

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

К. В. Коротких

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Учебно-методическое пособие по лабораторным занятиям для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 621.311

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический университет»

М. С. Харитонов

Коротких, К. В.

Электроэнергетические системы и сети: учеб.-методич. пособие по лабораторным занятиям для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / **К. В. Коротких**. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 66 с.

Учебно-методическое пособие по лабораторным занятиям содержит исходные данные, указания по выполнению расчётов, требования к структуре, содержанию и оформлению лабораторных работ, описание организации защиты и критерии оценивания.

Табл. 19, рис. 65, список лит. – 5 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 31.05.2023 г., протокол № 09

УДК 621.311

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2023 г.
© Коротких К. В., 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	8
2. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ	9
3. ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ	9
4. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	10
4.1. Общие требования охраны труда	10
4.2. Требования охраны труда перед началом лабораторной работы	11
4.3. Требования охраны труда во время лабораторной работы	11
4.4. Требования охраны труда по окончании лабораторной работы	11
4.5. Требования охраны труда в аварийных ситуациях	12
5. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ RASTRWIN3	12
5.1. Получение студенческой лицензии	12
5.2. Загрузка и сохранение данных	14
5.3. Ввод данных по схеме электрической сети в таблицу «Узлы»	15
5.4. Ввод данных по схеме электрической сети в таблицу «Ветви»	18
5.5. Расчёт установившегося режима	23
5.6. Подготовка графической схемы	23
5.7. Моделирование трансформаторов	25
5.8. Оптимизация режима по реактивной мощности	27
5.9. Анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи	30
5.10. Анализ допустимой токовой загрузки трансформаторов	32
5.11. Анализ полученных результатов	33
6. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	35
6.1. Лабораторная работа № 1. Моделирование линий электропередачи в программном комплексе RastrWin3	35
6.2. Лабораторная работа № 2. Моделирование силовых трансформаторов в программном комплексе RastrWin3	35
6.3. Лабораторная работа № 3. Моделирование устройств регулирования напряжения в программном комплексе RastrWin3	37
6.4. Лабораторная работа № 4. Моделирование компенсирующих устройств реактивной мощности в программном комплексе RastrWin3	39

6.5. Лабораторная работа № 5. Расчёт установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3	41
6.6. Лабораторная работа № 6. Анализ потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети в программном комплексе RastrWin3	44
6.7. Лабораторная работа № 7. Расчёт токов короткого замыкания в программном комплексе RastrWin3	51
6.8. Лабораторная работа № 8. Анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи и трансформаторов в программном комплексе RastrWin3	54
6.9. Лабораторная работа № 9. Расчёт и анализ установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3	58
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	64
Приложение А. Образец титульного листа	65

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «*Электроэнергетические системы и сети*» входит в состав основной профессиональной образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Дисциплина «*Электроэнергетические системы и сети*» является вариативной дисциплиной, формирующей у обучающихся готовность к использованию системы знаний в области использования электроэнергетических сетей и систем для передачи электрической энергии, а также международного и отечественного опыта в этой области.

Целью дисциплины является знакомство обучающихся с основными принципами использования электроэнергетических сетей и систем для передачи электрической энергии.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение теории передачи электрической энергии переменным током, физики процессов, происходящих в электрических сетях и системах, способов моделирования элементов и электрической сети в целом;
- освоение методов расчётов эксплуатационных режимов электроэнергетических сетей и систем;
- приобретение навыков и представлений о требованиях к улучшению режимов электрических сетей и об условиях оптимального управления.

В результате освоения дисциплины студент должен:

- **знать** схемы электроэнергетических систем и сетей, конструктивное выполнение воздушных и кабельных линий электропередачи; основные математические соотношения, характеризующие работу электроэнергетических систем;
- **уметь** применять, эксплуатировать и производить выбор оборудования электроэнергетических систем и сетей;
- **владеть** методами анализа режимов работы электроэнергетических систем; методами расчёта параметров электроэнергетических сетей и систем, навыками исследовательской работы.

Целью лабораторных занятий является знакомство с промышленным программным комплексом RastrWin3, а также получение практических навыков работы в среде программы RastrWin3.

Задачами выполнения лабораторных работ являются:

- закрепление, расширение и углубление знаний, полученных в теоретическом курсе;
- получение знаний в области чтения электрических схем, оптимизации режимов с помощью средств регулирования напряжения, составления схем замещения электрических сетей;

- формирование умения анализировать, использовать исходную информацию, справочную литературу по расчёту параметров элементов электроэнергетической системы.

В результате выполнения лабораторных работ студент должен:

- **знать** способы моделирования электрических сетей;
- **уметь** рассчитывать параметры элементов электроэнергетической системы, составлять схемы замещения электрических сетей;
- **владеть** навыками обработки полученных результатов.

Критерии оценивания различаются для расчётной части и устных ответов при защите лабораторной работы. По результатам выполнения расчётной части и последующей защиты работы выставляется оценка по системе «зачтено / не зачтено» в соответствии с универсальной системой оценивания (табл. 1 и 2).

Таблица 1 – Система и критерии оценивания расчётной части

Система оценок	Критерий
«зачтено»	Методика и порядок расчёта верные. Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки
«зачтено»	Методика и порядок расчета верные. Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчётах, которые не привели к существенному искажению результата
«зачтено»	Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчётах, обусловленные неполным пониманием принципа расчёта, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения
«не зачтено»	Применена неверная методология, нарушен порядок расчёта, имеется серьёзная системная ошибка, обусловленная непониманием принципа расчёта и приведшие к ошибочному результату

Таблица 2 – Система и критерии оценивания защиты лабораторных работ

Система оценок	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
Критерий				
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

1. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Завершённый отчёт по лабораторной работе должен отражать основные результаты, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследования, и выводы о характере и причинах полученных зависимостей. Отчёт выполняется по указанию преподавателя индивидуально каждым студентом либо в форме общего отчета на бригаду студентов, совместно проводивших экспериментальное исследование на одной установке.

Отчёт должен содержать обязательные структурные элементы:

- титульный лист;
- введение;
- задание к лабораторной работе;
- расчётная часть;
- заключение.

Титульный лист:

Форма титульного листа и образец его заполнения приведены в Приложении А.

Введение:

В разделе «Введение» кратко формулируются цель и задачи лабораторной работы.

Техническое задание:

Лабораторная работа должна выполняться на основе задания, содержащего исходные данные для расчёта, схему электрической сети.

Расчётная часть:

Расчётная часть должна содержать основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений.

Заключение:

В заключении сообщаются основные результаты выполненной работы, содержащие анализ полученных результатов.

Графическая часть лабораторной работы должна включать следующие материалы:

- схему электрической сети;
- схему замещения электрической сети;
- графическое изображение схемы электрической сети в программном комплексе RastrWin3;
- графики.

2. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ

Лабораторные работы допускается оформлять в редакторе MS Word. Для расчётов, построения графиков и электрических схем рекомендуется использование комплексов Mathcad, MS Excel, MS Visio.

Общие требования:

Пояснительная записка должна содержать обязательные структурные элементы (раздел 1). Текстовая часть пояснительной записки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(Рисунок 1)», «приведены в таблице 1». Подписи таблиц и рисунков по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание посередине). Ссылки на литературу оформляются в [скобках]. Нумерация источников – сквозная по первому упоминанию.

Требования при оформлении в MS Word:

- поля документа: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 15 мм.
- шрифт – Times New Roman, размер (кегель) – 13–14;
- выравнивание шрифта – по ширине;
- расстановка переносов – автоматическая;
- межстрочный интервал – 1,5;
- отступ первой строки абзаца – 1,25 см;
- выравнивание рисунков – по центру без отступа;
- выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа;
- нумерация страниц – по центру внизу страницы;
- расчётная часть должна иметь чёткую структуру. Таблицы и рисунки должны иметь названия с конкретным указанием отображаемых параметров.

3. ТРЕБОВАНИЯ ПО ЗАЩИТЕ

Защита лабораторной работы проводится после предоставления завершённой работы и устранения всех замечаний по расчётной части.

Защита лабораторной работы проходит в форме индивидуальной беседы преподавателя со студентом на основе материалов отчёта по лабораторной работе в часы индивидуальных или групповых консультаций преподавателя.

4. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

4.1. Общие требования охраны труда

Безопасность жизнедеятельности при проведении лабораторных работ в лабораториях кафедры энергетике обязательна для профессорско-преподавательского состава, учебно-вспомогательного персонала и студентов.

К проведению лабораторных работ допускаются лица, прошедшие инструктаж с росписью в журнале. Инженер, обслуживающий лабораторию, должен иметь группу допуска с ежегодной проверкой. В лаборатории должна быть медицинская аптечка с набором медикаментов первой медицинской помощи, а также лаборатория должна быть укомплектована средствами пожаротушения. На видном месте должна висеть инструкция по противопожарной технике безопасности.

Во время проведения занятий запрещено находиться в лаборатории в верхней одежде, либо размещать верхнюю одежду в помещении лаборатории. Перед проведением лабораторных занятий студенты обязаны изучить лабораторную работу. Перед началом работы инженер или преподаватель проверяет исправность стендов. Без разрешения преподавателя проведение лабораторных работ запрещается. Запрещается изменять схему лабораторной работы. При проведении лабораторных работ на столах не должно быть ничего из посторонних предметов. Всякие работы по устранению неисправностей под напряжением категорически запрещаются. При сборке схемы применяют только стандартные провода с наконечниками. При возникновении неисправностей стенд должен быть немедленно отключен от сети.

Запрещается оставлять без присмотра работающие стенды. При появлении запаха гари немедленно отключить стенд. В случае поражения электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

Ответственный за проведение лабораторных работ уходит последним из лаборатории, убедившись, что рабочее место убрано, а стенды отключены.

При эксплуатации действующих электроустановок запрещается использовать оборудование в условиях, не соответствующих требованиям инструкции организации-изготовителей, или оборудование, имеющее неисправности, которые в соответствии с инструкцией по эксплуатации могут привести к пожару, а также эксплуатировать провода и кабели с поврежденной или потерявшей защитные свойства изоляцией; пользоваться поврежденными розетками, рубильниками, другими электроустановочными изделиями.

4.2. Требования охраны труда перед началом лабораторной работы

- осмотреть состояние помещения: достаточна ли освещенность, работает ли вентиляция проветривания помещения, позволяет ли температура в помещении комфортно проводить работы без верхней одежды, не загромождено ли место проведения занятий посторонними предметами;
- осмотреть состояние электрических соединений, рубильников, автоматов и прочих переключающих средств;
- проверить наличие средств защиты;
- убрать все посторонние предметы, которые могли бы создавать неудобство в сборке схемы лабораторной работы;
- если необходимо, вывесить предупреждающие плакаты;
- лабораторная работа проводится только с исправными приборами;
- руководитель перед началом работы проводит инструктаж по технике безопасности и контролирует весь процесс работы;
- к моменту проведения работ все стенды должны быть проверены и готовы;
- все студенты должны расписаться в контрольном листе;
- студенты должны внимательно изучить описание работы, при необходимости выяснить неясные моменты.

4.3. Требования охраны труда во время лабораторной работы

- лабораторная работа проводится только в присутствии преподавателя;
- на проведение лабораторной работы разрешение дает лично руководитель занятий после проверки правильно собранной схемы;
- руководитель должен следить, чтобы в схеме не было открытых оголенных проводов. При обнаружении недостатков такая работа должна быть немедленно приостановлена;
- во время проведения лабораторной работы все проходы должны быть освобождены, доступ к стендам должен быть свободным;
- во время проведения лабораторной работы запрещается оставлять включенный стенд без присмотра;
- при выявлении запаха гари следует немедленно обесточить стенд и доложить руководителю.

4.4. Требования охраны труда по окончанию лабораторной работы

- по окончанию лабораторной работы стенд обесточивается, все приборы и соединительные провода отсоединяются и убираются;
- о выявленных неисправностях доложить руководителю занятий;

- выключить освещение лаборатории, закрыть помещение на замок.

4.5. Требования охраны труда в аварийных ситуациях

- при возникновении неисправностей во время проведения лабораторной работы необходимо немедленно обесточить стенд;
- при обнаружении пожара необходимо:
 - прекратить работу, оповестить окружающих о пожаре;
 - сообщить о пожаре на вахту, сообщить о возгорании в пожарную охрану по тел. **01** или по тел. **101 (112)** мобильной связи, сообщить при этом точное место пожара, что горит, свою фамилию;
 - принять меры по эвакуации людей и спасению оборудования.
 - отключить от сети электрооборудование;
 - приступить к тушению пожара своими силами с помощью имеющихся подручных средств пожаротушения;
 - если погасить очаг горения не представляется возможным, необходимо плотно закрыть окно, дверь, не запирая замок, и покинуть опасную зону.
- при поражении электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему. При необходимости вызвать скорую помощь по тел. **03** или по тел. **103 (112)** мобильной связи.

5. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ RASTRWIN3

5.1. Получение студенческой лицензии

Программный комплекс RastrWin3 предназначен для решения задач по расчёту, анализу и оптимизации режимов электрических систем и сетей.

В России основными пользователями являются:

- Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЦДУ ЕЭС) и его филиалы;
- Федеральная Сетевая Компания (ФСК) и её подразделения;
- Территориальные АО-Энерго и распределительные сетевые компании (РСК);
- Проектные и научно-исследовательские институты.

RastrWin3 может использоваться для выполнения курсовых и дипломных проектов.

Студенческая лицензия является бесплатной и позволяет пользоваться всеми функциями программы при расчёте электрических сетей объёмом до 60 узлов.

1. Скачивается и устанавливается программа-инсталлятор RastrWin3 с официального сайта www.rastrwin.ru (рис. 1).

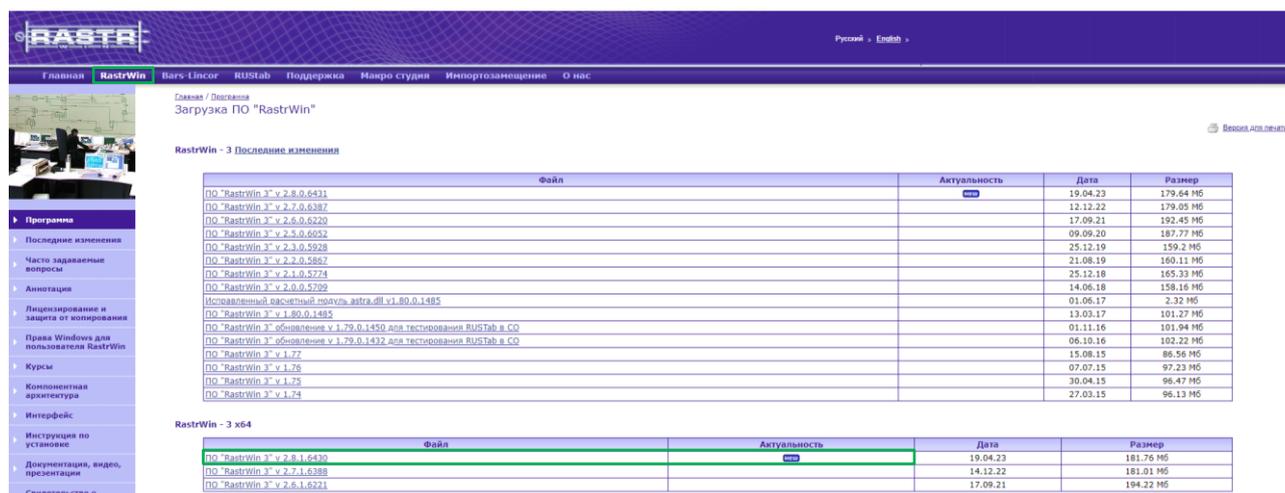


Рисунок 1 – Скачивание программы-инсталлятора с официального сайта

2. После открытия программы **RastrWin3** в диалоговом окне **Помощь – О программе** ввести числовой код организации 11111, а в графе «Пользователь» заполнить название ВУЗа и специальность (рис. 2).

