения проектируемых ЛЭП.

Исходные данные — модифицированная расчетная модель из предыдущего задания.

Задачи:

- 1) добавить в электрическую сеть одну ПС. Мощность нагрузки этой подстанции равна наибольшей мощности уже существующих ПС. Место размещения новой подстанции выбрать самостоятельно согласно следующим критериям —
 - расстояние до базисного узла не менее 50 км;
 - расстояние до ближайшей существующей подстанции не менее 20 км;
- 2) подключить новую подстанцию к двум уже существующим подстанциям;
- 3) выбрать сечение и количество новых ЛЭП. Метод выбора сечений новых ЛЭП задается руководителем лабораторных работ.
 - Сечение новых ЛЭП должно быть наиболее оптимальным по экономическому критерию;
 - проводники новых ЛЭП не должны быть перегружены по току при отключении одного элемента (ЛЭП, Тр, секция шин ПС) (все новые ЛЭП должны проходить по критерию « $n - 1$ »).

В отчете должно быть:

- 1) в графическом виде однолинейные схемы результирующей электрической сети для нормальной схемы при максимальных и минимальных нагрузках. На схемах показать результаты расчета УР (потоки мощностей по ветвям, потери мощности в ветвях, напряжение во всех узлах, величины нагрузки и генерации), а также токовую загрузку сетевых элементов в процентах. При использовании макроса вариантных расчетов показать также послеаварийные схемы;
- 2) выполненные расчеты, необходимые для выбора сечений новых ЛЭП;

- 3) таблицы вариантных расчетов, с помощью которых выполнено моделирование послеаварийных схем. При использовании макроса для поочередного отключения отмеченных ветвей — таблицы «Описание» и «Значение» с величинами токовых загрузок всех ЛЭП;
- 4) схемы РУ для новой ПС, а также для тех ПС, к которым выполнено подключение новой ПС.

Рекомендованный порядок выполнения работы

На первом шаге выполнения работы необходимо на схеме исходной электрической сети разместить новую ПС с учетом всех требований к ней. Наметить две трассы прохождения ЛЭП для подключения новой ПС к существующим. Измерить линейкой длину полученных трасс и с помощью коэффициента масштаба перевести ее в километры.

Далее необходимо выполнить корректировку расчетной модели. Сначала дополнения вносят в форму **Узлы**, а затем — в форму **Ветви**.

На последнем этапе работы выполняется расчет всех необходимых УР для выбора сечений новых ЛЭП и проверки сечений уже существующих ЛЭП.

Теория и примеры

Выбор и проверка сечений ЛЭП

При составлении алгоритма выбора сечений проектируемых ЛЭП необходимо решить две основные проблемы:

- 1) рассчитать распределение потоков мощностей при неизвестных сечениях проектируемых ЛЭП;
- 2) от выбора сечения проектируемых ЛЭП зависит распределение потоков мощностей в электрической сети, которые в свою очередь влияют на выбор сечений.

Эти две проблемы создают предпосылки для возникновения итерационного процесса выбора сечений ЛЭП.

Первая проблема решается с помощью выбора начальных приближений сечений ЛЭП. Существует две основных стратегии выбора начальных приближений сечений ЛЭП:

- 1) принять для всех проектируемых ЛЭП минимально возможное сечение на данном классе напряжения;
- 2) принять для всех проектируемых ЛЭП максимально возможное сечение на данном классе напряжения.

При выборе первой стратегии могут возникнуть пониженные уровни напряжения при расчете УР. В свою очередь пониженные уровни напряжений приводят к повышенным токам в электрической сети, в результате чего будут завышены сечения ЛЭП; кроме того, могут приводить к нарушению пределов по статической устойчивости. При нарушении пределов по статической устойчивости итерационный процесс расчета УР будет расходящимся, что делает практически невозможным определение токовой загрузки проектируемой ЛЭП и выбор ее сечения.

Пониженных уровней напряжений в электрической сети удастся избежать при выборе второй стратегии. Для дальнейших расчетов рекомендуется использовать только ее: в качестве начального приближения выбирать максимально возможное сечение на данном классе напряжения.

