



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ ИМЕНИ
ГУМАРБЕКА
ДАУКЕЕВА**

**Кафедра
электроэнергетических
систем**

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ

Методические указания к выполнению расчетно-графических работ для
студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Алматы 2020

СОСТАВИТЕЛИ: Н.А. Генбач, Л.Ш. Утешкалиева, А.Т. Бектемиров.
Расчет режимов электрических сетей и систем. Методические указания по выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика. Алматы: АУЭС, 2020. - 34 с.

Методические указания содержат закономерности распределения напряжений, токов и мощностей в линиях, режимные характеристики электропередач, некоторые зависимости, определяющие режимы линий; даются расчеты параметров компенсирующих устройств и выявляются пределы передаваемой мощности и средства их увеличения.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

Ил. – 16, табл. – 5, библиогр. – 5 назв.

Рецензент: к.т.н., доц. К.О. Ғали

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева» на 2019 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», 2020 г.

Содержание

Введение.....	4
1 Методические указания к расчетно-графическим работам № 1. Расчет режимов работы сложно замкнутых электрических сетей.....	5
2 Методические указания к расчетно-графическим работам № 2. Расчет режимов работы электрических сетей в программе RastrVin.....	13
3 Методические указания к расчетно-графическим работам № 3. Режимы электропередач. Нахождение распределения напряжений, токов.....	21
Приложение А.....	30
Приложение Б.....	32
Список литературы.....	34

Введение

Методические указания для выполнения расчетно-графических работ предназначены для подготовки бакалавров по специальности 5В071800 - Электроэнергетика.

Целью выполнения настоящих расчетно-графических работ является исследование режимов работы электрических сетей и систем, подготовка расчётных составляющих элементов и схемы замещения сети, изучение и применение наиболее эффективных методов решения поставленной задачи. Результаты, полученные традиционными методами, реализуемые вручную, сопоставляются с получаемыми формализованными методами с применением программы RastrVin.

Важное значение для нормальной работы дальних линии электропередач имеет распределение потоков реактивных мощностей, методам определения которых посвящен ряд задач, рассматривающих также и влияние различных факторов на режим электропередачи.

На пропускную способность электропередач и их основные режимные характеристики активные сопротивления элементов системы в большинстве практически важных случаев оказывают незначительное влияние.

В расчетно-графических работах рассматриваются закономерности распределения напряжений, токов и мощностей в линиях, режимные характеристики электропередач, некоторые зависимости, определяющие режимы линий; даются расчеты параметров компенсирующих устройств и выявляются пределы передаваемой мощности и средства их увеличения.

В решениях задач приводятся применяемые формулы и соотношения, даются краткие пояснения их и значений, входящих в них величин. Для подробного ознакомления с формулами приводятся ссылки на литературу. Расчеты ведутся, главным образом, в относительных единицах.

1 Методические указания к расчетно-графической работе № 1. Расчет режимов работы сложно замкнутых электрических сетей

Цель работы: ознакомление с выполнением расчетов режимов сложно замкнутых электрических сетей.

Теоретические сведения.

Замкнутыми электрическими сетями называют сети, в которых электроэнергия потребителям может подаваться не менее чем с двух сторон.

К простейшим замкнутым сетям относятся сети, состоящие из одного контура (рисунок 1) или представляющие собой разомкнутую линию, питающуюся с двух концов (рисунок 2). В этих сетях каждый узел нагрузки получает питание по двум линиям.

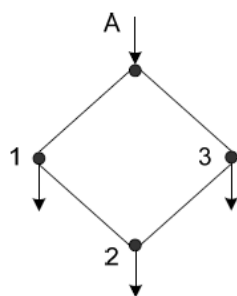


Рисунок 1 – Замкнутая сеть с одним контуром

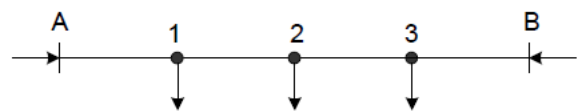


Рисунок 2 – Линия с двухсторонним питанием

К более сложным замкнутым сетям относятся сети, содержащие несколько контуров. Причем в контуры могут входить линии как одного (рисунок 3), так и нескольких номинальных напряжений (рисунок 4).

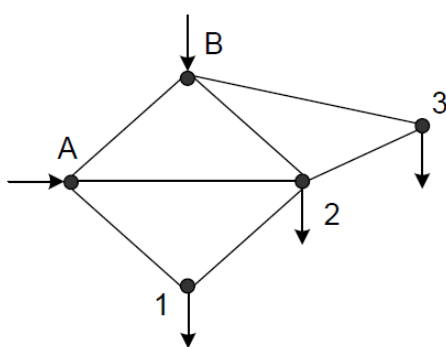


Рисунок 3 – Сложнозамкнутая сеть одного номинального напряжения

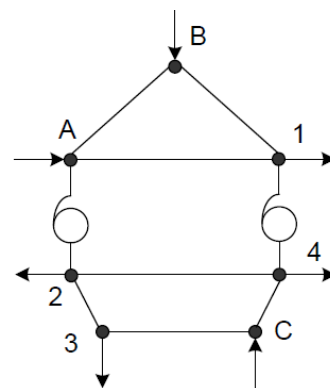


Рисунок 4 – Сложнозамкнутая сеть нескольких номинальных напряжений

К основным преимуществам замкнутых сетей относятся более высокая надежность электроснабжения потребителей и повышенная экономичность

из-за меньших потерь активной мощности. Недостатком является усложнение их эксплуатации, а также удорожание из-за большого числа линий в сложнозамкнутых сетях.

Расчеты режимов замкнутых электрических сетей значительно сложнее, чем разомкнутых. В разомкнутых сетях мощности на отдельных участках находят простым последовательным суммированием нагрузок и потерь мощности. В замкнутых сетях распределение мощностей по ветвям схемы не очевидно и зависит от длин и сечений проводов участков, величин нагрузок узлов и режимов напряжений источников питания. Поэтому для расчета замкнутых сетей применяют специальные методы.

Для расчетов вручную параметров установившихся режимов сложнозамкнутых электрических сетей может быть использован метод преобразования сети. Суть этого метода сводится к приведению сети к более простому виду (одному кольцу или разомкнутой сети). Упрощенная сеть рассчитывается с использованием известных методов, и затем производится обратное преобразование сети к исходному виду. При использовании метода преобразования применяются приемы разнеса нагрузок по концам участка сети и из центра звезды, объединения концевых источников питания и нагрузок, преобразования пассивных частей схем электрической сети.

Метод преобразования должен применяться с соблюдением условия неизменности параметров установившегося режима сети, внешней по отношению к преобразуемой ее части.

Кроме того, при использовании приемов преобразования необходимо оговаривать предварительно все принимаемые допущения.

Ниже рассмотрены некоторые приемы преобразования сети.

Разнос нагрузок по концам участка.

Разнос нагрузок должен выполняться так, чтобы преобразование электрической сети было эквивалентным. Эквивалентность преобразования соблюдается, если в результате не изменяются параметры режима в той части схемы, которая не подвергалась преобразованию.

Рассмотрим участок электрической сети, состоящий из узлов A , B , C , нагрузки которых заданы в виде узловых токов соответственно \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C и ветвей сети, имеющих сопротивления Z_{BA} и Z_{AC} (рисунок 5).

Выполним разнос нагрузки узла A между узлами B и C и определим токи $\dot{I}_{A'}$ и $\dot{I}_{A''}$ (части тока нагрузки \dot{I}_A), распределенные соответственно между узлами B и C (рисунок 6). Токи \dot{I}' и \dot{I}'' на исходной (рисунок 5) и эквивалентированной схеме (рисунок 6) одинаковы.