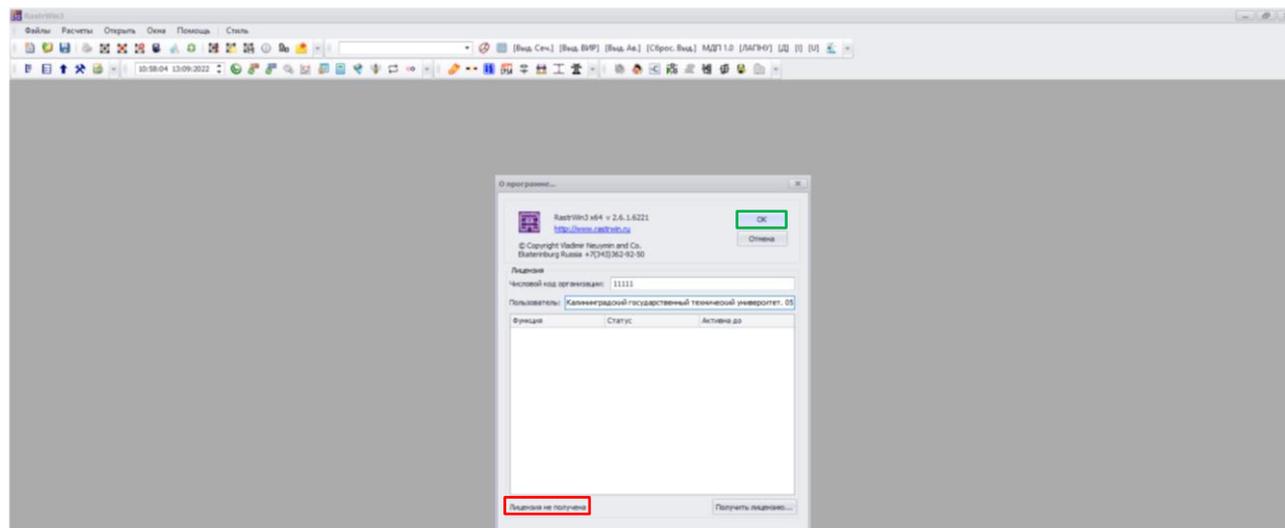


Рисунок 2 – Заполнение полей диалогового окна «О программе»

3. В папке **Мои документы/RastrWin3** найти файл **ИмяКомпьютера_info.dat**. Отправить этот файл на электронную почту license@rastrwin.ru.

4. В ответ, в течение одного рабочего дня, придёт файл **ИмяКомпьютера_license.dat**.

5. Сохранить этот файл в папку **Мои документы/RastrWin3**.

6. Для проверки наличия лицензии после открытия программы **RastrWin3** в диалоговом окне **Помощь – О программе** отобразится соответствующая информация (рис. 3).

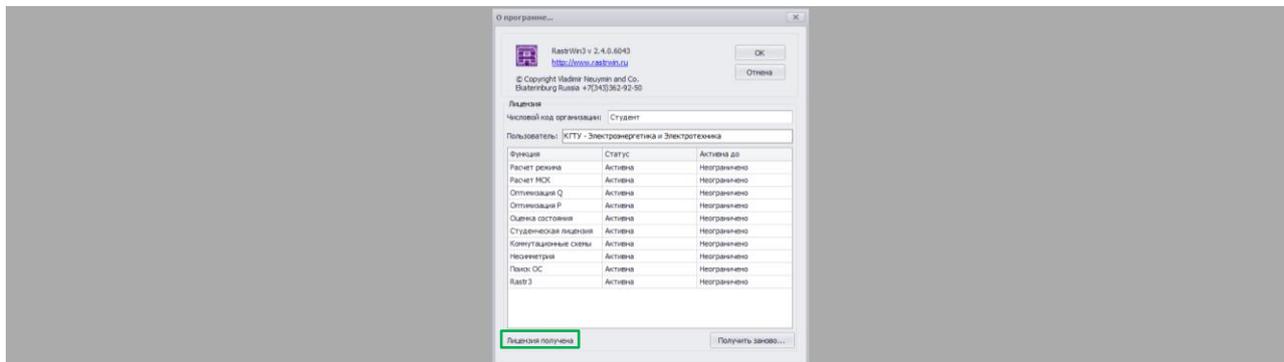


Рисунок 3 – Информация о наличии студенческой лицензии программы

5.2. Загрузка и сохранение данных

Перед началом работы с новой схемой используются команды **Файлы – Новый**, отмечаются галочкой типы файлов: **режим.rg2**, **трансформаторы.rg2**, **графика.rg2**, **анцапфы.rg2** (рис. 4).

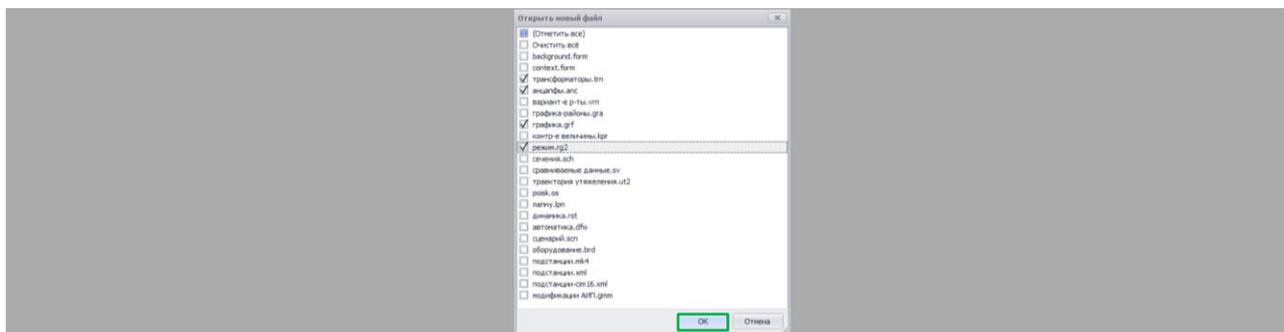


Рисунок 4 – Окно начала работы с новой схемой в RastrWin3

Для сохранения данных используются команды **Сохранить как** и **Сохранить все** (рис. 5).

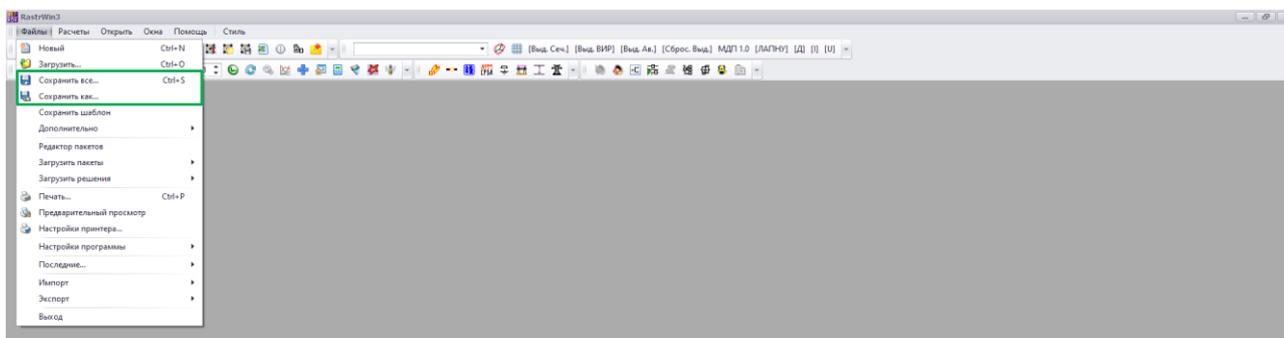


Рисунок 5 – Сохранение данных в RastrWin3

Команда **Сохранить все** производит сохранение данных под последним использованным именем, поэтому при первоначальном вводе данных следует использовать команду **Сохранить как**.

При работе с программой загружаются файлы разных типов (рис. 6).

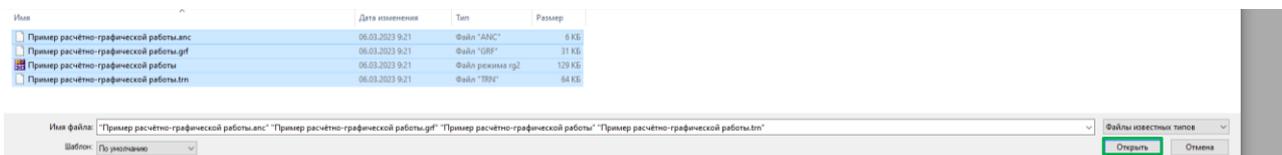


Рисунок 6 – Загрузка данных в RastrWin3

5.3. Ввод данных по схеме электрической сети в таблицу «Узлы»

Команды открытия окон с текстовой и графической информацией сосредоточены в меню **Открыть**.

Для задания узлов сети выполнить команду **Открыть – Узлы**.

Минимально необходимой информацией для каждого узла является его номер (**Номер**), название (**Название**) и номинальное напряжение (**U_ном**) в кВ (рис. 7).



Рисунок 7 – Задание узлов сети в RastrWin3

При обычном расчете режима в электрической сети должен существовать хотя бы один узел, принимающий на себя возникающие небалансы мощности. Такой узел называется балансирующим (базисным). Задаётся его номер (**Номер**), название (**Название**), номинальное напряжение (**U_ном**) в кВ и заданный модуль напряжения (**V_зд**) в кВ, равный $105\%U_{ном}$ (рис. 8).



Рисунок 8 – Задание базисного узла сети в RastrWin3

Для каждого узла нагрузки задаётся его номер (**Номер**), название (**Название**), номинальное напряжение (**U_ном**) в кВ, активная (**P_n**) в МВт и реактивная (**Q_n**) в МВАр мощности потребления (рис. 9).



Рисунок 9 – Задание узлов нагрузки сети в RastrWin3

При наличии в узле шунтов на землю – батарей статических конденсаторов (БСК) или шунтирующих реакторов (ШР) – задаются их номера (**Номер**), названия (**Название**), номинальные напряжения (**U_ном**) в кВ, проводимости (**B_ш**) в мкСм (рис. 10).

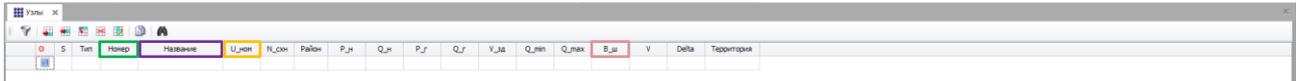


Рисунок 10 – Задание батарей статических конденсаторов, шунтирующих реакторов в RastrWin3

Проводимость шунтирующих реакторов [1]:

$$B_{\text{ш}} = \frac{Q_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot 10^6, \quad (1)$$

где $Q_{\text{НОМ}}$ – номинальная реактивная мощность шунтирующего реактора, МВАр;
 $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение шунтирующего реактора, кВ.

Проводимость батарей статических конденсаторов [1]:

$$B_{\text{ш}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot C_{\text{НОМ}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{НОМ}}$ – номинальная частота сети, Гц;

$C_{\text{НОМ}}$ – номинальная ёмкость батареи статических конденсаторов, мкФ.

Ёмкостной характер отражается знаком минус, индуктивный – знаком плюс.

Автотрансформаторы, трёхобмоточные трансформаторы, трансформаторы с расщеплённой обмоткой представляются по схеме трёхлучевой звезды (обмотка высшего напряжения, обмотка среднего напряжения, обмотка низшего напряжения) с промежуточным узлом (средняя точка или нейтраль) – 4 узлами. Напряжения обмотки высшего напряжения и средней точки совпадают [2].

Двухобмоточные трансформаторы представляются обмоткой высшего напряжения и обмоткой низшего напряжения – 2 узлами [2].

Пример 5.3. Для схемы электрической сети (рис. 11) задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Базисным узлом является энергосистема. В таблицах 3 – 4 представлены исходные данные для расчёта.

Продолжение таблицы 3

№	Параметр	Трансформаторы				
		Т-1		Т-2, Т-3		
10	ΔP_x , кВт	27		14		
11	ΔP_k , кВт	140		58		
12	Регулирование напряжения	РПН $\pm 16 \times 1\%$		РПН $\pm 16 \times 1\%$		
-	Нагрузка	P, МВт	Сеть среднего напряжения	12,5	-	
		Q, МВАр		5,0		
		P, МВт	Сеть низкого напряжения	10,0	Сеть низкого напряжения	8,0
		Q, МВАр		4,0		3,2

Таблица 4 – Параметры батареи статических конденсаторов

Наименование	Марка	$U_{ном}$, кВ	Мощность ступени ($Q_{ном}$), МВАр	C, мкФ
БСК-1	БСК-110-34	110	34	8,94

Решение.

Данные по узлам сети в программном комплексе RastrWin3 (рис. 12).

ID	S	Тип	Номер	Название	$U_{ном}$	$N_{кон}$	Район	P_n	Q_n	P_g	Q_g	V_{3a}	Q_{3a}	Q_{max}	V_{3a}	Y	Delta	Территория	
1		База	1	Энергостанция	110							115,5				115,50			
2		Нагр	2	1 секция шин 110 кВ	110											110,00			
3		Нагр	3	2 секция шин 110 кВ	110											110,00			
4		Нагр	4	Обходная система шин 110 кВ	110											110,00			
5		Нагр	5	Обточка высшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	115											115,00			
6		Нагр	6	Средняя точка трехобмоточного трансформатора Т-1	115											115,00			
7		Нагр	7	Обточка среднего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	11			12,5	5,0							11,00			
8		Нагр	8	Обточка низшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	7			10,0	4,0							6,60			
9		Нагр	9	1 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Тевенюк"	110											110,00			
10		Нагр	10	2 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Тевенюк"	110											110,00			
11		Нагр	11	Обточка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2	115											115,00			
12		Нагр	12	Обточка низшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2	6			8,0	3,2							6,30			
13		Нагр	13	Обточка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3	115											115,00			
14		Нагр	14	Обточка низшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3	6			8,0	3,2							6,30			
15		Нагр	15	Батарея статических конденсаторов (БСК-1)	110											-2 808,0	110,00		

Рисунок 12 – Пример ввода данных по узлам сети в программе RastrWin3

5.4. Ввод данных по схеме электрической сети в таблицу «Ветви»

Для задания ветвей сети выполнить команду **Открыть – Ветви**.

При вводе данных по ветвям задаются номера узлов, ограничивающих ветвь ($N_{нач}$ – начало ветви и $N_{кон}$ – конец ветви) (рис. 13).

S	Тип	$N_{нач}$	$N_{кон}$	ID	Группы	Название	R	X	B	KTR	$N_{нач}$	$B_{нач}$	$P_{нач}$	$Q_{нач}$	Na	Tmax	T_start	

Рисунок 13 – Задание ветвей в RastrWin3

В графе S можно изменить состояние ветви (отключение ветви с двух сторон; отключение ветви в начале узла; отключение ветви в конце узла) (рис. 13).

Для линий электропередачи задаются номера узлов, ограничивающих ветвь (**N_нач**, **N_кон**), активное (**R**), реактивное (**X**) сопротивления и проводимость на землю (**B**), чей емкостной характер отражается знаком минус (рис. 14).

Рисунок 14 – Задание линий электропередачи в таблице «Ветви» в RastrWin3

Активное сопротивление линии электропередачи, Ом [1]:

$$R = R_0 \cdot l, \quad (3)$$

где R_0 – удельное активное сопротивление линии электропередачи (ЛЭП), Ом/км, при температуре провода +20 °С;

l – длина ЛЭП, км.

Реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом [1]:

$$X = X_0 \cdot l, \quad (4)$$

где X_0 – удельное реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом/км.

Емкостная проводимость ЛЭП, мкСм [1]:

$$B = B_0 \cdot l, \quad (5)$$

где B_0 – удельная емкостная проводимость линии электропередачи, мкСм/км.

Параметры (R_0 , X_0 , B_0) определяются из справочника по электрическим сетям [3].

Для трансформаторов (Тр-р) задаются номера узлов, ограничивающих ветвь (**N_нач** и **N_кон**), активное (**R**), индуктивное (**X**) сопротивления и коэффициент трансформации (**K_{Т/Г}**) (рис. 15).

Рисунок 15 – Задание трансформаторов в таблице «Ветви» в RastrWin3

При вводе данных о трансформаторных ветвях важен порядок задания номеров узлов, которые их ограничивают [2]:

Для двухобмоточных трансформаторов начальным (**N_нач**) должен стоять номер узла, к напряжению которого приведено активное (**R**) и индуктивное (**X**) сопротивления трансформатора, чаще всего это узел высшего напряжения, тогда конечным (**N_кон**) будет номер узла низшего напряжения.

Для трёхобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов, трансформаторов с расщеплённой обмоткой число ветвей – 3:

1 ветвь – номер начального узла (**N_нач**), к напряжению которого приведено активное (**R**) и индуктивное (**X**) сопротивления трансформатора, чаще все-

го это узел высшего напряжения, тогда конечным (**N_кон**) будет номер узла, соответствующий средней точке;

2 ветвь – номер начального узла (**N_нач**), соответствующий средней точке трансформатора, к напряжению которого приведено активное (**R**) и индуктивное (**X**) сопротивления трансформатора, тогда конечным (**N_кон**) будет номер узла, соответствующий обмотке среднего напряжения трансформатора;

3 ветвь – номер начального узла (**N_нач**), соответствующий средней точке трансформатора, к напряжению которого приведено активное (**R**) и индуктивное (**X**) сопротивления трансформатора, тогда конечным (**N_кон**) будет номер узла, соответствующий обмотке низшего напряжения трансформатора.

Коэффициент трансформации ($K_{т/г}$) – отношение напряжения конечного узла (**N_кон**) к напряжению начального узла (**N_нач**), т.е. это, как правило, отношение низшего напряжения к высшему. Для трансформаторов заполнение этого поля обязательно, даже если это единица.