Вторая проблема при выборе сечений проектируемых ЛЭП заключается в том, что изменение сечения и количества ЛЭП на проектируемом участке приводит к изменению распределения потоков мощности в сети, а как следствие, к изменению токовой загрузки. Это может привести к возникновению нескольких итераций перебора всех проектируемых ЛЭП для выбора сечений. С целью уменьшить количество итераций рекомендуется придерживаться следующего принципа выбора очередности: в первую очередь выбирать сечения для ЛЭП с наибольшей токовой загрузкой. Если по первому критерию можно выбрать несколько ЛЭП, то приоритет следует отдавать ЛЭП, которые расположены ближе к источникам питания. Благодаря этому в большинстве случаев можно выбрать сечения ЛЭП за одну итерацию.

Выбор сечения каждой отдельной ЛЭП можно выполнять по следующему алгоритму:

- 1) выбрать начальное приближение сечения ЛЭП;
- 2) рассчитать нормальный УР и определить максимальный ток по каждой ЛЭП;
- 3) выбрать по экономическому критерию наиболее оптимальное сечение новой ЛЭП;
- 4) рассчитать УР с единичным отключением;

- 5) проверить выбранное экономическое сечение по ДДТН; если не проходит, то усилить.

При моделировании схем с отключением одного элемента необходимо воспользоваться макросом вариантных расчетов или макросом для поочередного отключения отмеченных ветвей. Это позволит быстрее перебирать требуемые режимы при изменении сечений ЛЭП.

Описание методов выбора сечения по экономическим критериям приведено в книгах [2, 5]. Таблицы допустимых токовых нагрузок воздушных ЛЭП приведены в справочниках [1, 3, 4].

Пример выбора сечений ЛЭП

К схеме электрической сети (рис. В26) добавим еще одну ПС, которая будет получать питание от ПС 110 кВ «Запад».

В качестве начального приближения сечений проектируемых ЛЭП примем максимально возможное на классе 110 кВ сечение АС-240. Длина проектируемых линий составляет 20 км.

Для удобства корректировок сопротивлений проектируемых ЛЭП можно с помощью MS Excel заранее рассчитать таблицу сопротивлений ЛЭП для всего множества используемых сечений на данном классе напряжения (табл. В4). Это позволит в дальнейшем копировать числа сразу в форму **Ветви**.

Таблица В4

Расчетные значения сопротивлений ЛЭП 110 кВ, длина — 20 км

Сечение	Удельные значения			Расчетные значения			ДДТН +25 °С, А
	R , Ом/км	X , Ом/км	B , мкСм/км	R , Ом	X , Ом	B , мкСм	
АС-70/11	0,428	0,444	−2,550	8,560	8,880	−51,000	265
АС-95/16	0,306	0,434	−2,610	6,120	8,680	−52,200	330
АС-120/19	0,249	0,427	−2,660	4,980	8,540	−53,200	390
АС-150/24	0,198	0,420	−2,700	3,960	8,400	−54,000	450
АС-185/29	0,162	0,413	−2,750	3,240	8,260	−55,000	510
АС-240/32	0,120	0,405	−2,810	2,400	8,100	−56,200	605

Далее необходимо выполнить расчет УР для нормальной схемы (рис. В27), в соответствии с которой выбрать сечения проектируемых ЛЭП по экономическому критерию.