Выразим падение напряжения между узлами B и C через токи ветвей $\dot{I}_{A'}$ и $\dot{I}_{A''}$ в схеме рисунка 5 и через ток \dot{I}_{BC} в схеме рисунка 6 в соответствии с их условным направлением:

$$\Delta \dot{U}_{BC} = \Delta \dot{U}_{AC} = \dot{I}_{A'} \cdot Z_{BA} \cdot \sqrt{3} - \dot{I}_{A''} \cdot Z_{AC} \cdot \sqrt{3} = \dot{I}_{BC} (Z_{BA} + Z_{AC}) \cdot \sqrt{3}. \quad (1)$$

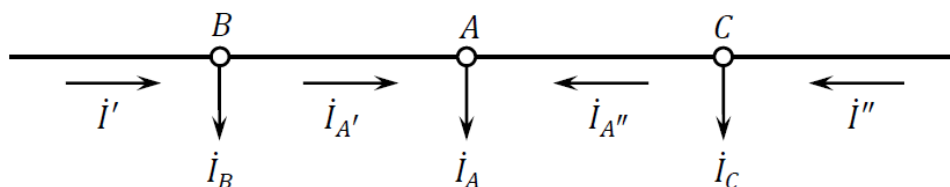


Рисунок 5 – Исходная схема электрической сети

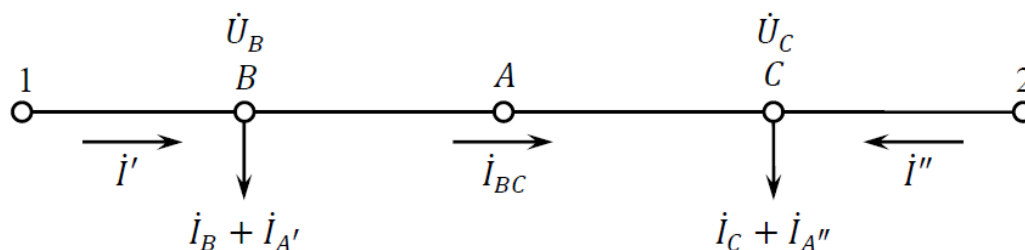


Рисунок 6 – Эквивалентная схема электрической сети

На основе I закона Кирхгофа в схеме рисунка 5 для узла B имеем:

$$i_{A'} = i' - i_B,$$

для узла A :

$$i_{A''} = i_A - i_{A'} = i_A + i_B - i'.$$

В схеме рисунка 6 для узла B имеем:

$$i_{BC} = i' - (i_B + i_{A'}).$$

Подставляя полученные выражения в (1) и выполняя сокращения, получим:

$$i_A \cdot Z_{AC} \sqrt{3} = i_{A'} \cdot (Z_{BA} + Z_{AC}) \cdot \sqrt{3}.$$

Откуда следует:

$$i_{A'} = i_A \cdot \frac{Z_{AC}}{Z_{BA} + Z_{AC}}; \quad i_{A''} = i_A \cdot \frac{Z_{BA}}{Z_{BA} + Z_{AC}}. \quad (2)$$

Таким образом, ток i_A разносится между узлами B и C обратно пропорционально сопротивлениям от узла A до узлов B и C . Если нагрузки узлов заданы в виде мощностей, то для выполнения разноса нагрузки следует сделать дополнительное допущение – разнос нагрузок выполняется при

отсутствии учета потерь мощности на участке $B-A-C$. Теперь воспользуемся выражением (2) и выразим токи $\dot{I}_{A'}$, $\dot{I}_{A''}$ и \dot{I}_A через потоки мощностей:

$$\dot{I}_{A'} = \frac{S_{A'}^*}{U_A \cdot \sqrt{3}}; \quad \dot{I}_{A''} = \frac{S_{A''}^*}{U_A \cdot \sqrt{3}}; \quad \dot{I}_A = \frac{S_A^*}{U_A \cdot \sqrt{3}}$$

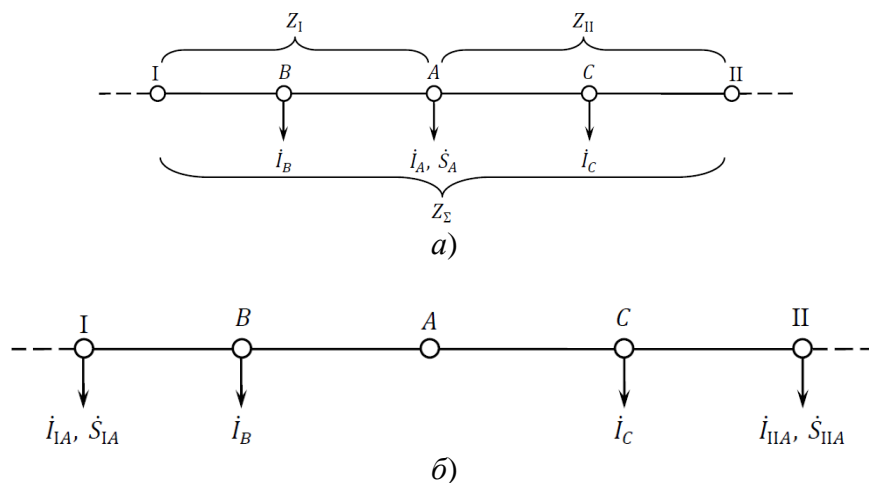
тогда

$$S_{A'}^* = S_A^* \cdot \frac{Z_{AC}}{Z_{BA} + Z_{AC}}; \quad S_{A''}^* = S_A^* \cdot \frac{Z_{BA}}{Z_{BA} + Z_{AC}} \quad (3)$$

или

$$\dot{S}_{A'} = \dot{S}_A \cdot \frac{\hat{Z}_{AC}}{\hat{Z}_{BA} + \hat{Z}_{AC}}; \quad \dot{S}_{A''} = \dot{S}_A \cdot \frac{\hat{Z}_{BA}}{\hat{Z}_{BA} + \hat{Z}_{AC}}. \quad (4)$$

Ток и мощность \dot{I}_A и \dot{S}_A можно при желании разнести между любыми двумя точками сети, а не только ближайшими. Эту операцию можно выполнить при условии, что узлы и ветви связаны друг с другом по цепочечной схеме. Например, можно найти токи \dot{I}_{IA} и \dot{I}_{IIA} мощности \dot{S}_{IA} и \dot{S}_{IIA} для пунктов питания I и II (рисунок 7).



a – исходная; b – результирующая схемы.

Рисунок 7 – Разнос нагрузки

Теперь

$$\dot{I}_{IA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Z_{II}}{Z_{\Sigma}}, \quad \dot{I}_{IIA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Z_1}{Z_{\Sigma}}; \quad (5)$$

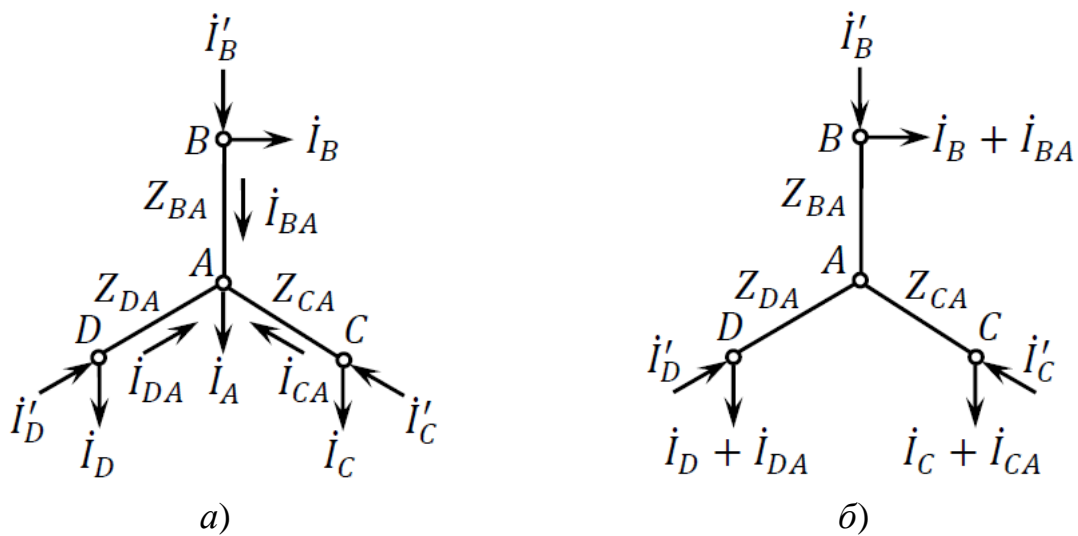
$$\dot{S}_{IA} = \dot{S}_A \cdot \frac{\hat{Z}_{II}}{\hat{Z}_{\Sigma}}; \quad \dot{S}_{IIA} = \dot{S}_A \cdot \frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_{\Sigma}}. \quad (6)$$

Как и для разомкнутых сетей, электрические расчеты замкнутых сетей выполняют, как правило, для наиболее характерных нормальных установившихся режимов наибольших и наименьших нагрузок. Кроме того, при анализе замкнутых сетей дополнительно требуется проведение расчетов послеаварийных режимов при отключении отдельных элементов сети. Это связано с тем, что отключение участка замкнутой сети может вызвать существенное изменение режима напряжений и потоков мощности, которые могут оказаться недопустимыми.