Активное сопротивление двухобмоточного трансформатора, Ом [1]:

$$R = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2}, \quad (6)$$

где ΔP_K – потери короткого замыкания трансформатора, кВт;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение обмотки соответствующего напряжения трансформатора, кВ;

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Индуктивное сопротивление двухобмоточного трансформатора, Ом [1]:

$$X = \frac{u_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (7)$$

где u_K – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Активное сопротивление трёхобмоточного трансформатора, Ом [1]:

$$R = R_B = R_C = R_H = \frac{0,5 \cdot \Delta P_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} \quad (8)$$

Активное сопротивление обмоток высшего и среднего напряжения автотрансформатора, Ом [1]:

$$R_B = R_C = \frac{0,5 \cdot \Delta P_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} \quad (9)$$

Активное сопротивление обмотки низшего напряжения автотрансформатора, Ом [1]:

$$R_H = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} \quad (10)$$

Индуктивное сопротивление обмотки высшего напряжения трёхобмоточного трансформатора, автотрансформатора, Ом [1]:

$$X_B = \frac{u_{KB} \cdot U_{\text{НОМВН}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (11)$$

где $U_{\text{НОМВН}}$ – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения, кВ;

u_{KB} – напряжение короткого замыкания обмотки высшего напряжения трансформатора, % [1]:

$$u_{KB} = 0,5(u_{K,B-C} + u_{K,B-H} - u_{K,C-H}), \quad (12)$$

где $u_{K,B-C}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и среднего напряжений трансформатора, %;

$u_{K,B-H}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и низшего напряжений трансформатора, %;

$u_{K,C-H}$ – напряжение короткого замыкания между обмотками среднего и низшего напряжений трансформатора, %.

Приведённое индуктивное сопротивление обмотки среднего напряжения трёхобмоточного трансформатора, автотрансформатора, Ом [1]:

$$X_C = \frac{u_{KC} \cdot U_{\text{НОМВН}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (13)$$

где u_{KC} – напряжение короткого замыкания обмотки среднего напряжения трансформатора, % [1]:

$$u_{KC} = 0,5(u_{K,B-C} + u_{K,C-H} - u_{K,B-H}) \quad (14)$$

Приведённое индуктивное сопротивление обмотки низшего напряжения трёхобмоточного трансформатора, автотрансформатора, Ом [1]:

$$X_H = \frac{u_{KH} \cdot U_{\text{НОМВН}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}}, \quad (15)$$

где u_{KH} – напряжение короткого замыкания обмотки низшего напряжения трансформатора, % [1]:

$$u_{KH} = 0,5(u_{K,B-H} + u_{K,C-H} - u_{K,B-C}) \quad (16)$$

Активное сопротивление трансформатора с расщеплённой обмоткой низкого напряжения, Ом [1]:

$$R = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} \quad (17)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора с расщеплённой обмоткой низкого напряжения, Ом [1]:

$$X = \frac{u_K \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} \quad (18)$$

где u_K – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Пример 5.4. Для схемы электрической сети (рис. 11) построить схему замещения, задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3.

Решение.

Схема замещения электрической сети приведена на рисунке 16.

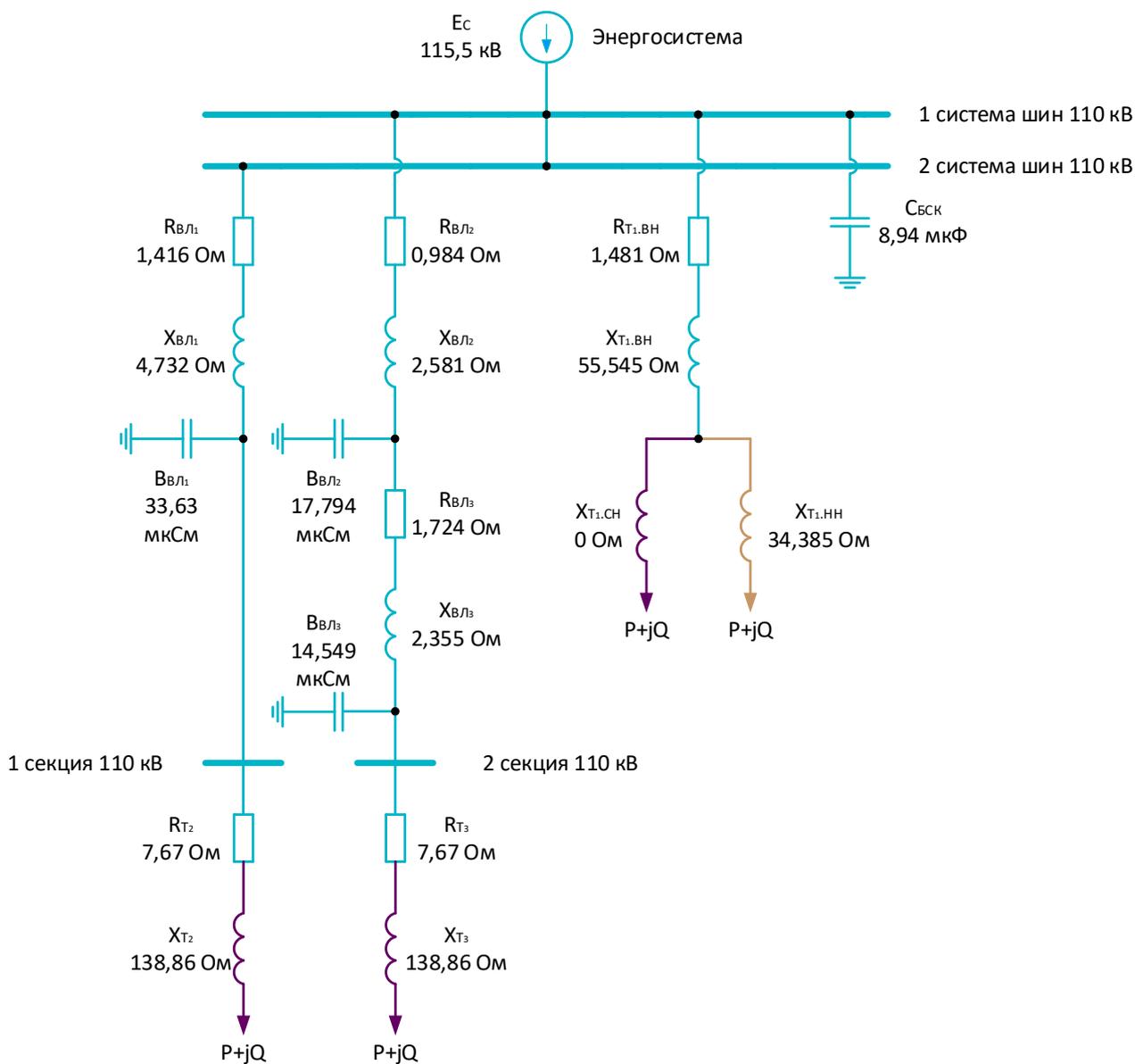


Рисунок 16 – Пример схемы замещения электрической сети

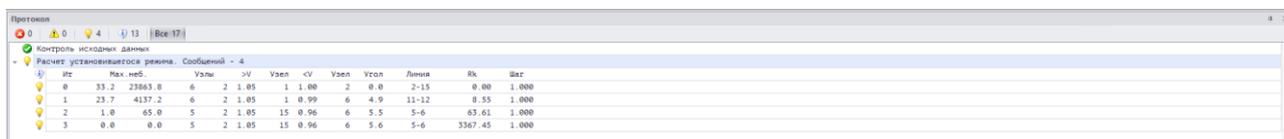
Данные по ветвям сети в программном комплексе RastrWin3 приведены на рисунке 17.

№	S	Тип	N_мен	N_кон	N_л	ID Группы	Название	R	X	B	Кл.р	N_мщ	БД_мщ	P_мен	Q_мен	Na	I_max	1 мкФ
1		Высл	1	2			Энергосистема - 1 система шин 110 кВ								-13 125		65 908	
2		Высл	2	3			1 система шин 110 кВ - 2 система шин 110 кВ											
3		Высл	2	4			1 система шин 110 кВ - Обходная система шин 110 кВ											
4		Высл	2	5			1 система шин 110 кВ - Область высшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1								11 364		59 644	
5		Трп	5	6			Область высшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1 - Седанная точка трехобмоточного трансформатора Т-1	1,48	55,55		1,000							
6		Трп	6	7			Седанная точка трехобмоточного трансформатора Т-1 - Область среднего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	1,48			0,096		-32				163	
7		Трп	6	8			Седанная точка трехобмоточного трансформатора Т-1 - Область низшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	1,48	34,39		0,060		-1	-19			96	
8		ЛЭЛТ	3	9			2 система шин 110 кВ - 1 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Узловская"	1,42	4,73		-33,6						1	
9		ЛЭЛТ	2	10			1 система шин 110 кВ - 2 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Узловская"	2,71	4,93		-32,3						1	
10		Высл	9	11			1 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Узловская" - Область высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2								11 364		59 644	
11		Трп	11	12			Область высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2 - Область среднего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2	7,67	138,86		0,057						19	
12		Высл	10	13			2 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Узловская" - Область высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3								11 364		59 644	
13		Трп	13	14			Область высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3 - Область низшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3	7,67	138,86		0,057						19	
14		Высл	2	15			1 система шин 110 кВ - Батарея статических конденсаторов (БСК-1)											19

Рисунок 17 – Пример ввода данных по схеме электроэнергетической сети в таблицу «Ветви» программы RastrWin3

5.5. Расчёт установившегося режима

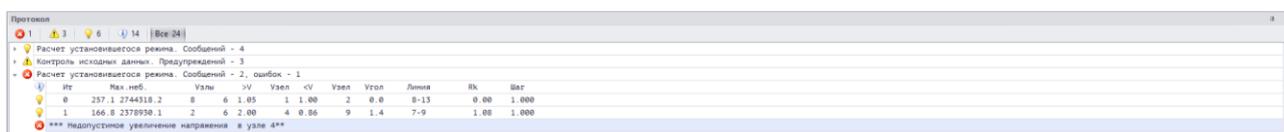
Для расчёта установившегося режима нужно перейти в меню **Расчёт** и выбрать команду **Режим** или нажать клавишу **F5**. В процессе расчёта в протокол выдаётся таблица сходимости, в которой отображаются величины, характеризующие итерационный процесс метода Ньютона (рис. 18) [2].



Итер	Max. нед.	Узел	<V	Узел	<V	Узел	Угол	Линия	В%	Ват		
0	33.2	23863.8	6	2	1.05	1	1.00	2	0.0	2-15	0.00	1.000
1	23.7	4137.2	6	2	1.05	1	0.99	6	4.9	11-12	0.55	1.000
2	1.0	65.0	5	2	1.05	15	0.96	6	5.5	5-6	63.61	1.000
3	0.0	0.0	5	2	1.05	15	0.96	6	5.6	5-6	3367.45	1.000

Рисунок 18 – Успешное завершение расчёта сети в окне протокола RastrWin3

При возникновении ошибок (рис. 19) – устранить и повторить расчёт.



Итер	Max. нед.	Узел	<V	Узел	<V	Узел	Угол	Линия	В%	Ват		
0	257.1	2744318.2	8	6	1.05	1	1.00	2	0.0	8-13	0.00	1.000
1	166.8	2378938.1	2	6	2.00	4	0.86	9	1.4	7-9	1.00	1.000

*** Недопустимое увеличение напряжения в узле 4**

Рисунок 19 – Вывод результатов аварийного завершения расчёта

Режим может разойтись. Перед расчётом режима возможно появление предупреждающего сообщения (рис. 20). Это сообщение говорит о том, что в предыдущем расчёте режим разошёлся и начальное приближение, заданное для текущего расчёта, удовлетворительное. Рекомендуется восстановить номинальные напряжения в качестве начального приближения для текущего расчёта [2].



Рисунок 20 – Предупреждающее сообщение в программе RastrWin3

5.6. Подготовка графической схемы

Для открытия графического окна выполнить команду **Открыть – Графика**.

Подготовка графической схемы осуществляется в последовательном выполнении следующих операций:

- расстановка узлов в пространстве;
- улучшение внешнего вида схемы.

Ввод (⊕) – основная команда для ввода узлов в графическую схему. Она используется как для ввода, так и для перемещения узла. Узел, предлагаемый к вводу, отмечен ⊙ (рис. 21).

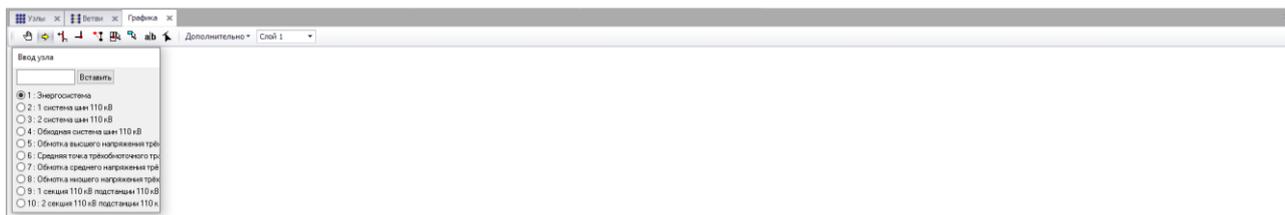


Рисунок 21 – Ввод узлов в рабочую область в RastrWin3

Для расстановки узлов в пространстве следует щелкать левой кнопкой мыши. Узел можно удалить, щёлкнув на него правой кнопкой мыши.

Для перемещения по экрану ранее введённого узла необходимо переместить указатель мыши на этот узел и нажать левую кнопку. Данный узел будет захвачен и станет перемещаться с мышью до тех пор, пока не будет отпущена кнопка мыши.

Для улучшения внешнего вида схемы используются следующие команды [2]:

Клавиша **Alt** – для принудительной горизонтальной ориентации шины, клавиша **Shift** – для принудительной вертикальной ориентации шины.

Присоединение (+) – режим используется для редактирования места присоединения ветви. Для применения захватить мышью нужный объект и переместить в требуемое место.

Излом (+) – режим используется для редактирования места излома на линии. Захватив мышью точку на ветви, переместить её в нужное место.

Текст (+) – режим используется для редактирования места расположения текстовых надписей. Захватив мышью надпись, переместить её в нужное место.

Просмотр (+) – в этом режиме при движении мыши с нажатой левой кнопкой схема перемещается, при движении мыши вверх – вниз с нажатой клавишей **Ctrl** схема изменяет масштаб.

Пример 5.6. Для схемы электрической сети (рис. 11) построить графическое изображение в программном комплексе RastrWin3.

Решение.

Пример графического изображения схемы сети в RastrWin3 (рис. 22).

Рисунок 24 – Задание трансформаторов с расщеплённой обмоткой в RastrWin3

Для двухобмоточных трансформаторов задаётся (рис. 25):

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_B**), низшего (**N_H**) напряжений.

Рисунок 25 – Задание двухобмоточных трансформаторов в RastrWin3

Пример 5.7. Для схемы электрической сети (рис. 11) задать параметры трансформаторов в программном комплексе RastrWin3.

Решение.

Пример задания параметров трансформаторов в программном комплексе RastrWin3 представлен на рисунке 26.

N	Название	Марка	Тип	S	N_B	N_C	N_H	N_H2	N_D	N_лвр	N_Ю	Tc	I_добрН	I_ВН	I_добрСН	I_СН	I_добрОО	I_оо	Конт_Т_оо	аич_ТБВ	аич_ПТН	аич_БДТ	N_ТБВ	N_ПТН	N_БДТ	N_ХТ	БД_расч
1	Трансформатор Т-1	ТДН-25000/...	Зв-обн	5	7	8		6					125,7		1 313,7					<input type="checkbox"/>							
2	Трансформатор Т-2	ТДН-10000/1...	Зв-обн	11		12							50,3							<input type="checkbox"/>							
3	Трансформатор Т-3	ТДН-10000/1...	Зв-обн	13		14							50,3							<input type="checkbox"/>							

Рисунок 26 – Пример задания параметров трансформаторов в программном комплексе RastrWin3

В результате, графическое изображение трёхобмоточного трансформатора изменяется (рис. 27).