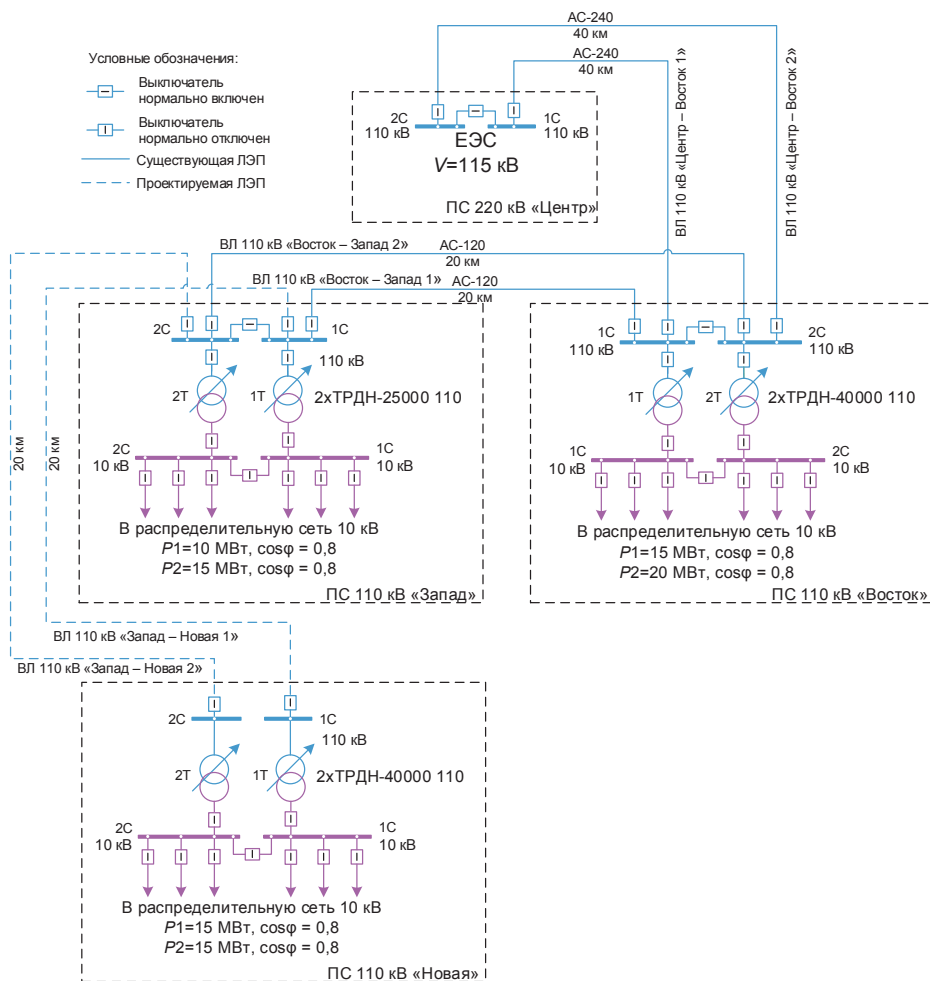


Рис. В26. Схема подключения ПС 110 кВ «Новая» к ПС 110 кВ «Запад»

Максимальный расчетный ток проектируемых ВЛ составляет 112 А. Выполним оценку экономического сечения по методу экономической плотности тока. Примем экономическую плотность тока $j = 1,1$ А/мм², тогда экономическое сечение будет

$$F_{\text{эк}} = I / j = 112 / 1,2 = 93,3 \text{ мм}^2.$$

Ближайшее сечение — АС-95. Примем его для дальнейших расчетов. Перед тем как выполнять проверку по отсутствию превышений ДДТН в послеаварийных схемах, необходимо рассчитать УР для нор-

мальной схемы с новыми сечениями. Результаты расчетов представлены на рис. В28.