Большинство практических расчетов замкнутых сетей выполняют на ПК. С одной стороны, это объясняется большими сложностями расчетов из-за разветвленности реальных сетей, содержащих большое количество контуров, узлов и участков сети. С другой стороны, для таких расчетов созданы достаточно эффективные алгоритмы и программы на ПК. Освоение методов расчета замкнутых сетей необходимо для понимания физической сущности процессов, связанных с режимами электрической сети, и условий, при которых проводятся расчеты на ПК.

Разнос нагрузки из центра звезды.

Рассмотрим схему сети, показанную на рисунке 8, а, и разнесем нагрузку из центра звезды (узел А) между узлами В, С и D (рисунок 8, б).



а – исходная; б – результирующая схемы.

Рисунок 8. Разнос нагрузки из центра звезды
Примем допущение о равенстве напряжений узлов В, С, D:

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_D,$$

тогда

$$\Delta \dot{U}_{BC} = i_{CA} \cdot Z_{CA} \cdot \sqrt{3} - i_{BA} \cdot Z_{BA} \cdot \sqrt{3} = 0;$$

$$\Delta \dot{U}_{BD} = \dot{I}_{BA} \cdot Z_{BA} \cdot \sqrt{3} - \dot{I}_{DA} \cdot Z_{DA} \cdot \sqrt{3} = 0.$$

На основе I закона Кирхгофа и, выполняя соответствующие подстановки получим следующие выражения

$$\dot{I}_{BA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_{BA}}{Y_{\Sigma}}; \quad \dot{I}_{CA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_{CA}}{Y_{\Sigma}}; \quad \dot{I}_{DA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_{DA}}{Y_{\Sigma}}. \quad (7)$$

Аналогично решается задача для «лучевой звезды»:

$$\dot{I}_{iA} = \dot{I}_A \cdot \frac{Y_{ia}}{Y_{\Sigma}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Для мощностей получим следующие выражения:

$$\dot{S}_{iA} = \dot{S}_A \cdot \frac{\hat{Y}_{iA}}{\hat{Y}_{\Sigma}}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

При выполнении разноса нагрузок из центра звезды параметры режима внешней сети не меняются, токи \dot{I}'_B , \dot{I}'_C , \dot{I}'_D сохраняют исходные значения. Для мощностей \dot{S}'_B , \dot{S}'_C , \dot{S}'_D это справедливо лишь с допущениями, т. е. отсутствует учет потерь мощностей в ветвях DA, BA и CA.

Формулы (7) и (8) могут использоваться при любых напряжениях в узлах звезды, в том числе и различных.

Преобразование пассивных схем.

Преобразование пассивных схем рассматривается при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники», поэтому здесь приводятся только конечные выражения преобразований.

Последовательное и параллельное сложение сопротивлений и проводимостей показано на рисунке 9.

При параллельном сложении n элементов эквивалентные сопротивления $Z_{\text{э}}$ и проводимость $Y_{\text{э}}$ определяются как:

$$\frac{1}{Z_{\text{э}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}; \quad Y_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (9)$$

При последовательном сложении n элементов:

$$Z_{\text{э}} = \sum_{i=1}^n Z_i; \quad \frac{1}{Y_{\text{э}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i}. \quad (10)$$

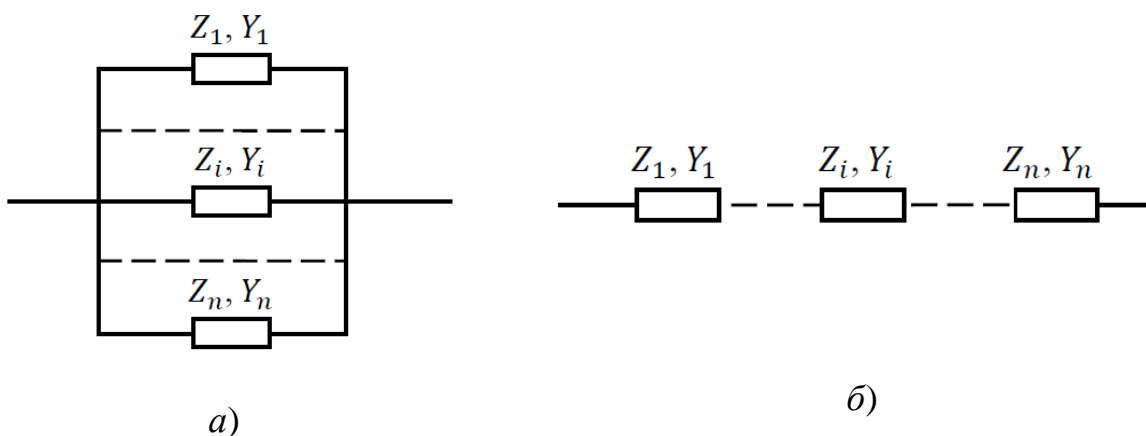


Рисунок 9 - Параллельное (а) и последовательное (б) включение элементов

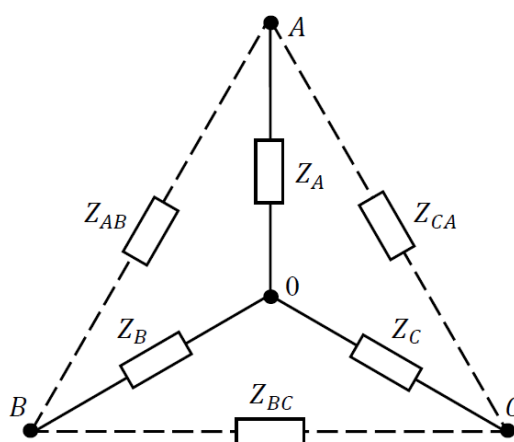


Рисунок 10 - Преобразование звезды в треугольник

Преобразование звезды в треугольник и обратное (рисунок 10) производятся по соотношениям:

$$Z_{AB} = \frac{Z_A \cdot Z_B + Z_A \cdot Z_C + Z_B \cdot Z_C}{Z_C}; \quad (11)$$

$$Z_A = \frac{Z_{AB} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}. \quad (12)$$

Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы.

Схема электрической сети, для которой производится расчет режимов работы, изображена на рисунке 11. Параметры электрической сети, необходимые для выполнения работы (протяженность линий электропередачи, марка провода воздушных линий, узловые нагрузки), приведены в приложении А.

РГР выполняется в соответствии с номером варианта; номер варианта указывается преподавателем.

Выполнение РГР предполагает подготовку к выполнению расчета режимов работы электрической сети; выполнение расчетов «вручную».

1. Подготовка к выполнению расчетов:

- на основании исходных данных к РГР и в соответствии с вариантом составить схему замещения электрической сети;
- на схему замещения нанести значения нагрузок потребителей, питающихся с шин подстанций, а также указать значение напряжения, поддерживаемого на шинах районной понижающей подстанции (РПП);
- все узлы схемы замещения пронумеровать цифрами от 1 до 100;
- выполнить расчет параметров элементов сети;
- расчетные параметры нанести на схему замещения.

2. Выполнение расчетов:

- рассчитать, пользуясь формулой (3), мощности головных участков рассматриваемой замкнутой сети;
- используя первый закон Кирхгофа, рассчитать мощности остальных участков сети и занести все полученные значения в таблицу 1;
- рассчитать значение падения напряжения на каждом участке и определить уровень напряжения в каждом узле. Полученные результаты занести в таблицу 2.

Таблица 1 – Перетоки мощности в электрической сети

Участок сети	$P_{нач.}$ МВт	$P_{кон.}$ МВт	$Q_{нач.}$ Мвар	$Q_{кон.}$ Мвар
А - 2				
А - 1				
А - 4				
1 - 5				
5 - 2				
2 - 4				
2 - 3				
4 - 3				

Таблица 2 – Уровни напряжения в сети

Подстанции	U , кВ
1	
2	
3	
4	
5	

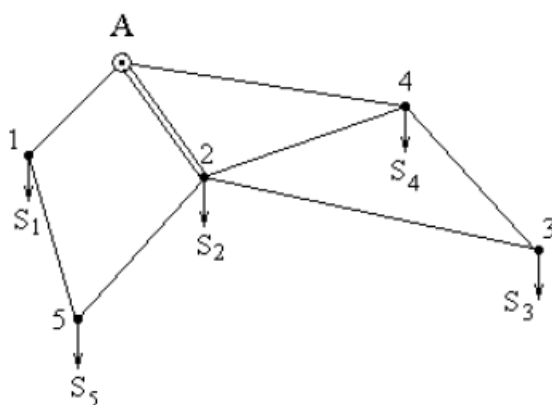


Рисунок 11– Схема электрической сети

2 Методические указания к расчетно-графической работе № 2. Расчет режимов работы электрических сетей в программе RastrWin

Цель работы: знакомство с программным комплексом RastrWin. Получение навыков работы в среде программы RastrWin.