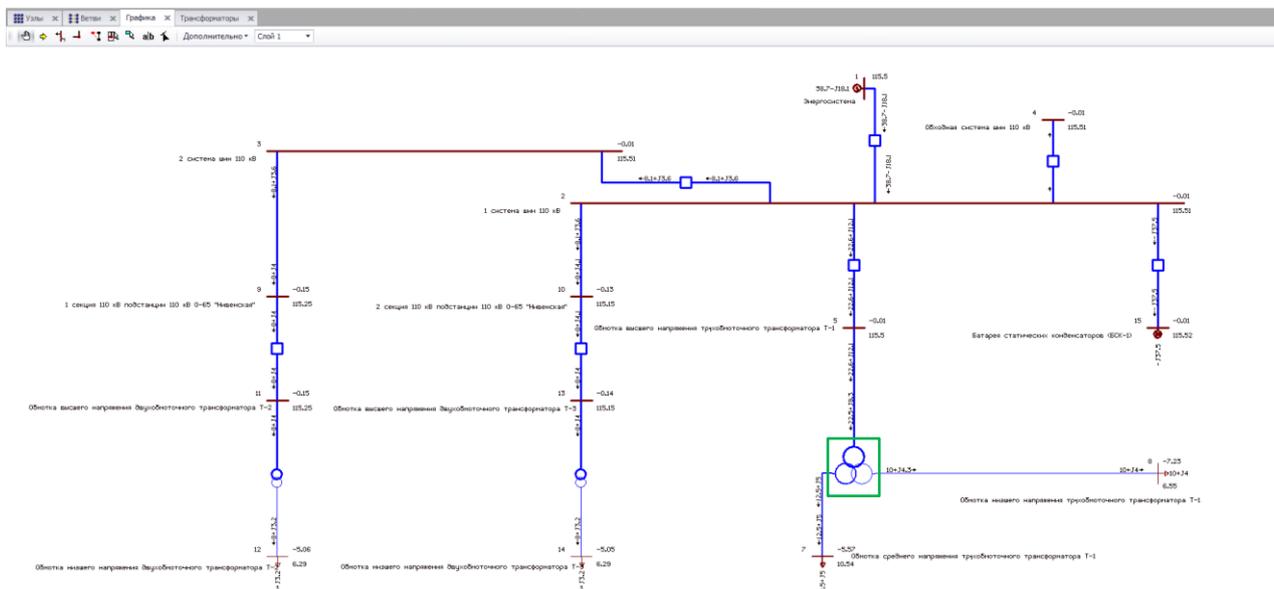


Рисунок 27 – Пример графического изображения схемы электрической сети с учётом улучшения внешнего вида и внесённых параметров трансформаторов в программном комплексе RastrWin3

5.8. Оптимизация режима по реактивной мощности

По конструктивному исполнению различают два типа трансформаторов понижающих подстанций:

- с переключением регулировочных ответвлений под нагрузкой – трансформаторы с РПН;
- с переключением регулировочных ответвлений без возбуждения, то есть с предварительным отключением трансформатора от электрической сети – трансформаторы с ПБВ.

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В программе RastrWin3 можно задавать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Оптимизация – Анцапфы**.

Для каждого трансформатора задаётся (рис. 28):

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпайки (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;
- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;

- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задаётся 1 о.е.;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.



Рисунок 28 – Задание устройств регулирования трансформаторов в таблице «Анцапфы» в RastrWin3

В таблице «**Ветви**» в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора (рис. 29).

При изменении номера анцапфы (задаётся в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации (рис. 29).



Рисунок 29 – Задание устройств регулирования и номера анцапфы трансформаторов в таблице «Ветви» в RastrWin3

Следует отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3. Для этого выполнить команду **Открыть – Узлы – Напряжения** (рис. 30).

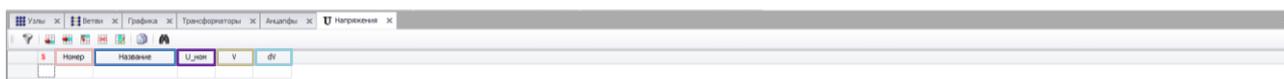


Рисунок 30 – Таблица «Напряжения» в RastrWin3

В таблице «**Напряжения**» отображается (рис. 30):

- номер узла (**Номер**);
- название узла (**Название**);
- номинальное напряжение узла (**U_ном**) в кВ;
- расчётный модуль напряжения (**V**) в кВ;
- отклонение напряжения узла от номинального значения (**dV**) в %.

Согласно ГОСТ 32144-2013 [4]:

- положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номиналь-

ного значения напряжения ($U_{ном}$) в течение 100 % времени интервала в одну неделю;

- положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 5 % номинального значения напряжения ($U_{ном}$) в течение 95 % времени интервала в одну неделю.

Пример 5.8. Для схемы электрической сети (рис. 11) задать устройства регулирования трансформаторов. Выполнить анализ отклонений напряжений в узловых точках сети.

Решение.

Пример задания устройств регулирования трансформаторов в программном комплексе RastrWin3 представлен на рисунке 31.

N_мд	Название	ВН	+/-	Тип	Место	Коеф	V_пр	V_пер	N_мдц	Шаг	N_мдц	Шаг	N_мдц	Шаг	N_мдц	Шаг
1	Устройство РН у трансформатора Т-1 %	+		РН	ВН	1	6,6	115,0	8	-1,000	8	1,000				
2	Устройство РН у трансформатора Т-2 %	+		РН	ВН	1	6,3	115,0	8	-1,000	8	1,000				
3	Устройство РН у трансформатора Т-3 %	+		РН	ВН	1	6,3	115,0	8	-1,000	8	1,000				

Рисунок 31 – Пример задания устройств регулирования трансформаторов в программном комплексе RastrWin3

С учётом занесения в таблицу «Ветви» номеров устройств регулирования трансформаторов и выбора соответствующих номеров анцапф (рис. 32) удалось эффективно отрегулировать напряжения в узловых точках сети (рис. 33).

O	S	Тип	N_учн	N_кон	N_л	ID Группы	Название	R	X	B	Кур	N_мдц	Вд_мдц	P_учн	Q_учн	Na	I_max	Т_всп.	
1		Высо	1	2			Энергосистема - 1 система шин 110 кВ												
2		Высо	2	3			1 система шин 110 кВ - 2 система шин 110 кВ												
3		Высо	2	4			1 система шин 110 кВ - Обходная система шин 110 кВ												
4		Высо	2	5			1 система шин 110 кВ - Объект высшего напряжения трехфазного трансформатора Т-1												
5		Трп	5	6			Объект высшего напряжения трехфазного трансформатора Т-1 - Средняя точка трехфазного трансформатора Т-1	1,48	55,55		1,000			-23	-12			128	
6		Трп	6	7			Средняя точка трехфазного трансформатора Т-1 - Объект среднего напряжения трехфазного трансформатора Т-1	1,48			0,206			-13	-5			71	
7		Трп	6	8			Средняя точка трехфазного трансформатора Т-1 - Объект низшего напряжения трехфазного трансформатора Т-1	1,48	34,39		0,060	14	1	-10	-4			57	
8		ЛЭП	3	9			2 система шин 110 кВ - 1 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Увельская"	1,42	4,73		-33,6			-8	-4			45	
9		ЛЭП	2	10			1 система шин 110 кВ - 2 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Увельская"	2,71	4,93		-32,3			-8	-4			45	
10		Высо	9	11			1 система шин 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Увельская" - Объект высшего напряжения двухфазного трансформатора Т-2							-8	-4			45	
11		Трп	11	12			Объект высшего напряжения двухфазного трансформатора Т-2 - Объект низшего напряжения двухфазного трансформатора Т-2	7,67	138,86		0,055	9	2	-8	-4			45	
12		Высо	10	13			2 секция 110 кВ подстанции 110 кВ О-65 "Увельская" - Объект высшего напряжения двухфазного трансформатора Т-3							-8	-4			45	
13		Трп	13	14			Объект высшего напряжения двухфазного трансформатора Т-3 - Объект низшего напряжения двухфазного трансформатора Т-3	7,67	138,86		0,055	9	3	-8	-4			45	
14		Высо	2	15			1 система шин 110 кВ - Батарея статических конденсаторов (ВСК-1)											37	187

Рисунок 32 – Пример занесения в таблицу «Ветви» номеров устройств регулирования трансформаторов и выбор соответствующих номеров анцапф

№	Имя	Название	U_учн	Y	dV
1	2	1 система шин 110 кВ	110	115,51	5,01
2	3	2 система шин 110 кВ	110	115,51	5,01
3	4	Обходная система шин 110 кВ	110	115,51	5,01
4	15	Батарея статических конденсаторов (ВСК-1)	110	115,52	5,02

Рисунок 33 – Пример допустимых отклонений напряжений в узлах сети

№	Имя	Название	U_nom	V	φ
1	2	1-линия шн 110 кВ	110	115,51	5,01
2	3	2-линия шн 110 кВ	110	115,51	5,01
3	4	Общая линия шн 110 кВ	110	115,51	5,01
4	8	Обмотка низшего напряжения трёхобмоточного трансформатора Т-1	7	5,87	-11,00
5	12	Обмотка низшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2	6	5,59	-11,24
6	14	Обмотка низшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3	6	5,64	-10,49
7	15	Батарея статических конденсаторов (СК-1)	110	115,52	5,02

Рисунок 34 – Пример недопустимых отклонений напряжений в узлах сети

5.9. Анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи

В процессе выполнения расчётной и аналитической работы, зачастую возникает необходимость выявления схемно-режимных ситуаций, в которых может возникнуть токовая перегрузка.

Выполнив команду **Открыть – Ветви – График_Идоп_от_Т**, открывается график зависимости допустимого тока (о.е.) от температуры для ветви (°С). Следует изменить номера зависимостей (**Num**) от 1...5 (рис. 35).

Num	Tc	Idop
1	-5,0	1,290
2	5,0	1,200
3	15,0	1,110
4	25,0	1,000
5	35,0	0,880

а)

Num	Tc	Idop
1	-5,0	1,290
2	5,0	1,200
3	15,0	1,110
4	25,0	1,000
5	35,0	0,880

б)

Рисунок 35 – номера зависимостей (**Num**) в таблице «График_Идоп_от_Т»: а) ошибочные; б) правильные

Для линий электропередачи можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры (°С). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая нагрузка ЛЭП** (рис. 36).

N_уч	N_кон	Название	I_уч	I_кон	Место	контр.1	Tc	N_I(t)_ДДТН	Idop_25_ДДТН	I_доп_обор_ДДТН	I_доп_расч_ДДТН	I_ф_факт_ДДТН	N_I(t)_АБТН	Idop_25_АБТН	I_доп_обор_АБТН	I_доп_расч_АБТН	N_факт_АБТН

Рисунок 36 – Таблица «Токовая нагрузка ЛЭП» в RastrWin3

В таблице «**Токовая нагрузка ЛЭП**» для линий электропередачи задаётся (рис. 36):

- температура для ветви (**Tc**) в °С;
- номер поправочного коэффициента с учётом температуры ветви (**N_I(t)_ДДТН**) (рис. 35 б) в о.е.;
- допустимый длительный ток провода соответствующего сечения при температуре воздуха 25 °С (**Idop_25_ДДТН**) в А [3].

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от Т** (рис. 37). Поле **Температура** используется для задания температуры для ветви, поле **Аварий-**

ная нагрузка (%) – если допустимый ток рассчитывается с учётом заданной аварийной перегрузки в процентах.

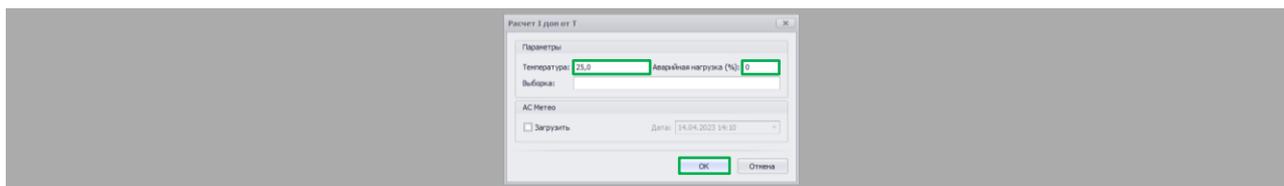


Рисунок 37 – Окно расчёта допустимого тока от температуры в RastrWin3

В таблице «**Токковая нагрузка ЛЭП**» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока провода линии электропередачи (**I_{доп_расч_ДДТН}**) в А;
- значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**I/I_{доп_расч_ДДТН}**) в %.

В таблице «**Ветви**» появится значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**I_{загр.}**) в % (рис. 38).



Рисунок 38 – Отображение значения расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи в таблице «Ветви» в RastrWin3

Пример 5.9. Для схемы электрической сети (рис. 11) выполнить анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи.

Решение.

При выборе температуры для ветвей равной 25°C, номер поправочного коэффициента равен 1. Допустимые длительные токи проводов сечениями 240 мм² и 95 мм² равны 605 А и 330 А соответственно [3]. Расчётные токовые загрузки проводов линий электропередачи составили 7,5 % и 13,7 % соответственно (рис. 39).

N_лн	N_кон	Название	I_лн	I_кон	Место	контр.1	Тс	N_лн_ДДТН	I_доп_25_ДДТН	I_доп_обор_ДДТН	I_доп_расч_ДДТН	I/I_доп_расч_ДДТН	N_лн_АДТН	I_доп_25_АДТН	I_доп_обор_АДТН	I_доп_расч_АДТН	I/I_доп_расч_АДТН
1	9	2-линейная 110 кВ - 1-линейная 110 кВ подстанция 110 кВ 0-65 Чеховская	41	45	ВН		25,0	4	605,0		605,0	7,5					
2	10	1-линейная 110 кВ - 2-линейная 110 кВ подстанция 110 кВ 0-65 Чеховская	41	45	ВН		25,0	4	330,0		330,0	13,7					

Рисунок 39 – Пример заполнения таблицы «Токковая нагрузка ЛЭП» с учётом температуры для ветвей равной 25°C в RastrWin3

При температуре для ветвей равной -5°C. Расчётные токовые загрузки проводов линий электропередачи составили 5,8 % и 10,6 % соответственно (рис. 40). Изменение токовой загрузки объясняется увеличением охлаждающей способности ветвей.

N_лн	I_лн	Место	контр. I	Tc	N_I(t)_ДДТН	I_доп_обор_ДДТН	I_доп_расч_ДДТН	I_доп	N_I(t)_АДТН	I_доп_обор_АДТН	I_доп_расч_АДТН	I_доп_ам
1	3	9	2 система шин 110 кВ - 1 секция 110 кВ подстанция 110 кВ О-65 "Чувовская"	44	45	ВН	-5,0	1	605,0		780,5	5,8
2	2	10	1 система шин 110 кВ - 2 секция 110 кВ подстанция 110 кВ О-65 "Чувовская"	44	45	ВН	-5,0	1	330,0		425,7	10,8

Рисунок 40 – Пример заполнения таблицы «Токовая загрузка ЛЭП» с учётом температуры для ветвей равной -5°C в RastrWin3

5.10. Анализ допустимой токовой загрузки трансформаторов

Для трансформаторов можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры ($^{\circ}\text{C}$). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая загрузка Тр-ров** (рис. 41).

N_лн	I_лн	Место	контр. I	Tc	N_I(t)_ДДТН	I_доп_обор_ДДТН	I_доп_расч_ДДТН	I_доп	N_I(t)_АДТН	I_доп_обор_АДТН	I_доп_расч_АДТН	I_доп_ам

Рисунок 41 – Таблица «Токовая загрузка Тр-ров» в RastrWin3

В таблице «Токовая загрузка Тр-ров» для трансформаторов задаётся (рис. 41):

- температура ветви (T_c) в $^{\circ}\text{C}$;
- поправочный коэффициент с учётом температуры ветви ($N_I(t)_{\text{ДДТН}}$) в о.е.;
- допустимый длительный ток оборудования ($I_{\text{доп_обор_ДДТН}}$) в А.

Информацию о допустимом токе оборудования на стороне высшего напряжения ($I_{\text{допВН}}$), среднего напряжения ($I_{\text{допСН}}$), общей обмотке ($I_{\text{допОО}}$) трансформаторов соответствующей марки можно найти в таблице «Трансформаторы» программного комплекса RastrWin3 (рис. 42).

N	Название	Марка	Тип	S	N_B	N_C	N_H	N_H2	N_D	N_лн	N_I(t)	Tc	I_допВН	I_ВН	I_допСН	I_ОН	I_допОО	I_доп	Коэф. I_доп	анал_ТБВ	анал_ПТН	анал_ВДТ	N_ТБВ	N_ПТН	N_ВДТ	N_ХТ	Ид.расч.

Рисунок 42 – Информация с паспортными данными на трансформаторы в таблице «Трансформаторы» в RastrWin3

Информацию о допустимой токовой загрузке трансформаторов записывать таблицу «Токовая загрузка Тр-ров» следующим образом:

- данные по обмотке высшего, среднего, низшего напряжений трансформатора записывать в поле $I_{\text{доп_обор_ДДТН}}$.

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от T**.

В таблице «Токовая загрузка Тр-ров» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока трансформатора ($I_{\text{доп_расч_ДДТН}}$) в А;
- значение расчётной токовой загрузки трансформатора ($I_{\text{доп}}$) в %.

В таблице «**Ветви**» появится значение расчётной токовой загрузки трансформатора (**Загр.**) в %.

Пример 5.10. Для схемы электрической сети (рис. 11) выполнить анализ допустимой токовой загрузки трансформаторов.

Решение.

При выборе температуры для ветвей равной 25°C, номер поправочного коэффициента равен 1. Допустимые длительные токи трансформаторов представлены на рисунке 43.