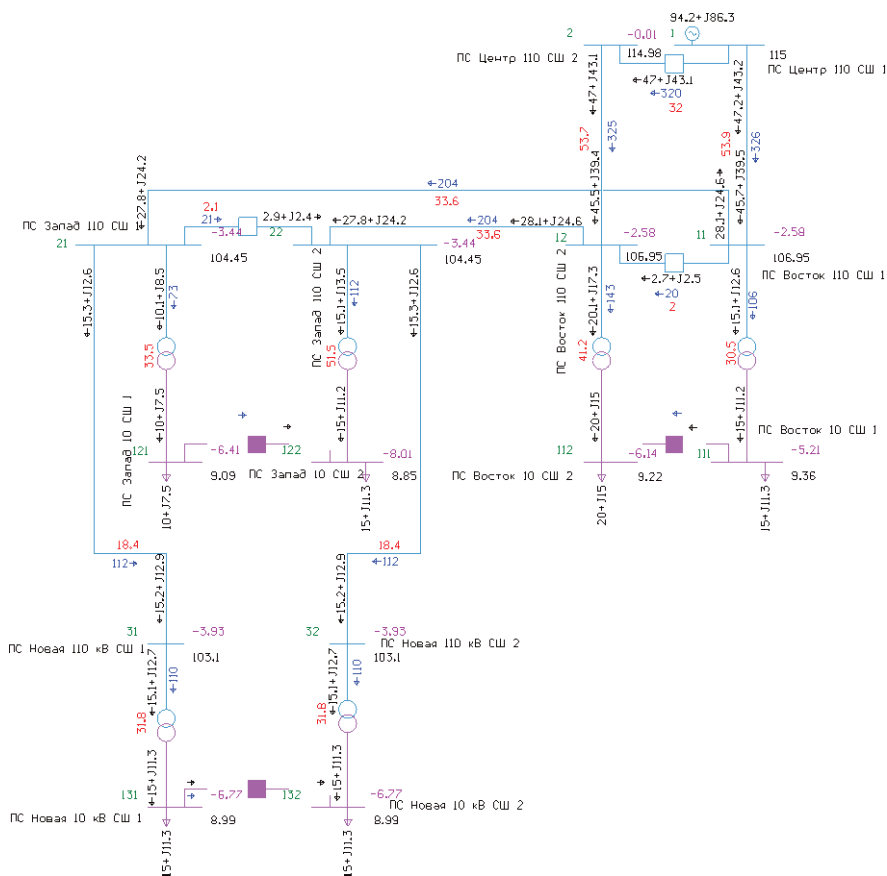


Рис. В27. Результаты расчетов нормальной схемы
для начальных приближений сечений
ВЛ 110 кВ «Запад — Новая 1 (2)»

Для проверки на отсутствие превышения ДДТН сетевых элементов воспользуемся макросом для поочередного отключения отмеченных ветвей. Перед запуском макроса необходимо включить секционные выключатели на стороне низкого напряжения (имитация работы автоматики ввода резерва). Предварительный анализ схемы

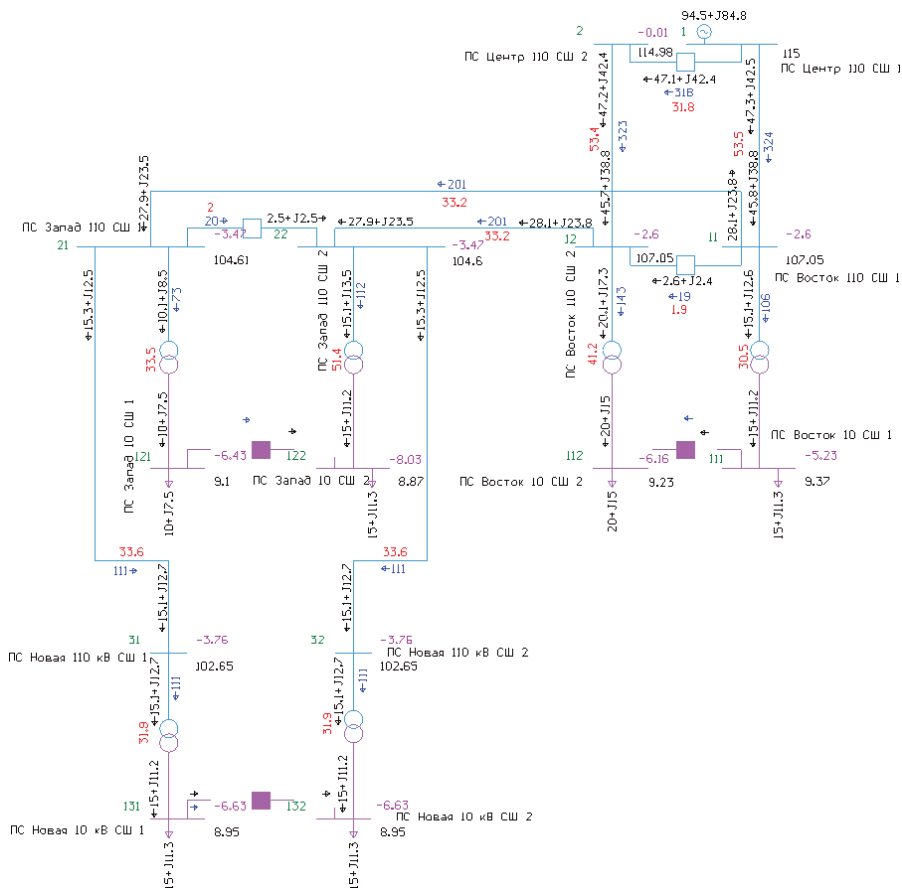


Рис. В28. Результаты расчета УР для экономического сечения проектируемых ВЛ (АС-95)

Номер	Название	I загр._1 2 0	I загр._1 11 0	I загр._11 21 0	I загр._21 31 0
1	ПС Центр 110 СШ 2 - ПС Восток 110 СШ 2		119,9	37,4	37,5
2	1	ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 2	32,4	52,4	33,5
3	2	ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Запад 110 СШ 2	32,5	54,8	34,6
4	3	ПС Запад 110 СШ 1 - ПС Запад 110 СШ 2	31,8	53,5	34,5
5	4	ПС Запад 110 СШ 2 - ПС Новая 110 кВ СШ 2	32,9	55,3	72,7

1 выбрано 5 записей из 5

Конструктор фильтра...