Теоретические сведения.

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

Подготовка исходных данных. Перед проведением расчетов исходные данные необходимо представить в форме, понятной RastrWin. Для этого составляется схема замещения всей сети, на которой проставляются номера всех узлов (включая среднюю точку трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора), которые должны быть уникальными и отличными от нуля целыми числами, а также номинальные напряжения для каждого узла. Отдельные элементы сети (энергосистема, генераторы, нагрузки, компенсирующие устройства, линии, трансформаторы) представляются на схеме замещения в виде, показанном на рисунках 12 и 13.

На рисунке 12 и рисунке 13 обозначены величины:

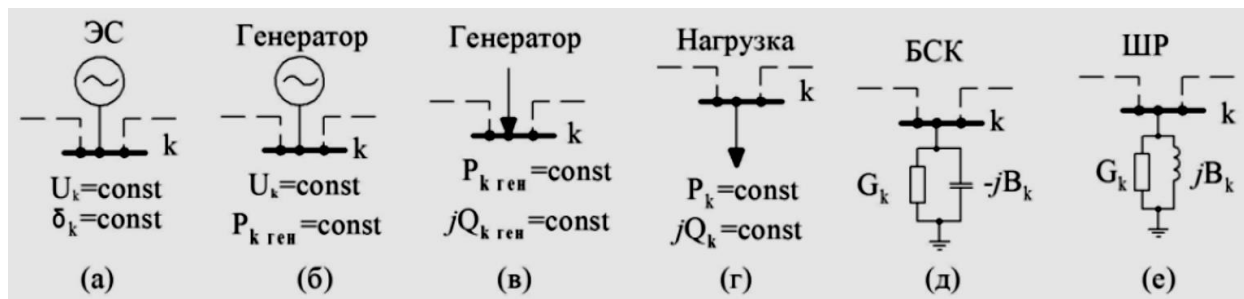
- k, l, j, m, n – номера узлов;
- U_k – напряжение в k -м узле;
- δ_k – угол напряжения в k -м узле;
- $P_{k, \text{ген}}, Q_{k, \text{ген}}$ – активная и реактивная мощности генерации в k -м узле;
- P_k, Q_k – активная и реактивная мощности нагрузки в k -м узле;
- G_k, B_k – активная и реактивная проводимости k -го узла с батареями статических конденсаторов БСК или шунтирующим реактором ШР;

- $R_{ij}, X_{ij}, R_{jm}, X_{jm}, R_{jn}, X_{jn}$ – активные и реактивные сопротивления ветвей $i-j, j-m, j-n$;

- G_{ij}, B_{ij} – активная и реактивная проводимости ветви $i-j$;

- $k_{Tij}, k_{Tjm}, k_{Tjn}$ – коэффициенты трансформации ветвей $i-j, j-m, j-n$.

Параметры ветвей, относящихся к трансформаторам, должны быть приведены к напряжению обмотки высшего напряжения.



(а) – энергосистема; (б) – генератор с фиксированными напряжением и активной мощностью; (в) – генератор с фиксированной генерируемой мощностью; (г) – узел нагрузки; (д) – узел с БСК; (е) – узел с ШР.

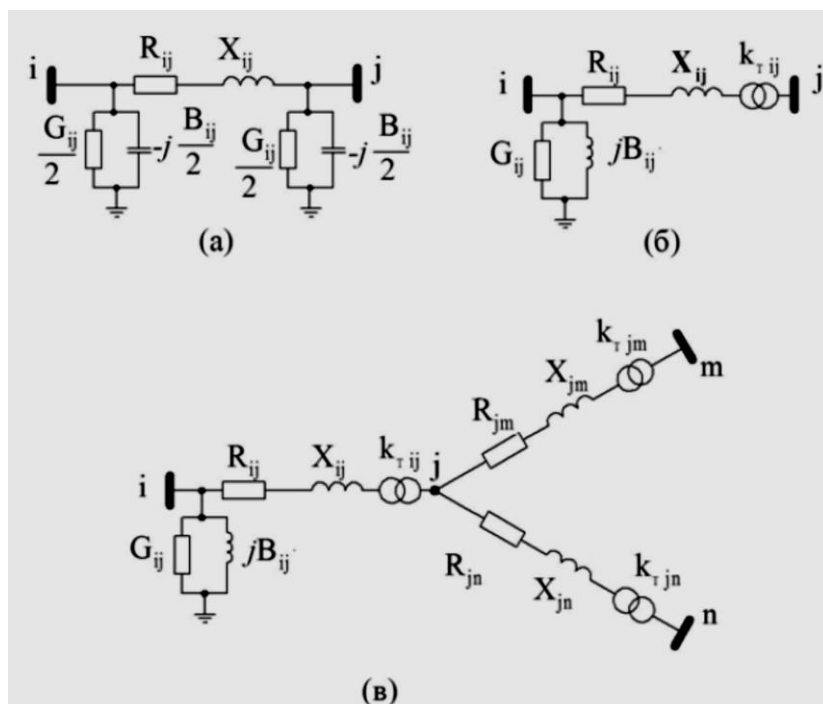
Рисунок 12 – Схемы замещения узлов электрической сети

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

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

Перед вводом новой схемы нужно выполнить команду *Новый* в пункте *Файлы* главного меню и отметить галочкой тип файла *режим.rg2* (*Файлы-Новый режим.rg2*). После этого целесообразно сразу сохранить вновь созданный файл режима (*Файлы – Сохранить как...*) в рабочем каталоге студента под именем, удобном для восприятия и идентификации и содержащем информацию о группе, фамилии студента, номере расчетно-графической работы.

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



(а) – ЛЭП; (б) – двухобмоточный трансформатор;
 (в) – трехобмоточный трансформатор или автотрансформатор.

Рисунок 13 – Схемы замещения ветвей электрической сети

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

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

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

Настройка рабочей области программы. Заголовки столбцов таблиц содержат названия данных, которые необходимо занести в соответствующее поле (исходные данные) либо которые определены в процессе расчета режима сети (расчетные данные). Некоторые из нужных/ненужных столбцов данных могут отсутствовать/присутствовать в таблицах, что зависит от настроек программы.

Сделать видимыми или скрыть столбцы с необходимой информацией (исходной либо расчетной) на время текущего сеанса работы с данным файлом можно с помощью команд *Скрыть*, *Заменить на*, *Вставить за*,

Вставить до в меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши на заголовке соответствующего столбца.

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

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

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

Чтобы изменения в настройках не исчезли после открытия другого файла или выхода из программы, необходимо их сохранить.

Для сохранения добавленных или удаленных из таблиц столбцов нужно после нажатия правой кнопки мыши на заголовке любого столбца выбрать пункт меню *Заполнить* и нажать *ОК*, затем выполнить команду *Файлы – Настройки программы – Формы*, в диалоговом окне *Формы* из списка *Формы* выбрать название таблицы (*Узлы* или *Ветви*), последовательно нажать *Применить* и *Сохранить*, и при всех выбранных галочках в появившемся окне нажать *ОК*, после чего нажать *Заккрыть*.