N	Название	Марка	Тип	S	N _В	N _С	N _Н	N _{Н2}	N ₀	N _{пер}	N ₃₀₀	Tc	L _{длнВН}	L _{длнВН}	L _{длнОН}	L _{ОН}	L _{длнОО}	L _{оо}	Корр. L _{оо}	анк_ГВВ	анк_РФН	анк_ВСТ	N _{ГВВ}	N _{РФН}	N _{ВСТ}	N _{Н1}	ВЛ _{расч}	
1	Трансформатор Т-1	ТДН-25000/110-115/110,6	3х-обн	5	7	8		6					125,7		1313,7													
2	Трансформатор Т-2	ТДН-10000/110-двб-115/6,3	2х-обн	11		12							50,3															
3	Трансформатор Т-3	ТДН-10000/110-двб-115/6,3	2х-обн	13		14							50,3															

Рисунок 43 – Допустимые длительные токи трансформаторов в таблице «Трансформаторы» в RastrWin3

N _{длн}	N _{оо}	Название	L _{длн}	L _{оо}	Место	контр.1	Tc	N _{300_длн}	I _{длн_25_длн}	I _{длн_оо_длн}	I _{длн_расч_длн}	I _{л_оо}	N _{300_АДТН}	I _{длн_25_АДТН}	I _{длн_оо_АДТН}	I _{длн_оо}
1	5	Обмотка высшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1 - Средняя точка трехобмоточного трансформатора Т-1	128	128	ВН		25,0	4	125,7	125,7	101,9					
2	6	Средняя точка трехобмоточного трансформатора Т-1 - Обмотка среднего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	71	738	ВН		25,0	4	1313,7	1313,7	5,4					
3	6	Средняя точка трехобмоточного трансформатора Т-1 - Обмотка низшего напряжения трехобмоточного трансформатора Т-1	57	949	ВН		25,0	4	1313,7	1313,7	4,4					
4	11	Обмотка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2 - Обмотка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-2	45	824	ВН		25,0	4	50,3	50,3	89,7					
5	13	Обмотка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3 - Обмотка высшего напряжения двухобмоточного трансформатора Т-3	45	824	ВН		25,0	4	50,3	50,3	89,8					

Рисунок 44 – Пример заполнения таблицы «Токовая нагрузка Тр-ров»

Расчётные токовые загрузки трансформаторов на высшей стороне для трансформаторов Т-1, Т-2, Т-3 составили 101,9 %, 89,7 %, 89,8 % соответственно (рис. 44).

5.11. Анализ полученных результатов

Для анализа рассчитанных режимов в RastrWin3 существуют различные формы представления результатов. Все они сосредоточены в меню **Открыть**. Основная форма выдачи – команда **Открыть – Узлы – Узлы+Ветви**.

После перехода в это меню на экране появится таблица, организованная по форме «Узел + подходящие к нему ветви» (рис. 45).

Номер	Название	V	Delta	P _н	Q _н	P _г	Q _г	V _{ис}	Q _{ис}	Q _{max}	Q _ш
S	Ny	Название	V ₂	dDelta	P _н	Q _н	IP	IQ	I _н	P _ш	Q _ш

Рисунок 45 – Таблица «Узлы+Ветви» в RastrWin3

В параметрах узла отображается:

- номер узла (**Номер**);
- название узла (**Название**);
- расчетный модуль напряжения (**V**) в кВ;

- активная и реактивная нагрузки (P_n, Q_n) в МВт и МВАр;
- активная генерация (P_g) в МВт;
- реактивная генерация (Q_g) в МВАр;
- заданный модуль напряжения ($V_{зд}$) в кВ;
- пределы изменения реактивной генерации (Q_{min}, Q_{max}) в МВАр;
- реактивная мощность шунта ($Q_{ш}$) в МВАр.

В строке параметров ветви, связанной с узлом, отображаются:

- номер (N_y) название (**Название**) противоположного узла ветви;
- падение модуля и угла напряжения ($V_2, dDelta$) в кВ и °;
- переток мощности, входящий в узел (P_l, Q_l), МВт и МВАр;
- продольные потери активной мощности (dP), МВт;
- потребляемая реактивная мощность (dQ), МВАр;
- модуль тока (I_l), А;
- мощности шунта ветви ($P_{ш}, Q_{ш}$), МВт и МВАр.

Также для анализа рассчитанных режимов в RastrWin3 существуют таблица «**Загрузка**». Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Загрузка** (рис. 46).

	N_нач	N_кон	Название	Тип	sign P	P_нач	dP	P_кон	dDelta	sign Qp	Q_нач	dQ	Q_ш	Q_кон	sign Qiq	W_нач	W_кон	dV%
1																		

Рисунок 46 – Таблица «Загрузка» в RastrWin3

В таблице «**Загрузка**» отображается:

- номера узлов, ограничивающих ветвь ($N_{нач}$ – начало ветви и $N_{кон}$ – конец ветви);
- поток мощности в начале ветви ($P_{нач}, Q_{нач}$), МВт и МВАр;
- поток мощности в конце ветви ($P_{кон}, Q_{кон}$), МВт и МВАр;
- продольные потери активной мощности (dP), МВт;
- потребляемая реактивная мощность (dQ), МВАр;
- направление потока активной и реактивной мощности (**sign P, sign Qip, sign Qiq**), МВт и МВАр;
- реактивная мощность шунта ветви ($Q_{ш}$), МВАр;
- напряжения в начале и конце ветви ($V_{нач}, V_{кон}$) в кВ.

6. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

6.1. Лабораторная работа № 1. Моделирование линий электропередачи в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Изучение моделирования линий электропередачи в программном комплексе RastrWin3.

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические навыки по расчёту параметров схем замещения линий электропередачи и практические навыки работы в программном комплексе RastrWin3 при моделировании линий электропередачи различных классов напряжения.

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для линий электропередачи различных классов напряжения;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения линий электропередачи различных классов напряжения;
7. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;
8. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
9. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;
10. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Работа носит ознакомительный характер, подготовка отчёта не требуется.

6.2. Лабораторная работа № 2. Моделирование силовых трансформаторов в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Изучение моделирования силовых трансформаторов в программном комплексе RastrWin3.

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические навыки по расчёту параметров схем замещения двухобмоточных, трёхобмоточных трансформаторов, трансформаторов с расщеплённой обмоткой, автотрансформаторов и практические навыки работы в программном комплексе

RastrWin3 при моделировании трансформаторов и автотрансформаторов различных типов.

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для двухобмоточных, трёхобмоточных трансформаторов, трансформаторов с расщеплённой обмоткой, автотрансформаторов;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения двухобмоточных, трёхобмоточных трансформаторов, трансформаторов с расщеплённой обмоткой, автотрансформаторов;

Тип	S , МВА	$U_{номВН}$, кВ	$U_{номСН}$, кВ	$U_{номНН}$, кВ	$U_{квС}$, %	$U_{квВ}$, %	$U_{квН}$, %	P_x , кВт	P_k , кВт	I_x , %	Сх. и группа соедин. обмот.	Регулирование напряжения	шт. г
ТМ-100/10	0,1	6	—	0,4	—	4,7	—	0,33	2,27	2,6	У/Зн-11	ПВВ ±2×2,5%	0,72
ТМ-160/10	0,16	6	—	0,4	—	4,5	—	0,51	2,85	2,4	У/Ун-0	ПВВ ±2×2,5%	...
ТМ-160/10	0,16	6	—	0,4	—	4,5	—	0,51	3,1	2,4	У/Зн-11	ПВВ ±2×2,5%	1,425
ТМ-160/10	0,16	6	—	0,69	—	4,7	—	0,51	3,1	2,4	Д/Ун-11	ПВВ ±2×2,5%	...
ТМ-160/10	0,16	6,1	—	0,4	—	4	—	0,61	...	...	...	ПВВ ±2,5%	...
ТМ-250/10	0,25	6	—	0,4	—	4,5	—	0,74	3,7	2,3	У/Ун-0	ПВВ ±2×2,5%	...
ТМ-250/10	0,25	6	—	0,4	—	4,7	—	0,74	4,2	2,3	У/Зн-11	ПВВ ±2×2,5%	1,425
ТМ-250/10	0,25	6	—	0,69	—	4,5	—	0,74	4,2	2,3	Д/Ун-11	ПВВ ±2×2,5%	...
ТМ-250/10	0,25	6,1	—	0,4	—	4	—	0,82	...	...	...	ПВВ ±2,5%	...
ТМ-400/10	0,4	6	—	0,4	—	4,5	—	0,95	5,5	2,1	У/Ун-0	ПВВ РПН±2×2,5%	...
ТМ-400/10	0,4	6	—	0,4	—	4,5	—	0,95	5,9	2,1	Д/Ун-11	ПВВ РПН±2×2,5%	...
ТМ-400/10	0,4	6	—	0,4	—	4,5	—	0,9315%	5,5+10%	1,8+30%	У/Ун-0	...	1,83
ТМ-400/10	0,4	6	—	0,69	—	4,5	—	0,95	5,9	2,1	У/Зн-11	ПВВ РПН±2×2,5%	1,425
ТСЗ-400/10УЗ	0,4	6	—	0,40, 0,69	—	6	—	1,15	4,3	2,1	Д/Ун-11	±2×2,5%	1,87
ТМ-400/10	0,4	6,1	—	0,4	—	6	—	1	...	...	...	ПВВ ±2,5%	...
ТСЗ-400/10УЗ	0,4	6,3	—	0,40, 0,69	—	6	—	1,15	4,3	2,1	Д/Ун-11	±2×2,5%	1,87
ТСЗ-400/10УЗ	0,4	6,6	—	0,42	—	6	—	...	...	...	...	...	...
ТСЗ-500/10УЗ	0,5	6	—	0,40, 0,69	—	6	—	1,25	5,9	1,9	Д/Ун-11	±2×2,5%	2,1
ТСЗ-500/10УЗ	0,5	6,3	—	0,40, 0,69	—	6	—	1,25	5,9	1,9	Д/Ун-11	±2×2,5%	2,1

Рисунок 47 – Паспортные данные трансформаторов из справочника по высоковольтному оборудованию электроустановок Гайсарова Р.В.

В паспортных данных трансформаторов, приводимых в справочной литературе (рис. 47) или заводами-изготовителями, обычно приводятся следующие параметры:

- тип или марка трансформатора;
- полная мощность S , МВА;
- номинальные напряжения обмоток $U_{номВН}$, $U_{номСН}$, $U_{номНН}$, кВ;
- напряжения короткого замыкания $u_{квС}$, $u_{квВ}$, $u_{квН}$, %;
- потери холостого хода P_x или ΔP_x , кВт;
- потери короткого замыкания P_k или ΔP_k , кВт;
- ток холостого хода I_x , %;
- схема и группа соединения обмоток трансформатора Y – схема звезда, D или Δ – схема треугольник, Z – схема зигзаг, 0 или n – нулевой провод;

- диапазоны регулирования устройств РПН и ПБВ;
- масса трансформатора, тонн.

7. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3.

Один из узлов принимается за балансирующий;

8. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;

9. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;

10. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3;

11. В таблицу «**Трансформаторы**» программного комплекса RastrWin3:

Для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), среднего (**N_C**), низшего (**N_H**) напряжений;
- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

Для трансформаторов с расщеплённой обмоткой задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), низших (**N_H** и **N_H2**) напряжений;
- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

Для двухобмоточных трансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), низшего (**N_H**) напряжений.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Работа носит ознакомительный характер, подготовка отчёта не требуется.

6.3. Лабораторная работа № 3. Моделирование устройств регулирования напряжения в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Изучение способов моделирования устройств регулирования напряжения в программном комплексе RastrWin3.

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические знания о трансформаторах с переключением регулировочных ответвлений под нагрузкой – трансформаторы с РПН; и о трансформаторах с переключени-

ем регулировочных ответвлений без возбуждения – трансформаторы с ПБВ. Закрепляются практические навыки работы в программном комплексе RastrWin3 при моделировании устройств регулирования напряжения.

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Задать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ);

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В таблицу «**Анцапфы**» программного комплекса RastrWin3 для каждого трансформатора задать:

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпайки (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;
- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;
- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задаётся 1;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.

В таблицу «**Ветви**» программного комплекса RastrWin3 в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора.

При изменении номера анцапфы (задаётся в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации.

6. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;
7. Отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3;

8. По данным таблицы «**Напряжения**» программного комплекса RastrWin3 выполнить анализ отклонений напряжений в узловых точках сети.

В таблице «**Напряжения**» отображается:

- номер узла (**Номер**);
- название узла (**Название**);
- номинальное напряжение узла (**U_ном**) в кВ;
- расчётный модуль напряжения (**V**) в кВ;
- отклонение напряжения узла от номинального значения (**dV**) в %.

Согласно ГОСТ 32144-2013 [4]:

- положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального значения напряжения (**U_{ном}**) в течение 100 % времени интервала в одну неделю;
- положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 5 % номинального значения напряжения (**U_{ном}**) в течение 95 % времени интервала в одну неделю.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Работа носит ознакомительный характер, подготовка отчёта не требуется.

6.4. Лабораторная работа № 4. Моделирование компенсирующих устройств реактивной мощности в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Изучение способов моделирования компенсирующих устройств реактивной мощности в программном комплексе RastrWin3.

В результате выполнения лабораторной работы закрепляются теоретические знания о типах компенсирующих устройств: шунтирующих реакторах, шунтовых конденсаторных батарей, статических тиристорных компенсаторах, синхронных компенсаторах. Закрепляются практические навыки работы в программном комплексе RastrWin3 при моделировании компенсирующих устройств реактивной мощности.

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;

5. Рассчитать согласно справочным данным (табл. 5–8) проводимости шунтирующего реактора и шунтовой конденсаторной батареи;

Таблица 5 – Технические параметры шунтовых конденсаторных батарей напряжением 6 кВ

Марка конденсаторной батареи (КБ)	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$C_{\text{НОМ}}$, мкФ
БСК	6	238,73
		353,68
		477,46
		530,52
		592,41
		707,36
		831,14
		884,19
		1061,03
		1193,66

Таблица 6 – Технические параметры шунтовых конденсаторных батарей напряжением 10 кВ

Марка конденсаторной батареи (КБ)	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$C_{\text{НОМ}}$, мкФ
БСК	10	79,58
		119,37
		159,15
		179,85
		238,73
		278,52
		318,10
		358,10
		366,06
		418,58

Таблица 7 – Технические параметры шунтовых конденсаторных батарей напряжением 35 кВ

Марка конденсаторной батареи (КБ)	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	$C_{\text{НОМ}}$, мкФ
БСК	35	9,87
		13,25
		19,75
		26,50
		29,62

Таблица 8 – Технические параметры шунтирующих реакторов напряжением 10 и 35 кВ

Марка шунтирующего реактора (РШ)	$U_{\text{ном}}$, кВ	$Q_{\text{ном}}$, кВАр
РШОС	10	240
		1000
		2000
		3333
		4000
	35	5000
		2000
		3333
		5000
		8000
		10000

6. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;
 7. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
 8. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;
 9. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3.
- Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:**
Работа носит ознакомительный характер, подготовка отчёта не требуется.

6.5. Лабораторная работа № 5. Расчёт установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Расчёт установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3.

Целью электрического расчёта сети является определение параметров режимов, выявление возможностей дальнейшего повышения экономичности работы электрической сети и получение необходимых данных для решения вопросов регулирования напряжения.

На рисунке 48 и в таблицах 9–10 представлены исходные данные для расчёта.

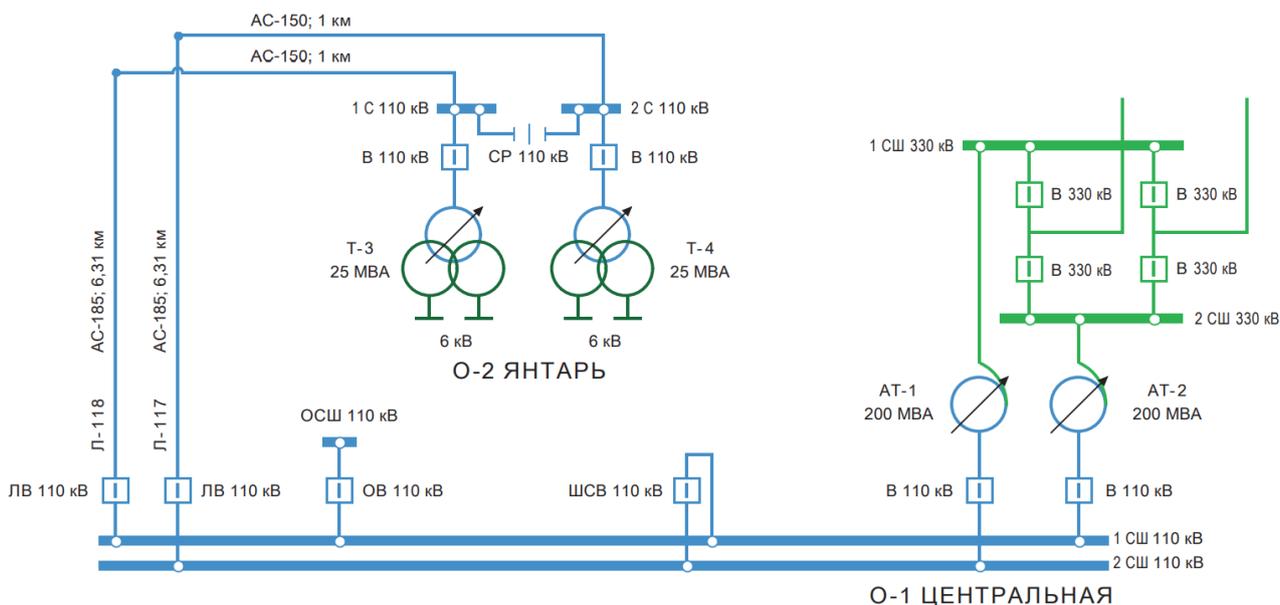


Рисунок 48 – Схема электрической сети

В таблицах 9–10 представлены исходные данные для расчёта.