Рис. В29. Результаты расчетов УР в послеаварийных схемах, при отключении 1 ЛЭП

Анализ полученных результатов расчетов УР показал, что существуют схемно-режимные ситуации, когда возникают токовые перегрузки ВЛ, например перегрузка ВЛ 110 кВ «Центр — Восток 1 (2)», при отключении ВЛ 110 кВ «Центр — Восток 2 (1)». Для исключения данной перегрузки необходимо построить новую ВЛ между ПС 110 кВ «Центр» и ПС 110 кВ «Восток». Подключение новой ВЛ выполним к первой секции шин ПС 110 кВ «Центр» и второй секции шин ПС 110 кВ «Восток». Такая схема позволит увеличить надежность электроснабжения при ремонте 2С 110 кВ ПС 220 кВ «Центр». Если ВЛ 110 кВ «Центр — Восток 3» подключить к 1С 110 кВ ПС 110 кВ «Восток», то при отключении этой секции шин и ремонте 1С 110 кВ ПС 220 кВ «Центр» полностью будет потерян транзит между ПС 110 кВ «Восток» и ПС 220 кВ «Центр».

После добавления новой ЛЭП необходимо снова проверить нормальные и послеаварийные УР на отсутствие превышения ДДТН (результаты расчетов представлены на рис. В30).

Номер	Название	I загр._1 2 0	I загр._1 11 1	I загр._11 21 0	I загр._21 31 0
1	ПС Центр 110 СШ 2 - ПС Восток 110 СШ 2		53,4	33,3	33,5
2	1	ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 2	25,5	30,6	32,6
3	2	ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Запад 110 СШ 2	20,8	35,3	33,5
4	3	ПС Запад 110 СШ 1 - ПС Запад 110 СШ 2	20,4	34,6	33,4
5	4	ПС Запад 110 СШ 2 - ПС Новая 110 кВ СШ 2	21,1	35,6	70,1

1 выбрано 5 записей из 5

Конструктор фильтра...

Рис. В30. Результаты расчетов УР в послеаварийных схемах, при отключении 1 ЛЭП после добавления новой ВЛ между ПС 110 кВ «Центр» и ПС 110 кВ «Восток»

Результаты расчетов послеаварийных УР показали, что добавление еще одной ВЛ между ПС 110 кВ «Центр» и ПС 110 кВ «Восток» позволяет исключить превышение ДДТН в послеаварийных схемах (рис. В31).