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

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

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

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

Тип – тип узла (*База*, *Нагр*, *Ген+*, *Ген-*); определяется программой автоматически за исключением базисного (балансирующего) узла, в качестве которого необходимо задать шину энергосистемы (ЭС на рисунке 12, а), выбрав в данный ячейке вариант *База*;

Номер – номер узла; задается в соответствии со схемой замещения сети;

Название – задается название узла;

U_{ном} – задается номинальное напряжение узла, [кВ];

$P_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$ – активная и реактивная мощности нагрузки в узле; заносятся величины $P_{\text{к}}$, $Q_{\text{к}}$ (рисунок 12 г) [МВт] и [Мвар];

$P_{\text{г}}$, $Q_{\text{г}}$ – активная и реактивная мощности генерации в узле; задается величина $P_{\text{к. ген}}$ для случая рисунок 12 б, и $P_{\text{к. ген}}$, $Q_{\text{к. ген}}$ для случая рисунок 12 в; может также задаваться только $Q_{\text{к. ген}}$ для КУ (+ $Q_{\text{к. ген}}$ для БКС, – $Q_{\text{к. ген}}$ для ШР, $\pm Q_{\text{к. ген}}$ для СК); для базисного (балансирующего) узла – расчетные величины, [МВт] и [Мвар];

Q_{min} , Q_{max} – пределы генерации реактивной мощности в узле; задаются для генераторных узлов для случая на рисунке 12 б, [Мвар];

$V_{\text{зд}}$ – модуль фиксированного напряжения в узле; задается и фиксируется напряжение $U_{\text{к}}$, [кВ]:

а) на шинах энергосистемы, т.е. для базисного (балансирующего) узла (рисунок 12 а);

б) в генераторных узлах для случая на рисунке 12 б, если позволяют заданные пределы генерации реактивной мощности $Q_{\text{min}} - Q_{\text{max}}$ и $Q_{\text{min}} < Q_{\text{max}}$;

$G_{\text{ш}}$, $B_{\text{ш}}$ – активная и реактивная проводимости шунта на землю в узлах, где установлены БСК или ШР; задаются величины $G_{\text{к}}$, $B_{\text{к}}$ для случая на рисунке 12, д, и $G_{\text{к}}$, $B_{\text{к}}$ для случая на рисунке 12 е, [мкСм];

V – расчетный модуль напряжения в узле; для базисного (балансирующего) и генераторного узла (рисунок 12 б) задается автоматически и фиксируется после задания величины $V_{\text{зд}}$, для остальных узлов рассчитываются программой, [кВ];

Δ – расчетный угол напряжения в узле; для базисного (балансирующего) узла задается и фиксируется величина $\delta_{\text{к}}$ (рисунок 12, а), для остальных узлов рассчитывается программой, [град].

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

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

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

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

$N_{\text{нач}}$, $N_{\text{кон}}$ – номера узлов, которыми ограничена ветвь; для трансформатора начало ветви $N_{\text{нач}}$ – это обязательно тот узел, к напряжению которого приведены его параметры (как правило, это напряжение обмотки высшего напряжения);

Название – название ветви; задается программой автоматически по известным названиям узлов, ограничивающих данную ветвь;

$N_{\text{п}}$ – номер параллельной ветви; задается, если несколько линий или трансформаторов работают параллельно;

R , X – активное и реактивное сопротивления ветви; задаются величины R_{ij} , X_{ij} , R_{jm} , X_{jm} , R_{jn} , X_{jn} по рисунку 13, [Ом];

G , B – суммарные активная и реактивная проводимости ветви; задаются величины G_{ij} , $-B_{ij}$ для ЛЭП (рисунок 13 а) и G_{ij} , B_{ij} для трансформатора (рисунок 13 б, в), [мкСм];

$K_{T/T}$ – вещественная часть комплексного коэффициента трансформации трансформатора; поскольку для большинства трансформаторов коэффициент трансформации совпадает с его вещественной частью, в это поле заносятся величины $k_{T ij}$, $k_{T jm}$, $k_{T jn}$ (рисунок 13 б, в); важно: величины $K_{T/T}$ есть отношение номинального напряжения обмотки узла $N_{кон}$ к номинальному напряжению обмотки узла $N_{нач}$, то есть $K_{T/T} < 1$.

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

Расчет режима сети. Перед расчетом установившегося режима сети при необходимости нужно настроить параметры расчета, для чего через главное меню программы должна быть открыта таблица *Режим (Расчеты – Параметры – Режим)*. Значение параметра *Точность расчета (dP)* (задается в МВт) необходимо корректировать в зависимости от мощностей в узлах сети, поскольку при точности, соизмеримой с нагрузками, результаты расчета могут оказаться некорректными. Значения остальных параметров из таблицы *Режим* можно оставить принятыми по умолчанию, и изменять, только если возникли проблемы при расчете режима (некорректно заданы исходные данные, режим расходится и т.п.).

Расчет режима сети производится после выполнения команды *Расчеты – Режим* или нажатия клавиши *F5*.

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

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

Печать результатов расчета. Чтобы распечатать результаты расчета режима сети, отображенные в таблицах *Узлы* и *Ветви*, необходимо сделать активным соответствующее окно, в диалоговом окне *Параметры страницы (Файлы – Настройки принтера...)* выбрать размер бумаги А4 и альбомную ориентацию страницы, после чего выполнить команду *Файлы – Печать...;* в открывшемся окне выбрать нужный принтер и нажать *ОК*.

Оформление результатов расчета режима. На принтере схемы замещения электрической сети (рисунок 14), принципиальная схема которой приведена на рисунке 15, показано, как оформить результаты расчета режима при выполнении РГР.

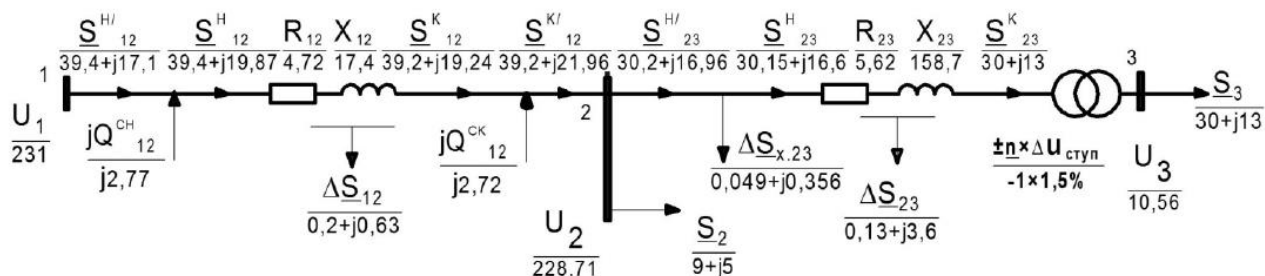


Рисунок 14 – Схема замещения сети с результатами расчета режима

Некоторые режимы, обозначенные на схеме замещения (рисунок 14):

$\underline{S}_{12}^{H'}$, $\underline{S}_{23}^{H'}$ – потоки мощности в начале ветвей 1-2 и 2-3 (столбцы $SI_{нач}$ либо $P_{нач}$ и $Q_{нач}$ в таблице *Ветви* программы RastrWin);

jQ_{12}^{HC} – зарядная мощность в начале ветви 1-2 (рассчитывается вручную по половине проводимости B_{12} и вычисленному RastrWin напряжению в начале ветви 1-2);

ΔS_{x23} – потери мощности х.х. трансформатора ветви 2-3 (столбцы данных $P_{ш}$ и $Q_{ш}$ в RastrWin, соответствующие мощности шунта ветви);

\underline{S}_{12}^H , \underline{S}_{23}^H – потоки в начале продольной части соответствующих ветвей сети (не отображаются в RastrWin, рассчитываются по известным $\underline{S}_{12}^{H'}$, $\underline{S}_{23}^{H'}$ и jQ_{12}^{HC} , ΔS_{x23} соответственно);

$\underline{S}_{12}^{K'}$, \underline{S}_{23}^K – потоки мощности в конце ветвей 1-2 и 2-3 (столбец $SI_{кон}$ или $P_{кон}$ и $Q_{кон}$ в таблице *Ветви* RastrWin);

jQ_{12}^{CK} – зарядная мощность в конце 1-2 (рассчитывается вручную по половине проводимости B_{12} и вычисленному RastrWin напряжению в конце ветви 1-2);

\underline{S}_{12}^K – поток мощности к концу продольной части ветви 1-2 (не отображаются в RastrWin, рассчитывается по известным $\underline{S}_{12}^{K'}$ и jQ_{12}^{CK});

ΔS_{12} , ΔS_{23} – потери мощности в продольной части (сопротивлениях) ветвей сети (столбцы dP и dQ в таблице *Ветви* программы RastrWin);

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

Исходные данные для выполнения расчетно-графической работы.

Схема электрической сети, для которой производится расчет режимов работы, изображена на рисунке 11. Параметры электрической сети, необходимые для выполнения работы (протяженность линий электропередачи, марка провода воздушных линий, узловые нагрузки,

уровень напряжения, поддерживаемый на шинах РПП, а также количество и марка понизительных силовых трансформаторов, установленных на подстанциях), приведены в приложении А.

РГР выполняется в соответствии с номером варианта; номер варианта указывается преподавателем.

Выполнение РГР предполагает два этапа: подготовка к выполнению расчета режимов работы электрической сети; выполнение расчетов в программе RastrWin.