Таблица 9 – Параметры трансформаторов

№	Параметр	Трансформаторы	
		АТ-1, АТ-2	Т-3, Т-4
1	Марка	АТДЦТН-200000/ 330/110	ТРДН-25000/110
2	S , кВА	200000	25000
3	$U_{\text{НОМВН}}$, кВ	330	115
4	$U_{\text{НОМСН}}$, кВ	115	-
5	$U_{\text{НОМНН}}$, кВ	10,5	6,3
6	$u_{\text{кВС}}$, %	10,5	-
7	$u_{\text{кВН}}$, %	38	10,5
9	$u_{\text{кСН}}$, %	25	-
10	ΔP_x , кВт	155	25
11	ΔP_k , кВт	560	120
12	Регулирование напряжения	РПН $\pm 16 \times 1\%$	РПН $\pm 16 \times 1\%$

Таблица 10 – Данные по нагрузкам

Параметр	Место	
	Сеть низкого напряжения трансформаторов	
	Т-3	Т-4
P , МВт	4,9	3,8
Q , МВАр	2,0	1,5

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для линий электропередачи;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения линий электропередачи;
7. Подготовить схемы замещения для трансформаторов с расщеплённой обмоткой, автотрансформаторов;
8. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения трансформаторов с расщеплённой обмоткой, автотрансформаторов;
9. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;
10. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
11. Задать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ);

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В таблицу «**Анцапфы**» программного комплекса RastrWin3 для каждого трансформатора задать:

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпаяк (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;
- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;
- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задаётся 1;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.

В таблицу «**Ветви**» программного комплекса RastrWin3 в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора.

При изменении номера анцапфы (задаётся в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации.

12. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;

13. Отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3.

14. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3.

15. В таблицу «**Трансформаторы**» программного комплекса RastrWin3: для автотрансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), среднего (**N_C**), низшего (**N_H**) напряжений;
- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

для трансформаторов с расщеплённой обмоткой задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), низших (**N_H** и **N_H2**) напряжений;
- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

16. Написать заключение о проделанной работе.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Отчёт должен содержать: название работы, цель и задачи работы, исходные данные для расчёта, основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений, выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов.

6.6. Лабораторная работа № 6. Анализ потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Изучение структуры потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети.

Показателем, отражающим эффективность работы электроэнергетической системы, является величина потерь активной мощности, а именно их доля от генерируемой на электростанциях активной мощности. По мнению между-

народных экспертов в области энергетики относительные потери электроэнергии при её передаче в электрических сетях не должны превышать 4 %. Потери электроэнергии на уровне 10 % можно считать максимально допустимыми.

На рисунке 49 и в таблицах 11–13 представлены исходные данные для расчёта.

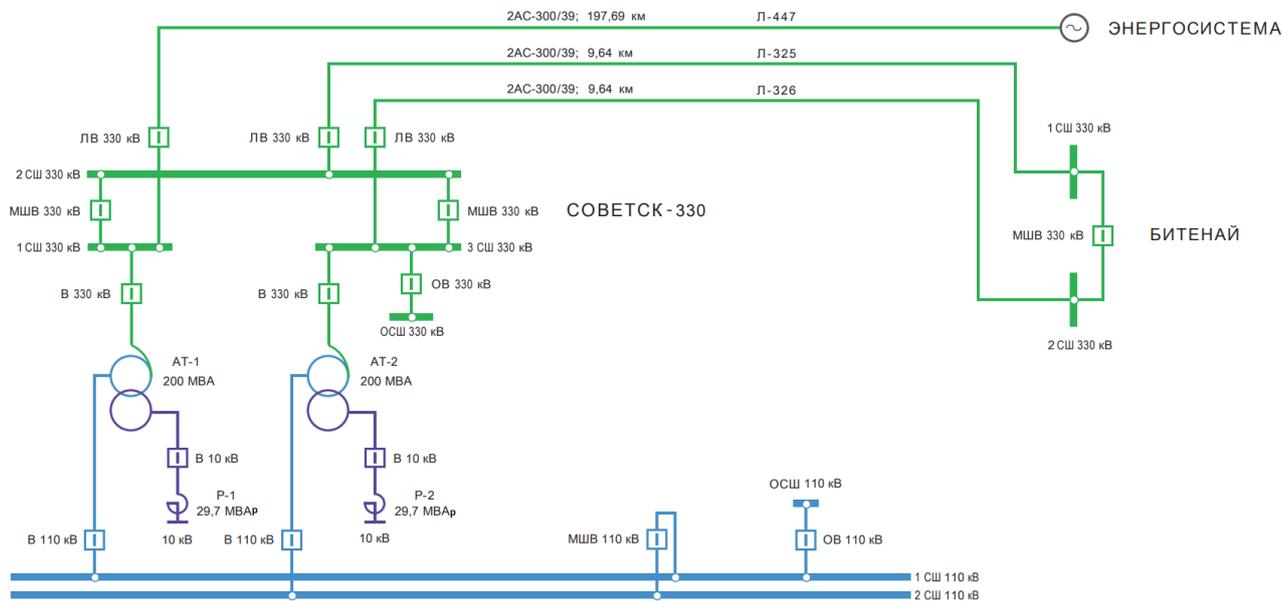


Рисунок 49 – Схема электрической сети

Таблица 11 – Данные по нагрузкам

Параметр	Место	
	ПС 330 кВ О-5 «Центральная»	
	1 система шин	2 система шин
Р, МВт	110,0	130,0
Q, МВАр	50,0	60,0

Таблица 12 – Параметры шунтирующих реакторов

Наименование	Марка	U _{ном} , кВ	Мощность ступени (Q _{ном}), МВАр
Р-1, Р-2	РКОС-9900/11-УХЛ1	10	29,7

Таблица 13 – Параметры трансформаторов

№	Параметр	Трансформаторы
		АТ-1, АТ-2
1	Марка	АТДЦТН-200000/330/110
2	S, кВА	200000
3	U _{номВН} , кВ	330
4	U _{номСН} , кВ	115

№	Параметр	Трансформаторы
		АТ-1, АТ-2
5	$U_{\text{номНН}}$, кВ	10,5
6	$u_{\text{кВС}}$, %	10,5
7	$u_{\text{кВН}}$, %	38
9	$u_{\text{кСН}}$, %	25
10	ΔP_x , кВт	155
11	ΔP_k , кВт	560
12	Регулирование напряжения	РПН $\pm 16 \times 1\%$

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для линий электропередачи;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения линий электропередачи;
7. Подготовить схемы замещения для автотрансформаторов;
8. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения автотрансформаторов;
9. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;
10. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
11. Задать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ);

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В таблицу «**Анцапфы**» программного комплекса RastrWin3 для каждого трансформатора задать:

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпайки (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;

- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;
- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задается 1;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.

В таблицу «**Ветви**» программного комплекса RastrWin3 в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора.

При изменении номера анцапфы (задается в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации.

12. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;

13. Отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3.

14. Выполнить анализ отклонений напряжений в узловых точках сети в программном комплексе RastrWin3;

15. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3.

16. В таблицу «**Трансформаторы**» программного комплекса RastrWin3:

Для автотрансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_В**), среднего (**N_С**), низшего (**N_Н**) напряжений;
- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

17. Выполнить анализ потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети в таблице «**Узлы+Ветви**» программного комплекса RastrWin3;

При расчете режимов больших схем энергообъединений необходимо иметь возможность анализировать балансы мощностей отдельных районов (рис. 50) и перетоки между ними.

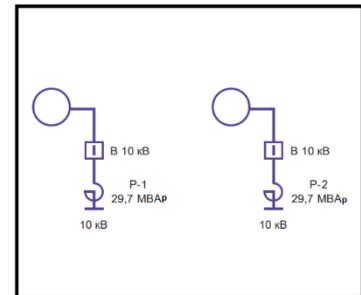
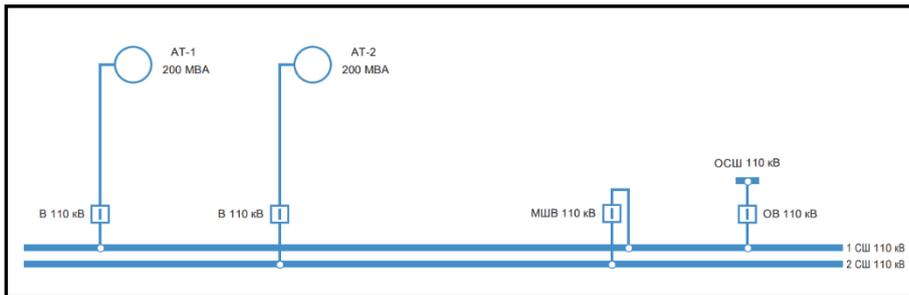
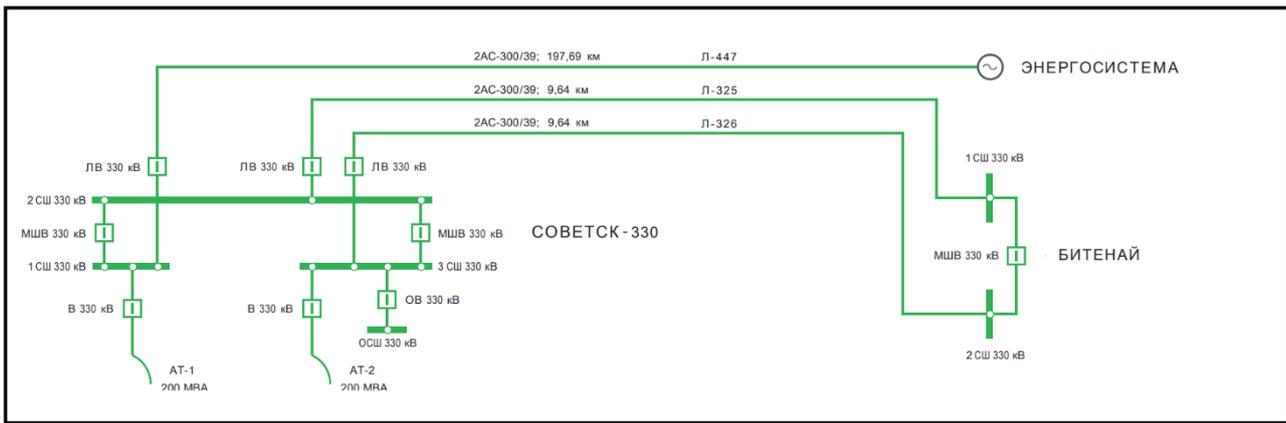


Рисунок 50 – Разбиение на районы в зависимости от номинального напряжения сети

18. Выполнить команду **Открыть – Ветви** (рис. 51). В таблице «**Районы**» разбить на три (1, 2, 3) участка в зависимости от номинального напряжения сети (330 кВ, 110 кВ, 10 кВ) (рис. 52).

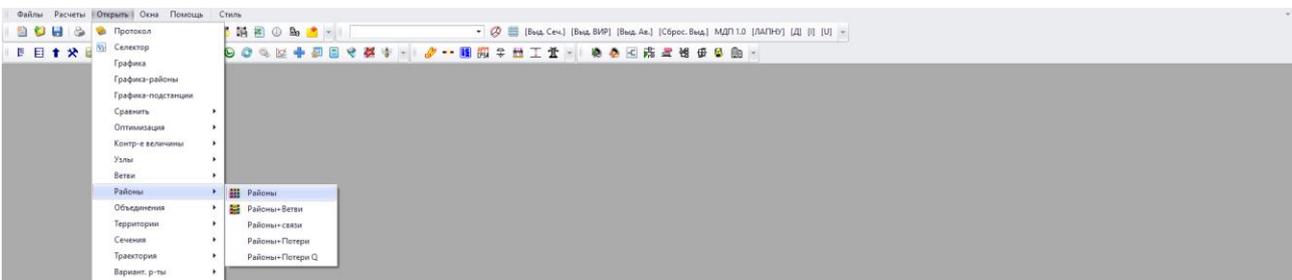


Рисунок 51 – Окно «Районы» в программном комплексе RastrWin3

№	Район	№	Рис	Др	Рис								
1	330 кВ	101	100		100	1							
2	110 кВ	101	100		100	1							
3	10 кВ	101	100		100	1							

Рисунок 52 – Таблица «Районы» в программном комплексе RastrWin3

19. В таблице «**Узлы**» в графе «**Район**» присвоить соответствующие номера районов (рис. 53).

№	Тип	Название	U_ном	N_район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_м	Q_лпн	Q_лнк	V_дн	V	Delta	Temp...
1	МНП	ПС "Титовый"	330	1									331,15	-2,96	
2	База	ПС "Крулево ГАЗС"	330				101,3	29,0	346,5				346,50		

Рисунок 53 – Таблица «Узлы» в программном комплексе RastrWin3

20. В таблицах «**Районы+Ветви**» (рис. 54) и «**Районы+Потери**» (рис. 55) выполнить анализ потерь активной мощности в сети.

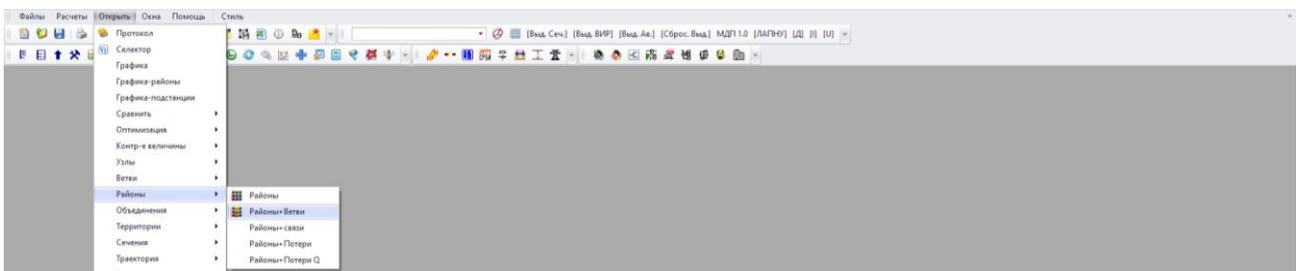


Рисунок 54 – Окно «Районы+Ветви» в программном комплексе RastrWin3

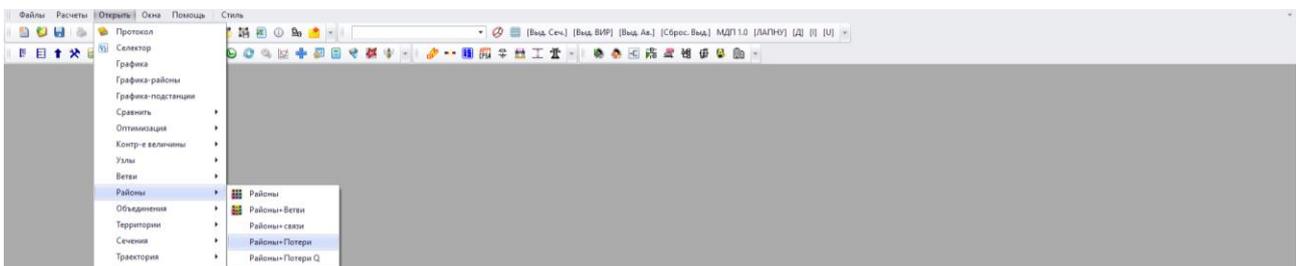


Рисунок 55 – Окно «Районы+ Потери» в программном комплексе RastrWin3

21. В таблице «**Районы+Потери Q**» (рис. 56) выполнить анализ потребляемой линиями электропередачи и автотрансформаторами реактивной мощности.