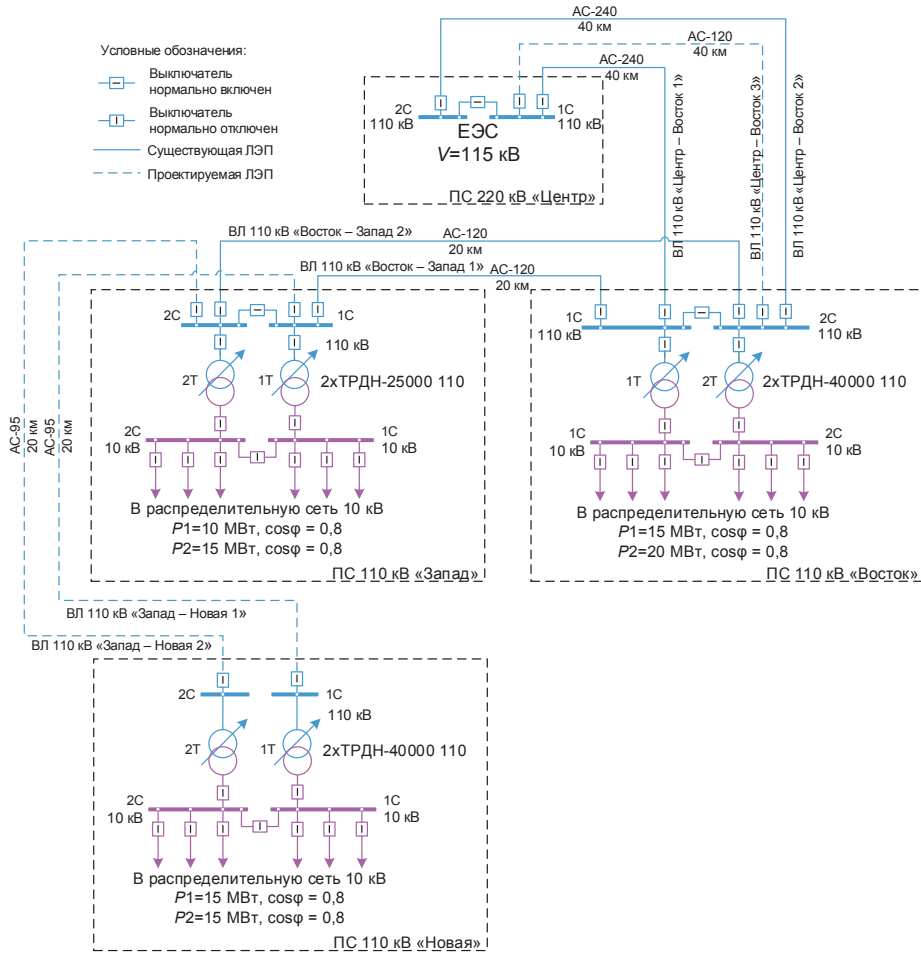


Рис. В31. Схема электрической сети после выбора всех сечений проектируемых ЛЭП

Библиографический список

1. Ананичева, С. С. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : метод. указания / С. С. Ананичева, А. Л. Мызин, С. Н. Шелюг. — 2-е изд., перераб. и доп. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2006. — 48 с.
2. Ананичева, С. С. Проектирование электрических сетей : учеб. пособие / С. С. Ананичева, Е. Н. Котова. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с. — ISBN 978-5-7996-2040-0.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : ЭНАС, 2012. — 376 с. — ISBN 978-5-4248-0049-8.
4. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич, А. Н. Зейлигер, Г. А. Илларионов [и др] ; под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 352 с.
5. Электрические системы : учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов. В 7 т. Т. 2. Электрические сети / под ред. В. А. Веникова. — Москва : Высшая школа, 1971. — 439 с.
6. Электрические системы : учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов. В 7 т. Т. 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения / под ред. В. А. Веникова. — Москва : Высшая школа, 1972. — 368 с.
7. СТО 56947007–29.240.30.010–2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения: стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». — Москва : ФСК ЕЭС, 2007. — [Б. п.]
8. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций : учебник для вузов / Б. Н. Неклепаев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 1986. — 640 с.

9. Лихосовский, Г. С. Главные схемы и электротехническое оборудование подстанций 35–750 кВ / Г. С. Лихосовский, М. Э. Хейфиц ; под ред. М. Э. Хейфица. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Москва : Энергия, 1977. — 464 с.
10. Гуревич, Ю. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, А. А. Окин. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 390 с. — ISBN 5-283-01022-8.
11. Гуревич, Ю. Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова. — Москва : Элекс-КМ, 2008. — 248 с. — ISBN 978-5-93815-045-4.
12. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л. М. Горбунова, М. Г. Портной, Р. С. Рабинович [и др.] ; под ред. С. А. Совалов. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 447 с.
13. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах : монография / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин, В. Г. Неуймин ; под ред. П. И. Бартоломея. — Москва : Флинта : Наука, 2008. — 256 с. — ISBN 978-5-9765-0697-8.
14. Ананичева, С. С. Анализ электроэнергетических сетей и систем в примерах и задачах : учеб. пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг ; [научный редактор Е. Н. Котова] ; М-во образования и науки РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7996-1784-4.
15. Ананичева, С. С. Электроэнергетические системы и сети : учеб. пособие / С. С. Ананичева, С. Н. Шелюг ; науч. ред. С. И. Бартоломей ; М-во образования и науки РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 296 с. — ISBN 978-5-7996-2638-9.
16. Идельчик, В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В. И. Идельчик. — Москва : Энергоатомиздат, 1988. — 287 с. — ISBN 5-283-01103-8.

Учебное издание

Тавлинцев Александр Сергеевич
Семененко Сергей Игоревич
Стаймова Елена Дмитриевна
Шелюг Станислав Николаевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Редактор *И. В. Меркурьева*
Дизайн и корректура *Ю. В. Ершовой*

Подписано в печать 29.03.2023. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,5.
Уч.-изд. л. 6,4. Тираж 30 экз. Заказ № 17.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Для заметок