1. Подготовка к выполнению расчетов:

- на основании исходных данных к РГР и в соответствии с вариантом составить схему замещения электрической сети;

- на схему замещения нанести значения нагрузок потребителей, питающихся с шин подстанций, а также указать значение напряжения, поддерживаемого на шинах районной понижающей подстанции (РПП);

- все узлы схемы замещения пронумеровать цифрами от 1 до 100.

2. Выполнение расчетов в программе RastrWin:

- в соответствии со схемой замещения произвести подготовку данных для расчета режима работы электрической сети в программе RastrWin, заполнить таблицу узлов и таблицу ветвей программного комплекса;

- на основании полученной расчетной схемы сформировать в программе RastrWin графическое отображение рассматриваемой электрической сети;

- выполнить контроль исходной информации, занесенной в программу, при обнаружении ошибок – исправить их;

- выполнить в программе RastrWin расчет нормального установившегося и послеаварийного режима работы электрической сети;

- результаты расчета занести в таблицы 3, 4;

- выполнить в программе RastrWin расчет установившихся режимов;

- выполнить в программе RastrWin расчет послеаварийного режимов.

Таблица 3 – Перетоки мощности в электрической сети

Участок сети	$P_{нач.}$ МВт	$P_{кон.}$ МВт	$Q_{нач.}$ Мвар	$Q_{кон.}$ Мвар
А - 2				
А - 1				
А - 4				
1 - 5				
5 - 2				
2 - 4				
2 - 3				
4 - 3				

Таблица 4 – Уровни напряжения в сети

Подстанции	U , кВ
1	
2	
3	
4	
5	

3 Методические указания к расчетно-графической работе № 3. Режимы электропередач. Нахождение распределения напряжений, токов

Цель работы: изучить закономерности распределения напряжений, токов и мощностей в линиях электропередачи, исследовать режимные характеристики электропередач.

Режимы работы длинных линий электропередачи имеют ряд особенностей, которые, в первую очередь, связаны с волновой природой электромагнитных процессов, заметно влияющих на режимы.

При анализе работы линий большой протяженности, длина которых соизмерима с длиной электромагнитной волны, появляется необходимость учета волновых характеристик линий, и они рассматриваются как цепи с распределенными параметрами [4,5].

Электрическими линиями с распределенными параметрами называют такие линии, в которых для одного и того же момента времени ток и напряжение непрерывно меняются при переходе от одной точки линии к соседней.

Волновыми характеристиками линий являются:

1) Z_B – волновое сопротивление, определяемое по формуле:

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}, \quad (13)$$

где $\underline{Y}_0 = g_0 + jb_0$ – погонная проводимость, См/км;

$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0$ – погонное сопротивление, Ом/км.

2) $\underline{\gamma}_0$ – коэффициент распространения электромагнитной волны:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot (g_0 + jb_0)} = \alpha_0 + j\beta_0, \quad (14)$$

где α_0 – коэффициент затухания, характеризующий затухание волны напряжения (тока) при распространении волны вдоль линии на единицу длины;

β_0 – коэффициент изменения фазы электромагнитной волны, характеризующий поворот вектора напряжения (тока) при распространении волны вдоль линии на единицу длины [рад/км]=[эл.град/км].

$$\beta_0 = \frac{2\pi \cdot f}{v}, \quad (15)$$

где $v=3 \cdot 10^5$ км/ч – скорость света.

При $f = 50$ Гц $\beta_0 = 1,05 \cdot 10^{-5}$ рад/км длина электромагнитной волны равна 6000 км. Для реальных линий с учетом различия в значениях погонных величин индуктивного сопротивления (x_0) и емкостной проводимости (b_0) для различных марок проводов и конструкций опор значение β_0 может незначительно меняться.

В ряде случаев при расчете режимов протяженных линий удобно пользоваться не географической длиной линии, определенной в километрах, а ее волновой длиной λ , выраженной в градусах:

$$\lambda = \beta_0 \cdot L, \quad (16)$$

где L – длина линии, км.

В расчетах режимов длинных линий, следует учесть то обстоятельство, что значение погонной активной проводимости g_0 определяется, главным образом, потерями мощности и энергии на корону.

Однако потери на корону учитываются в виде отбора мощности по концам линии. На параметры режима самой линии эти потери практически не влияют. Кроме того, для длинных линий индуктивное сопротивление много больше активного ($x_0 \gg r_0$), поэтому для упрощения расчета режимов можно пренебречь величинами r_0 и g_0 . В этом случае коэффициент затухания $\alpha_0 = 0$, а выражения для коэффициента распространения волны $\underline{\gamma}_0$ и волнового сопротивления \underline{Z}_B приобретают вид:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{x_0 \cdot b_0} = j\beta_0; \quad \underline{Z}_B = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}}. \quad (17)$$

Упрощения (17) характерны для идеализированных линий электропередачи.

Анализ режима работы можно провести с помощью элементарного участка длиной dl (рисунок 15).

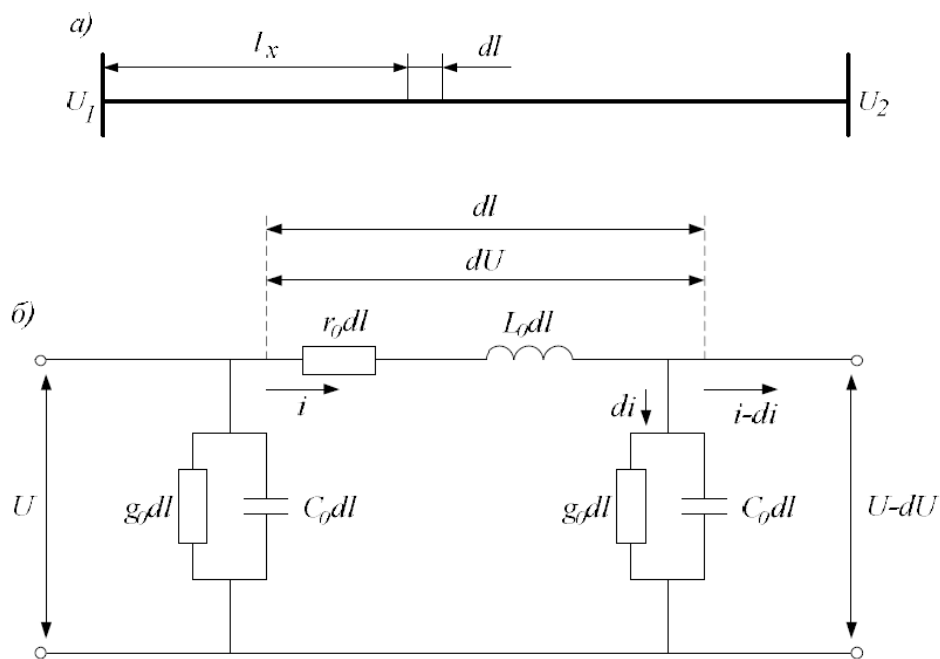
При протекании тока i в продольной ветви схемы замещения выделенного участка напряжение в конце будет меньше, чем в его начале, на величину dU за счет падения напряжения в активном сопротивлении и индуктивности на элементарном участке dl . Ток в продольной ветви

следующего участка уменьшиться на величину di за счет поперечной ветви схемы замещения. Последний имеет две составляющие: ток в активной и ток в емкостной проводимостях.

С учетом упрощений (17) уравнения для расчета параметров длинной линии имеют вид:

1) При задании исходных данных в начале линии параметры режима в промежуточной точке линии и в конце линии (при $\lambda_x = \lambda$), если λ_x отсчитывать от начала линии до x :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_X &= \dot{U}_1 \cdot \cos \lambda_X - j \dot{I}_1 \cdot Z_B \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{I}_X &= \dot{I}_1 \cdot \cos \lambda_X - j \frac{\dot{U}_1}{Z_B} \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{S}_X &= \dot{U}_X \cdot \dot{I}_X = P_X \pm j Q_X \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$



а) элементарный участок линии; б) его схема замещения.