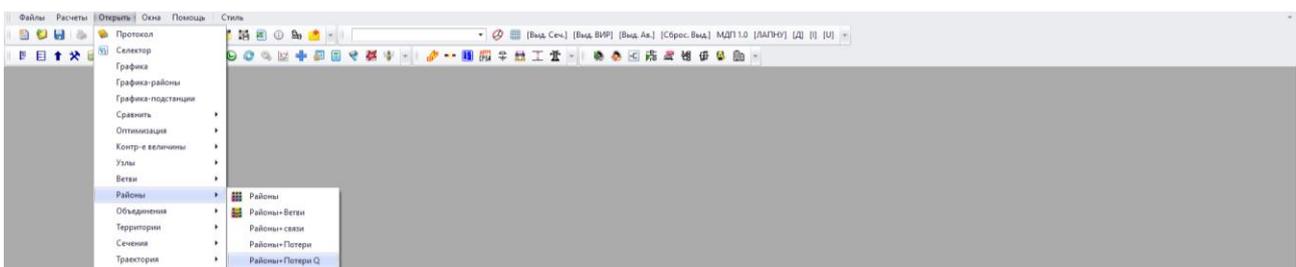


Рисунок 56 – Окно «Районы+Потери Q» в программном комплексе RastrWin3

22. В таблице «Потери» (рис. 57) заполнить значения номинальных напряжений сети в графе $U_{ном}$. Выполнить расчёт установившегося режима.

	$U_{ном}$	dP	$dP_{ЛЭП}$	$dP_{Тр-р}$	Корона	$XX_{тр}$	$dP_{Ш-нт}$	dQ	$dQ_{ЛЭП}$	$dQ_{Тр-р}$	$Q_{Ген_ЛЭП}$	$Q_{XX_тр}$	$dQ_{Ш-нт}$
1	330	1,35	1,19	0,16				-68,62	8,16	7,84	-84,64		
2	110												
3	10							0,08					57,64

Рисунок 57 – Таблица «Потери» в программном комплексе RastrWin3

Для отображения полного названия параметра необходимо щёлкнуть правой кнопкой мыши на соответствующее сокращённое название в колонке (рис. 58).

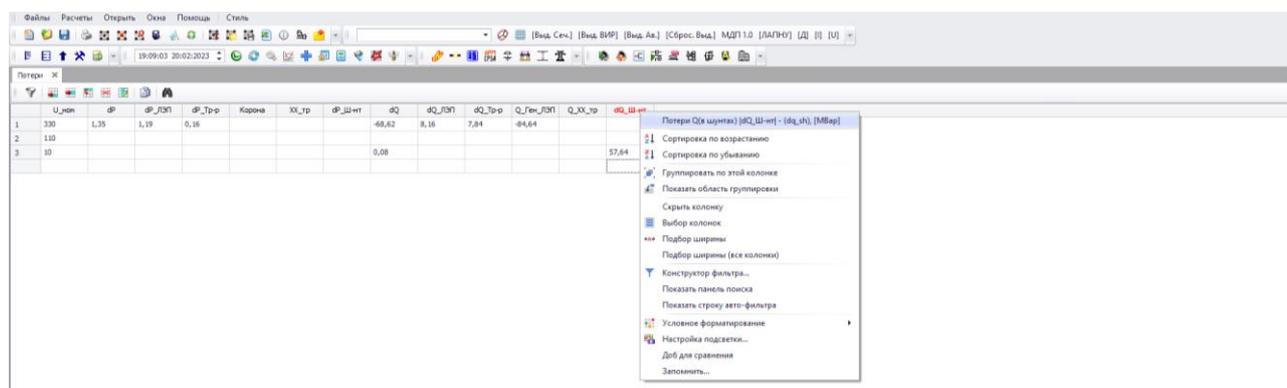


Рисунок 58 – Окно отображения полного названия

23. Повторить расчёты с другими значениями сечения проводов ЛЭП:
- 2АС-240/32;
 - 2АС-400/51.

24. Построить графики:

- зависимость потерь в ЛЭП ($dP_{ЛЭП}$) от сечения провода ЛЭП;
- зависимость нагрузочных потерь ($dP_{нагр}$) от сечения провода ЛЭП.

25. Написать заключение о проделанной работе.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Отчёт должен содержать: название работы, цель и задачи работы, исходные данные для расчёта, основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений, выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов.

6.7. Лабораторная работа № 7. Расчёт токов короткого замыкания в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Практическое выполнение расчётов токов короткого замыкания в программном комплексе RastrWin3.

Расчёт токов короткого замыкания необходим:

- для выбора и проверки электрооборудования по условиям короткого замыкания;
- для выбора уставок и оценки возможного действия релейной защиты и автоматики;
- для определения влияния токов нулевой последовательности линий электропередачи на линии связи;
- для выбора заземляющих устройств.

При расчетах токов КЗ допускается не учитывать:

- сдвиг по фазе ЭДС и изменение частоты вращения роторов синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей, если продолжительность КЗ не превышает 0,5 с;
- ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;
- насыщение магнитных систем электрических машин;
- поперечную емкостную проводимость воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

На рисунке 59 представлены исходные данные для расчёта.

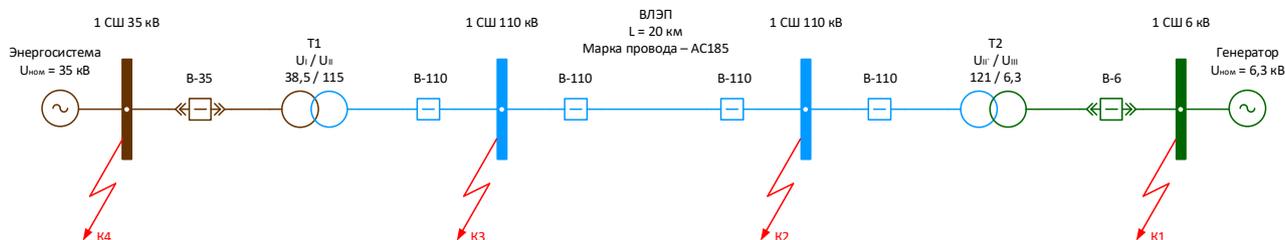


Рисунок 59 – Расчётная схема электрической сети

Перед началом работы с новой схемой для расчёта токов короткого замыкания используются команды **Файлы – Новый**, отмечаются галочкой типы файлов: **режим.rg2**, **графика.rg2**, **динамика.rst** (рис. 60).

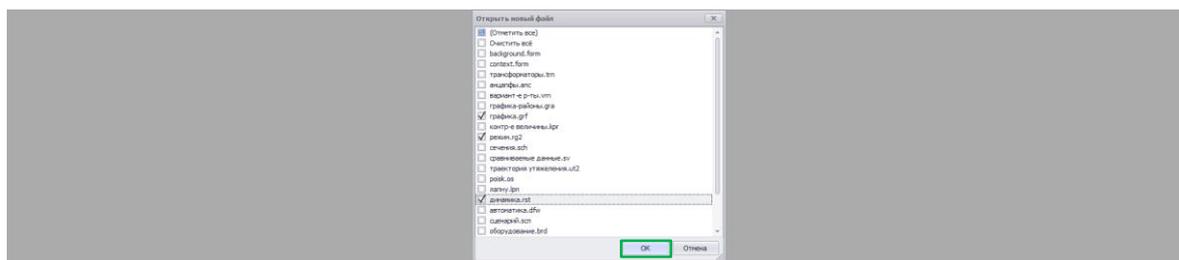


Рисунок 60 – Окно начала работы с новой схемой для расчёта токов короткого замыкания в RastrWin3

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схему замещения для энергосистемы.

Схема замещения электрической сети представляет собой совокупность схем замещения её отдельных элементов, соединенных между собой в той же последовательности, что и на расчетной схеме;

6. Рассчитать согласно [5] параметры схемы замещения энергосистемы;
 7. Подготовить схему замещения для линии электропередачи;
 8. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схемы замещения линии электропередачи;
 9. Подготовить схемы замещения для двухобмоточных трансформаторов;
 10. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения двухобмоточных трансформаторов;
 11. Подготовить схему замещения для генератора;
 12. Рассчитать согласно [5] параметры схемы замещения генератора;
 13. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
- Один из узлов принимается за балансирующий;
14. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;

В программный комплекс RastrWin3 заносятся значения параметров элементов сети без приведения к основной ступени, где произошло короткое замыкание;

15. Заполнить таблицу «Генераторы (УР)»:
 - порядковый номер генератора (**N agr**);
 - марку генератора (**Название**);
 - номер узла, к которому присоединён генератор (**N узла**);
 - номинальную активную и реактивную мощности генератора (**P, Q**) в МВт и МВАр соответственно.
16. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;
17. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3;
18. В таблице «Узлы/Несим/Ид» выбрать место заземления нейтрали в расчётной схеме в графе «Тип0» (Значение «зак» представляет собой землю в

схеме нулевой последовательности; Значение «у» представляет собой не заземлённый узел в схеме нулевой последовательности);

19. Заполнить таблицу «Генератор/Несим»:

- порядковый номер генератора (**N агр**);
- марку генератора (**Название**);
- номер узла, к которому присоединён генератор (**N узла**);
- номинальную активную и реактивную мощности генератора (**P, Q**) в МВт и МВАр соответственно;
- колонки ЭДС генератора в кВ (**E**) и реактивного сопротивления генератора прямой последовательности в Ом (**x**) заполняем значениями, полученными в результате соответствующего расчёта в среде Mathcad (значения заносятся без приведения к основной ступени, где произошло КЗ);

20. Заполнить таблицу «Состав/Несим»:

- номер несимметрии (**N**);
- номер составляющей несимметрии (**№ сост**) (1 – для составляющей прямой последовательности; 2 – для составляющей обратной последовательности; 0 – для составляющей нулевой последовательности));
- тип короткого замыкания (**Тип**) (1ф – однофазное замыкание, 2ф – двухфазное замыкание, 3ф – трёхфазное замыкание);
- номер узла, в котором произойдет короткое замыкание (**П1**).

21. Выполнить расчёт симметричных и несимметричных КЗ в различных узлах;

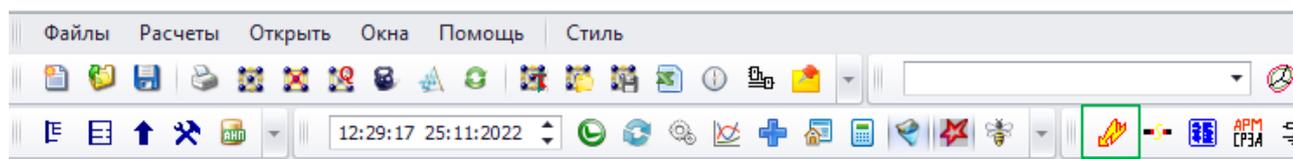


Рисунок 61 – Функция по расчёту токов короткого замыкания в RastrWin3

Значение тока короткого замыкания по прямой последовательности появится в таблице «Состав/Несим» и в таблице «Ветви/Несим/РФ».

	S	№	№ сост	Тип	П 1	П 2	П 3	П 4	L	I 1
1		1	1	3ф	5					24,0046

Рисунок 62 – Значение тока короткого замыкания в таблице «Состав/Несим»

	o	s	Тип	с0	tr0	N_нач	N_кон	N_л	Название	Ia_н	dIa_н	Ib_н	dIb_н	Ic_н	dIc_н	Ia_к	dIa_к	Ib_к	dIb_к	Ic_к	dIc_к	
1			ЛЭП	Выкл	1	2			Система - T1 (H-H)													
2			Тр-р		Тр-р	2	3		T1 (H-H) - T1 (B-H)													
3			ЛЭП	Выкл	3	4			T1 (B-H) - T2 (B-H)													
4			Тр-р		Тр-р	4	5		T2 (B-H) - T2 (H-H)													
5			Выкл	Выкл	5	6			T2 (H-H) - Генератор	24,005	90,000	24,005	-30,000	-24,005	30,000	24,005	90,000	24,005	-30,000	-24,005	30,000	

Рисунок 63 – Значение тока короткого замыкания по фазам А, В, С в таблице «Ветви/Несим/РФ»

22. Сравнить результаты, полученные при расчёте в среде Mathcad и в программном комплексе RastrWin3;

23. Выполнить анализ полученных результатов исходя из таблицы «Ветви/Несим/РФ» в программе RastrWin3;

24. Написать заключение о проделанной работе.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Отчёт должен содержать: название работы, цель и задачи работы, исходные данные для расчёта, основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений, выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов.

6.8. Лабораторная работа № 8. Анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи и трансформаторов в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Анализ допустимой токовой загрузки линий электропередачи и силовых трансформаторов, в том числе с учётом колебаний температуры.

Максимальная передаваемая по линии электропередачи мощность ограничена допустимой токовой нагрузкой, определяющей нагрев линии. В связи с существенным увеличением стоимости строительства новых высоковольтных линий электропередачи возрастает роль повышения пропускной способности существующих линий.

На рисунке 64 и в таблицах 14–15 представлены исходные данные для расчёта.

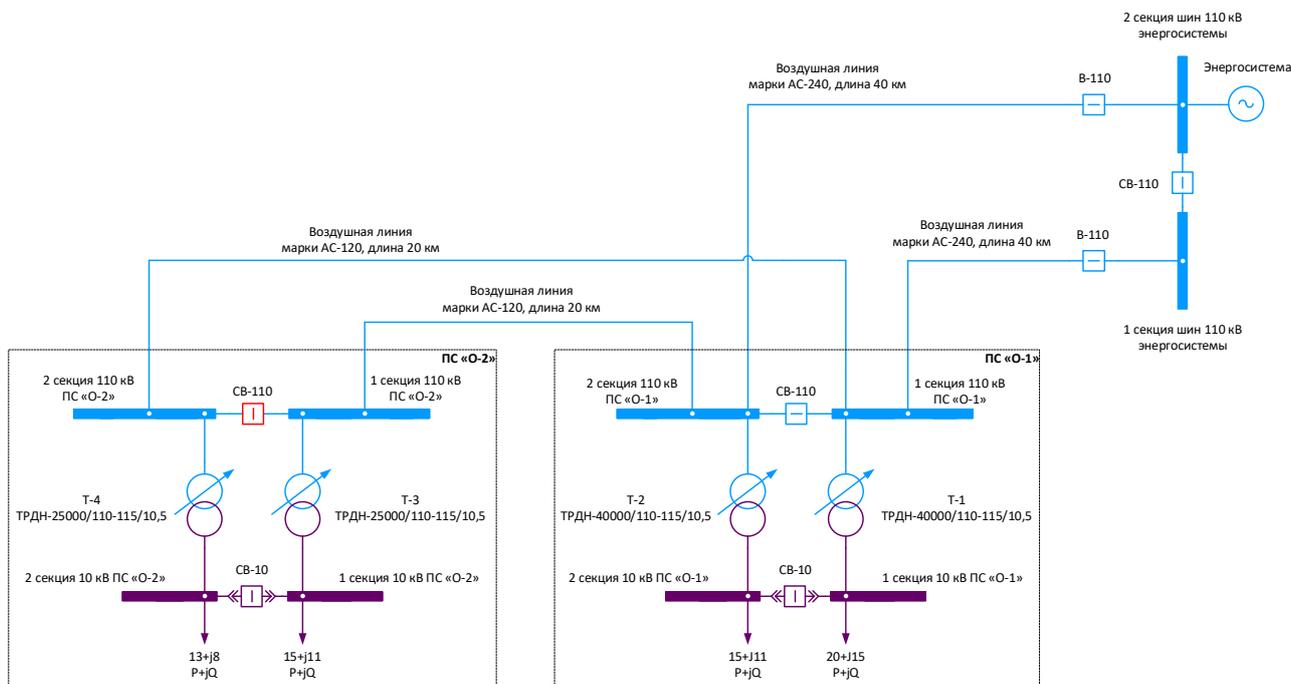


Рисунок 64 – Схема электрической сети

Таблица 14 – Параметры трансформаторов

№	Параметр	Трансформаторы	
		Т-1, Т-2	Т-3, Т-4
1	Марка	ТРДН-40000/110	ТРДН-25000/110
2	S , кВА	40000	25000
3	$U_{номВН}$, кВ	115	115
4	$U_{номНН}$, кВ	10,5	10,5
5	$u_{кВН}$, %	10,5	10,5
6	ΔP_x , кВт	34	25
7	ΔP_k , кВт	170	120
8	Регулирование напряжения	РПН $\pm 16 \times 1\%$	РПН $\pm 16 \times 1\%$

Таблица 15 – Данные по нагрузкам

Параметр	Место			
	Сеть низкого напряжения трансформаторов			
	Т-1	Т-2	Т-3	Т-4
P , МВт	20,0	15,0	15,0	13,0
Q , МВАр	15,0	11,0	11,0	8,0

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;

2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для линий электропередачи;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схемы замещения линий электропередачи;
7. Подготовить схемы замещения для двухобмоточных трансформаторов;
8. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения двухобмоточных трансформаторов;
9. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;
10. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;
11. Задать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ);

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В таблицу «**Анцапфы**» программного комплекса RastrWin3 для каждого трансформатора задать:

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпаек (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;
- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;
- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задаётся 1;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.