Рисунок 15 – Элементарный участкток длиной dl

2) При задании исходных данных в конце линии параметры режима в промежуточной точке линии и в начале линии (при $\lambda_x = \lambda$), если λ_x отсчитывать от конца линии до x :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_X &= \dot{U}_2 \cdot \cos \lambda_X - j \dot{I}_2 \cdot Z_B \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{I}_X &= \dot{I}_2 \cdot \cos \lambda_X + j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{S}_X &= \dot{U}_X \cdot \dot{I}_X = P_X \pm j Q_X \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

В уравнениях (18) и (19) присутствует комплексное значение тока, но в практических расчетах режимов, как правило, используют значение мощности, тогда:

1) При задании исходных данных в начале линии:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_X &= \dot{U}_1 \cdot (\cos \lambda_X - Q_{*1} \cdot \sin \lambda_X) - jP_* \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{I}_X &= \frac{\dot{U}_1}{Z_B} \cdot [P_* \cos \lambda_X - j(\sin \lambda_X + Q_{*1} \cdot \cos \lambda_X)] \\ \dot{S}_{*X} &= \dot{U}_X \cdot \dot{I}_X = P_{*X} \pm jQ_{*X} \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

2) При задании исходных данных в конце линии:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_X &= \dot{U}_2 \cdot (\cos \lambda_X - Q_{*2} \cdot \sin \lambda_X) - jP_* \cdot \sin \lambda_X \\ \dot{I}_X &= \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \cdot [P_* \cos \lambda_X - j(\sin \lambda_X + Q_{*2} \cdot \cos \lambda_X)] \\ \dot{S}_{*X} &= \dot{U}_X \cdot \dot{I}_X = P_{*X} \pm jQ_{*X} \end{aligned} \right\}. \quad (21)$$

В выражениях (20), (21) $P_* = P_{*1} = P_{*2} = \frac{P_1}{S_{1\text{БАЗ}}}$, $Q_{*1} = \frac{Q_1}{S_{1\text{БАЗ}}}$ и $Q_{*2} = \frac{Q_2}{S_{2\text{БАЗ}}}$ – потоки активной и реактивной мощности в начале и конце элементарного участка линии dl (о.е.), где $S_{1\text{БАЗ}} = \frac{U_1^2}{Z_B}$ и $S_{2\text{БАЗ}} = \frac{U_2^2}{Z_B}$ – базисные мощности.

Электропередача переменного тока при расчетах ее режимов обычно представляется звеньями, каждое из которых может быть представлено четырехполюсником.

Обобщенные постоянные четырехполюсников (трансформаторов, реакторов, батарей конденсаторов) находятся из данных, получаемых при рассмотрении режимов холостого хода и короткого замыкания схем замещения отдельных звеньев. В случае Т-образной схемы замещения (рисунок 16, а) обобщенные постоянные находятся из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + Y_T Z_{T1} \\ B &= Z_{T1} + Z_{T2} + Y_T Z_{T1} \cdot Z_{T2} \\ C &= Y_T \\ D &= 1 + Y_T \cdot Z_{T2} \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

в случае П-образной схемы замещения (рисунок 16, б):

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + Z_{\Pi} Z_{\Pi 2} \\ B &= Z_{\Pi} \\ C &= Y_{\Pi 1} + Y_{\Pi 2} + Z_{\Pi} \cdot Y_{\Pi 1} \cdot Y_{\Pi 2} \\ D &= 1 + Z_{\Pi} \cdot Y_{\Pi 1} \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

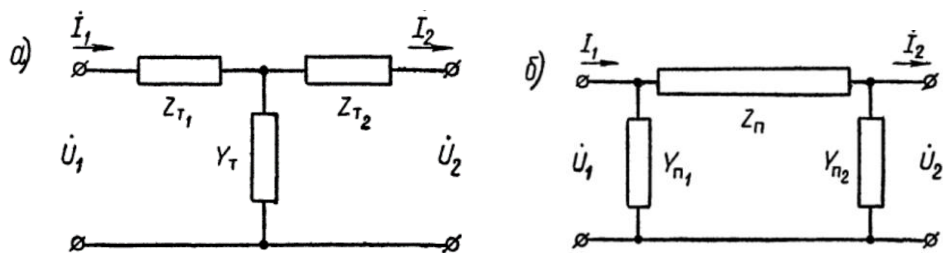


Рисунок 16 – Схема замещения звеньев электропередачи

Таблица 5 – Пропускная способность и дальность передачи линий 10-1150 кВ

Напряжение линии, кВ	Сечение провода, мм ²	Передаваемая мощность, МВт		Длина линии электропередачи, км	
		натуральная	при плотности тока 1,1 А/мм ² *	предельная при КПД=0,9	средняя (между двумя соседними ПС)
1	2	3	4	5	6
110	70 - 240	30	13 - 45	80	25
150	150 - 300	60	38 - 77	250	20
220	240 - 400	135	90 - 150	400	100
330	2X240 - 2X400	360	270 - 450	700	130
400	3x300 - 3x400	500	620 - 820	1000	180
500	3X300 - 3X500	900	770 - 1300	1200	280
750	5X300 - 5X400	2100	1500 - 2000	2200	300
1150	8X300 - 8X500	5200	4000 - 6000	3000	—

* Для ВЛ 750 – 1150 кВ при плотности тока 0,85 А/мм²

Для ЛЭП сверхвысокого напряжения характерен переменный режим передачи мощности, что приводит к изменению напряжения вдоль линии. Так, если $P > P_{\text{нат}}$, то напряжение в конце линии U_2 мало, его надо поднимать. При снижении мощности до $P < P_{\text{нат}}$ (в часы минимумов нагрузки) U_2 велико, его надо понижать. Кроме того, при минимальных нагрузках уменьшаются потери реактивной мощности в индуктивном сопротивлении линии и появляются большие перетоки зарядной мощности Q_C , которые создают дополнительные потери

$$\Delta P_L = \frac{Q_C^2}{U^2} \cdot r_L \quad (24)$$

Поэтому на ЛЭП сверхвысокого напряжения, как правило, устанавливаются различные компенсирующие устройства (КУ). С помощью КУ выравнивается напряжение вдоль линии, ограничиваются перетоки зарядной мощности.

Кроме того, КУ выполняют важные функции, повышая наибольшую передаваемую по линии мощность и обеспечивая баланс реактивной мощности в приемных системах.

Рассмотрим пример. Линия длиной $l = 1000$ км выполнена проводами марки ЗхАСО-500. Требуется найти напряжение в середине линии при передаче мощности $P_2 = 400$ и 1000 МВт; определить фазу напряжения и тока в начале линии.

В обоих случаях напряжения по концам линии равны 500 кВ; линия рассматривается без потерь ($U_1 = U_2 = 500$ кВ; $r_0 = 0$); волновое сопротивление линии $Z_c = 278$ Ом; натуральная мощность $P_c = 900$ МВт коэффициент изменения фазы на единицу длины $\alpha_0 = 0,06 \frac{\text{град}}{\text{км}}$.

Решение. Определяются обобщенные постоянные линии:

$$A_{cp} = \cos \alpha_0 l = \cos 60^\circ = 0,50;$$

$$B_{cp} = jz_c \sin \alpha_0 l = j278 \cdot 0,866 = 241e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$C = j \frac{1}{z_c} \sin \alpha_0 l = j \frac{1}{278} \cdot 0,866 = j3,11 \cdot 10^{-3} = 3,11 \cdot 10^{-3} e^{j90^\circ} \text{ См}.$$

Так как четырехполюсник, замещающий линию электропередачи, симметричен, то $A = D$, следовательно, $A = 0,5$.

Передаваемая мощность в относительных единицах:

$$P_{*2} = \frac{P_2}{P_c} = \frac{400}{900} = 0,455.$$

Реактивная мощность в конце линии

$$Q_{*2} = -ctg \alpha_0 l + \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha_0 l} - P_{*2}^2} = -0,577 + \sqrt{\frac{1}{0,866^2} - 0,455^2} = 0,48$$

или в именованных единицах,

$$Q_2 = Q_{*2} P_c = 0,48 \cdot 900 = 432 \text{ Мвар}.$$

Так как линия работает без перепада напряжения, то реактивная мощность в начале линии равна реактивной мощности в конце и противоположна по знаку. Следовательно,

$$Q_1 = -432 \text{ Мвар} .$$

Таким образом, поскольку по линии передается мощность меньше натуральной ($P_{*2} < 1$), то она генерирует избыточную реактивную мощность, которую необходимо компенсировать на приемном и передающем концах.

Угол φ_2 между током I_2 и напряжением U_2 определится как:

$$|\varphi_2| = \arctg \frac{Q_2}{P_2} = \arctg \frac{432}{400} = 47,2^\circ .$$

Ток в конце линии:

$$I = \sqrt{3} I_{2\phi} = \frac{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}}{U_2} e^{-j\varphi_2} = \frac{\sqrt{400^2 + 432^2}}{500} e^{-j47,2^\circ} = 1,18 e^{-j47,2^\circ} \text{ кА} .$$

Вектор напряжения U_2 считаем направленным по положительной вещественной оси, т.е. $U_2 = U_1$.