В таблицу «**Ветви**» программного комплекса RastrWin3 в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора.

При изменении номера анцапфы (задаётся в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации.

12. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;

13. Отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3;

14. Выполнить анализ отклонений напряжений в узловых точках сети в программном комплексе RastrWin3;

15. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3;

16. Выполнить анализ токовой загрузки линий электропередачи;

Выполнив команду **Открыть – Ветви – График_Идоп_от_Т**, открывается график зависимости допустимого тока (о.е.) от температуры для ветви (°С). Следует изменить номера зависимостей (**Num**) от 1...5.

Для линий электропередачи можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры (°С). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая загрузка ЛЭП**.

В таблице «**Токовая загрузка ЛЭП**» для линий электропередачи задать:

- температуру ветви (**Тс**) в °С;
- номер поправочного коэффициента с учётом температуры ветви (**N_I(t)_ДДТН**) в о.е.;
- допустимый длительный ток провода соответствующего сечения при температуре воздуха 25 °С (**Идоп_25_ДДТН**) в А [3].

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от Т**. Поле **Температура** используется для задания температуры для ветви, поле **Аварийная нагрузка (%)** – если допустимый ток рассчитывается с учётом заданной аварийной перегрузки в процентах.

В таблице «**Токовая загрузка ЛЭП**» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока провода линии электропередачи (**Идоп_расч_ДДТН**) в А;
- значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**ИИдоп_расч_ДДТН**) в %.

В таблице «**Ветви**» появится значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**Изагр.**) в %.

17. Выполнить анализ токовой загрузки трансформаторов;

Для трансформаторов можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры (°С). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая загрузка Тр-ров**.

В таблице «**Токовая загрузка Тр-ров**» для трансформаторов задать:

- температуру ветви (**Тс**) в °С;

- поправочный коэффициент с учётом температуры ветви ($N_{I(t)}_{ДДТН}$) в о.е.;
- допустимый длительный ток оборудования ($I_{доп_обор_ДДТН}$) в А.

Информацию о допустимом токе оборудования на стороне высшего напряжения ($I_{допВН}$), среднего напряжения ($I_{допСН}$), общей обмотке ($I_{допОО}$) трансформаторов соответствующей марки можно найти в таблице «Трансформаторы» программного комплекса RastrWin3.

Информацию о допустимой токовой загрузке трансформаторов записывать таблицу «Токовая загрузка Тр-ров» следующим образом:

- данные по обмотке высшего, среднего, низшего напряжений трансформатора записывать в поле $I_{доп_обор_ДДТН}$.

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от Т**.

В таблице «Токовая загрузка Тр-ров» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока трансформатора ($I_{доп_расч_ДДТН}$) в А;
- значение расчётной токовой загрузки трансформатора ($I_{Доп}$) в %.

В таблице «Ветви» появится значение расчётной токовой загрузки трансформатора ($I_{загр.}$) в %.

18. Выполнить анализ потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети в таблице «Узлы+Ветви» программного комплекса RastrWin3;

19. Написать заключение о проделанной работе.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Отчёт должен содержать: название работы, цель и задачи работы, исходные данные для расчёта, основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений, выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов.

6.9. Лабораторная работа № 9. Расчёт и анализ установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3

Цель работы: Расчёт и анализ установившегося режима электрической сети в программном комплексе RastrWin3.

Целью электрического расчёта сети является определение параметров режимов, выявление возможностей дальнейшего повышения экономичности работы электрической сети, оценка структуры потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети.

На рисунке 65 и в таблицах 16–19 представлены исходные данные.

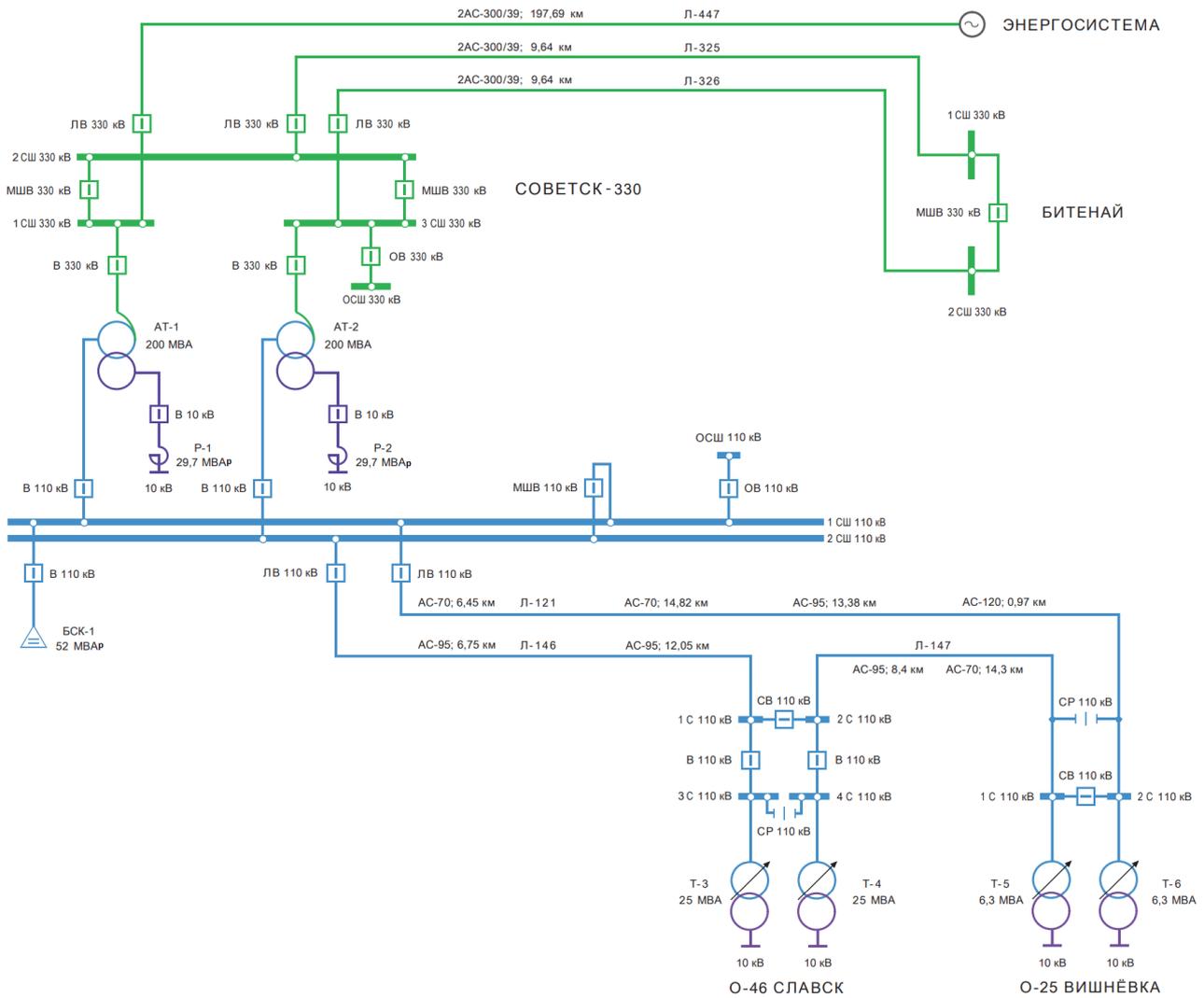


Рисунок 65 – Схема электрической сети

Таблица 16 – Параметры шунтирующих реакторов

Наименование	Марка	$U_{\text{НОМ}}$, кВ	Мощность ступени ($Q_{\text{НОМ}}$), МВАр
Р-1, Р-2	РКОС-9900/11-УХЛ1	10	29,7

Таблица 17 – Данные по нагрузкам

Параметр	Место					
	ПС 330 кВ О-5 «Центральная»		Сеть низкого напряжения трансформаторов			
	1 система шин	2 система шин	Т-3	Т-4	Т-5	Т-6
Р, МВт	110,0	130,0	19,0	19,0	4,0	4,0
Q, МВАр	50,0	60,0	8,0	8,0	2,0	2,0

Таблица 18 – Параметры батареи статических конденсаторов

Наименование	Марка	$U_{\text{ном}}$, кВ	Мощность ступени ($Q_{\text{ном}}$), МВАр	$C_{\text{ном}}$, МКФ
БСК-1	БСК-110-52	110	52	13,2

Таблица 19 – Параметры трансформаторов

№	Параметр	Трансформаторы		
		АТ-1, АТ-2	Т-3, Т-4	Т-5, Т-6
1	Марка	АТДЦТН-200000/330/110	ТРДН-25000/110	ТМН-6300/110
2	S , кВА	200000	25000	6300
3	$U_{\text{номВН}}$, кВ	330	115	115
4	$U_{\text{номСН}}$, кВ	115	-	-
5	$U_{\text{номНН}}$, кВ	10,5	10,5	11
6	$u_{\text{кВС}}$, %	10,5	-	-
7	$u_{\text{кВН}}$, %	38	10,5	10,5
9	$u_{\text{кСН}}$, %	25	-	-
10	ΔP_x , кВт	155	25	9,5
11	ΔP_k , кВт	560	120	40
12	Регулирование напряжения	РПН $\pm 16 \times 1\%$	РПН $\pm 16 \times 1\%$	РПН $\pm 16 \times 1\%$

План проведения лабораторного занятия:

1. Изучить общие правила техники безопасности при проведении лабораторных работ, изложенные в данном учебно-методическом пособии;
2. Непосредственно в лаборатории прослушать вводный инструктаж, проводимый ответственным лицом из числа преподавателей или инженеров;
3. Пройти опрос на знание правил техники безопасности при выполнении лабораторных работ;
4. При успешном прохождении проверки внести данные в журнал инструктажа для допуска к дальнейшей лабораторной работе;
5. Подготовить схемы замещения для линий электропередачи;
6. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения линий электропередачи;
7. Подготовить схемы замещения для двухобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов;
8. Рассчитать согласно справочным данным [3] параметры схем замещения двухобмоточных трансформаторов, автотрансформаторов;
9. Задать узлы и их параметры в программном комплексе RastrWin3. Один из узлов принимается за балансирующий;

10. Задать ветви и их параметры в программном комплексе RastrWin3;

11. Задать тип регулируемого трансформатора и номер анцапфы (номер положения отпайки устройства РПН, ПБВ);

Регулировочные ответвления размещаются, как правило, у трансформаторов на стороне высшего напряжения (в средней точке), а у автотрансформаторов – на стороне среднего напряжения.

В таблицу «**Анцапфы**» программного комплекса RastrWin3 для каждого трансформатора задать:

- номер устройства регулирования трансформатора (**Nbd**);
- название устройства регулирования трансформатора (**Название**);
- единицы измерения шага отпаяк (**ЕИ**). Для устройств РПН и ПБВ в %;
- порядок нумерации анцапф (+/-). В данном случае анцапфы нумеруются, начиная от максимальной положительной добавки и заканчивая максимальной отрицательной добавкой;
- тип устройства регулирования (**Тип**). РПН, ПБВ;
- число анцапф в нейтральном положении (**Кнейт**), по умолчанию задаётся 1;
- напряжение нерегулируемой ступени (**V_нр**) в кВ;
- напряжение регулируемой ступени (**V_рег**) в кВ;
- число анцапф (**N_анц**);
- величина шага (**Шаг**) в %.

В таблицу «**Ветви**» программного комплекса RastrWin3 в поле **БД_анц** следует указать номер устройства регулирования трансформатора.

При изменении номера анцапфы (задаётся в поле **№_анц**) происходит автоматическая коррекция коэффициента трансформации.

12. Выполнить расчёт установившегося режима в программном комплексе RastrWin3;

13. Отрегулировать напряжения в узловых точках сети с максимальной эффективностью в программе RastrWin3.

14. Выполнить анализ отклонений напряжений в узловых точках сети в программном комплексе RastrWin3;

15. Подготовить графическую схему в программном комплексе RastrWin3;

16. В таблицу «**Трансформаторы**» программного комплекса RastrWin3:

Для автотрансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_B**), среднего (**N_C**), низшего (**N_H**) напряжений;

- номер узла, соответствующий средней точке (**N_0**).

Для двухобмоточных трансформаторов задать:

- номер трансформатора (**N**);
- название трансформатора (**Название**);
- марка трансформатора (**Марка**);
- номера узлов, соответствующие обмоткам высшего (**N_V**), низшего (**N_H**) напряжений.

17. Выполнить анализ токовой загрузки линий электропередачи;

Выполнив команду **Открыть – Ветви – График_Идоп_от_Т**, открывается график зависимости допустимого тока (о.е.) от температуры для ветви (°C). Следует изменить номера зависимостей (**Num**) от 1...5.

Для линий электропередачи можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры (°C). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая загрузка ЛЭП**.

В таблице «**Токовая загрузка ЛЭП**» для линий электропередачи задать:

- температуру ветви (**Tc**) в °C;
- номер поправочного коэффициента с учётом температуры ветви (**N_I(t)_ДДТН**) в о.е.;
- допустимый длительный ток провода соответствующего сечения при температуре воздуха 25 °C (**Идоп_25_ДДТН**) в А [3].

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от Т**. Поле **Температура** используется для задания температуры для ветви, поле **Аварийная нагрузка (%)** – если допустимый ток рассчитывается с учётом заданной аварийной перегрузки в процентах.

В таблице «**Токовая загрузка ЛЭП**» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока провода линии электропередачи (**Идоп_расч_ДДТН**) в А;
- значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**ИИдоп_расч_ДДТН**) в %.

В таблице «**Ветви**» появится значение расчётной токовой загрузки провода линии электропередачи (**Изагр.**) в %.

18. Выполнить анализ токовой загрузки трансформаторов;

Для трансформаторов можно задать зависимость допустимого тока (А) от температуры (°C). Для этого следует выполнить команду **Открыть – Ветви – Токовая загрузка Тр-ров**.

В таблице «**Токовая загрузка Тр-ров**» для трансформаторов задать:

- температуру ветви (**Tc**) в °C;
- поправочный коэффициент с учётом температуры ветви (**N_I(t)_ДДТН**) в о.е.;

- допустимый длительный ток оборудования (**I_доп_обор_ДДТН**) в А.

Информацию о допустимом токе оборудования на стороне высшего напряжения (**I_допВН**), среднего напряжения (**I_допСН**), общей обмотке (**I_допОО**) трансформаторов соответствующей марки можно найти в таблице «**Трансформаторы**» программного комплекса RastrWin3.

Информацию о допустимой токовой нагрузке трансформаторов записывать таблицу «**Токовая нагрузка Тр-ров**» следующим образом:

- данные по обмотке высшего, среднего, низшего напряжений трансформатора записывать в поле **I_доп_обор_ДДТН**.

Расчет допустимого тока от температуры осуществляется при нажатии клавиши **F9** или выполнив команду **Расчеты – Доп. ток от Т**.

В таблице «**Токовая нагрузка Тр-ров**» появится:

- значение расчётного длительно допустимого тока трансформатора (**I_доп_расч_ДДТН**) в А;
- значение расчётной токовой нагрузки трансформатора (**I_Доп**) в %.

В таблице «**Ветви**» появится значение расчётной токовой нагрузки трансформатора (**I_загр.**) в %.

19. Выполнить анализ потерь активной мощности и потребляемой реактивной мощности в электрической сети в таблице «**Узлы+Ветви**» программного комплекса RastrWin3;

20. Написать заключение о проделанной работе.

Общие указания по оформлению отчёта по лабораторной работе:

Отчёт должен содержать: название работы, цель и задачи работы, исходные данные для расчёта, основные расчётные формулы, таблицы с результатами вычислений, графические интерпретации вычислений, выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В. И. Идельчик. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Документация к программе RastrWin (электронный ресурс), 2010. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/rastr/>.
3. Карапетян, И. Г., Файбисович, Д. Л., Шапиро, И. М. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: ЭНАС, 2012. – 376 с.
4. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: нац. стандарт Российской Федерации: изд. офиц.: утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по тех. регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: введ. впервые: дата введ. 2014-07-01 / разработ. ООО «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 “Электромагнитная совместимость технических средств”. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. меж-гос. стандарт Российской Федерации: изд. офиц.: введ. впервые: дата введ. 1995-01-01 / разработ. Госстандартом России. – Москва: Стандартинформ, 1993. – 42 с.

Приложение А. Образец титульного листа



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства
Кафедра энергетики

Зачтено / не зачтено

Дата защиты _____

Преподаватель _____

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № X

«Название работы»

по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети»
направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Работу выполнил:
студент гр. XX-3ЭЭ/XX-ЭЭ
Пожарский Д. М.

Калининград
202X

Локальный электронный методический материал

Коротких Кирилл Викторович

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

Редактор И.В. Голубева

Уч.-изд. л. 4,3. Печ. л. 4,1.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1