Напряжение в начале линии:

$$U_1 = AU_2 + \sqrt{3}BI_{2\phi} = 0,5 \cdot 500 + 241 e^{j90^\circ} \cdot 1,18 e^{-j47,2^\circ} = 250 + 284 e^{j42,8^\circ} = 500 \cdot e^{j22,8^\circ} \text{ кВ}$$

Следовательно, модуль напряжения в начале линии равен модулю напряжения в конце, угол между U_1 и U_2 составляет $22,8^\circ$.

Ток в начале линии:

$$I_1 = \sqrt{3}I_{1\phi} = CU_2 + DI_{2\phi} = 3,11 \cdot 10^{-3} e^{j90^\circ} \cdot 500 + 0,5 \cdot 1,18 e^{-j47,2^\circ} = 1,18 e^{j47,2^\circ} \text{ кА}$$

Следовательно, модуль тока в начале линии равен модулю тока в ее конце, а аргумент изменяет знак на противоположный, не меняя своего абсолютного значения.

Определим для половины длины линии обобщенные постоянные:

$$A_{cp} = \cos \frac{\alpha_0 l}{2} = 0,866;$$

$$B_{cp} = jz_c \sin \frac{\alpha_0 l}{2} = j278 \cdot 0,5 = 139 e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$C_{cp} = o \frac{1}{z_c} \sin \frac{\alpha_0 l}{2} = j \frac{1}{278} \cdot 0,5 = 1,8 \cdot 10^{-3} e^{j90^\circ} \text{ См};$$

$$D_{cp} = \cos \frac{\alpha_0 l}{2} = 0,866.$$

Напряжение в середине линии:

$$U_{cp} = A_{cp} U_2 + B_{cp} I_2 = 0,866 \cdot 500 + 139e^{j90^\circ} \cdot 1,18e^{-j47,2^\circ} = 565e^{j11,4^\circ} \text{ кВ.}$$

Передаваемая мощность в относительных единицах

$$P_{*2} = \frac{P_2}{P_c} = \frac{1000}{900} = 1,11.$$

Реактивная мощность в конце линии:

$$Q_{*2} = -0,577 + \sqrt{\frac{1}{0,866^2} - (1,11)^2} = -0,261.$$

При передаче по линии мощности, больше натуральной ($P_{*2} > 1$), в линию необходимо выдавать реактивную мощность с обоих концов.

В именованных единицах реактивная мощность в конце линии:

$$Q_2 = Q_{*2} P_c = -0,261 \cdot 900 = 235 \text{ МВАр},$$

$$Q_1 = -235 \text{ МВАр}.$$

Ток в конце линии:

$$I_{20} = \frac{\sqrt{1000^2 + 235^2}}{500} e^{j\varphi_2} = 2,06e^{j13,2^\circ} \text{ кА.}$$

Угол:

$$|\varphi_2| = \text{arctg} \frac{235}{1000} = 13,2^\circ.$$

Напряжение в середине линии:

$$U_{cp} = 0,866 \cdot 500 + 139e^{j90^\circ} \cdot 2,06e^{j13,2^\circ} = 463e^{j37,0^\circ} \text{ кВ.}$$

Задание к расчетно-графической работе № 3.

Линия длиной l км выполнена проводами марки согласно варианту задания. Варианты заданий приведены в приложениях Б.

1. Требуется найти напряжение в середине линии при передаче мощности P , МВт и определить фазу напряжения и тока в начале линии при условии $U_1 = U_2 =$.
2. Линия с предыдущими параметрами разомкнута на конце; в начале линии подведено $U_1 =$; требуется определить U_2 .
3. Определить напряжение в средней точке нагруженной мощностью P при включении в эту точку реактора мощностью Q_p .

Приложение А

Задание к расчетно-графической работе № 1

Таблица А.1 – Параметры оборудования электрической сети

Варианты								
Участки сети	1	2	3	4	5	6	7	8
Протяженность участка ЛЭП, км								
А - 2	20	35	26	25	19	24	27	20
А - 1	25	22	28	30	26	20	25	22
А - 4	10	20	25	22	17	21	24	18
1 - 5	18	21	21	18	25	22	22	21
5 - 2	63	52	69	41	52	45	12	85
2 - 4	23	56	89	21	78	54	52	20
2 - 3	89	66	66	20	45	89	63	56
4 - 3	69	26	26	23	54	69	22	14
Марка провода ЛЭП								
А - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
А - 1	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
А - 4	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
1 - 5	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
5 - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
2 - 4	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
2 - 3	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
4 - 3	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
Нагрузка потребителя, МВА								
П/С 1	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 2	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
П/С 3	22+j15	21+j11	27+j 17	27+j 18	28+j 18	20+j 12	28+j 18	22+j 15
П/С 4	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 5	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
Варианты								
Участки сети	9	10	11	12	13	14	15	16
Протяженность участка ЛЭП, км								
А - 2	20	35	26	25	19	24	27	20
А - 1	25	22	28	30	26	20	25	22
А - 4	10	20	25	22	17	21	24	18
1 - 5	18	21	21	18	25	22	22	21
5 - 2	63	52	69	41	52	45	12	85
2 - 4	23	56	89	21	78	54	52	20
2 - 3	89	66	66	20	45	89	63	56
4 - 3	69	26	26	23	54	69	22	14
Марка провода ЛЭП								
А - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
А - 1	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
А - 4	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120

Продолжение таблицы А.1

1 - 5	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
5 - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
2 - 4	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
2 - 3	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
4 - 3	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
Нагрузка потребителя, МВА								
П/С 1	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 2	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
П/С 3	22+j15	21+j11	27+j 17	27+j 18	28+j 18	20+j 12	28+j 18	22+j 15
П/С 4	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 5	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
Варианты								
Участки сети	17	18	19	20	21	22	23	24
Протяженность участка ЛЭП, км								
А - 2	20	35	26	25	19	24	27	20
А - 1	25	22	28	30	26	20	25	22
А - 4	10	20	25	22	17	21	24	18
1 - 5	18	21	21	18	25	22	22	21
5 - 2	63	52	69	41	52	45	12	85
2 - 4	23	56	89	21	78	54	52	20
2 - 3	89	66	66	20	45	89	63	56
4 - 3	69	26	26	23	54	69	22	14
Марка провода ЛЭП								
А - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
А - 1	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
А - 4	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
1 - 5	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
5 - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
2 - 4	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
2 - 3	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
4 - 3	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
Нагрузка потребителя, МВА								
П/С 1	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 2	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
П/С 3	22+j15	21+j11	27+j 17	27+j 18	28+j 18	20+j 12	28+j 18	22+j 15
П/С 4	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 5	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
Варианты								
Участки сети	25	26	27	28	29	30	31	32
Протяженность участка ЛЭП, км								
А - 2	20	35	26	25	19	24	27	20
А - 1	25	22	28	30	26	20	25	22
А - 4	10	20	25	22	17	21	24	18
1 - 5	18	21	21	18	25	22	22	21
5 - 2	63	52	69	41	52	45	12	85
2 - 4	23	56	89	21	78	54	52	20

Продолжение таблицы А.1

2 - 3	89	66	66	20	45	89	63	56
4 - 3	69	26	26	23	54	69	22	14
Марка провода ЛЭП								
А - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
А - 1	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
А - 4	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
1 - 5	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
5 - 2	АС-240	АС-185	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185	АС-185	АС-185
2 - 4	АС-185	АС-240	АС-240	АС-240	АС-185	АС-240	АС-185	АС-185
2 - 3	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-185	АС-120
4 - 3	АС-150	АС-185	АС-150	АС-185	АС-150	АС-150	АС-185	АС-150
Нагрузка потребителя, МВА								
П/С 1	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 2	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12
П/С 3	22+j15	21+j11	27+j 17	27+j 18	28+j 18	20+j 12	28+j 18	22+j 15
П/С 4	29+j17	22+j15	20+j12	21+j11	20+j12	28+j 18	20+j 12	21+j11
П/С 5	28+j18	27+j18	28+j10	28+j 18	22+j 15	22+j 15	22+j 15	20+j 12

Приложение Б

Задание к расчетно-графической работе № 3

Таблица Б.1 – Параметры электрической сети

№	Длина линии l , км	Напряжение U_1 , кВ	Марка провода	Передаваемая мощность, P МВт;	Мощность реактора, Q_p Мвар
1	500	500	3хАСО-400	300	180
2	600	500	3хАСО-500	400	180
3	800	500	3хАСО-400	500	180
4	900	500	3хАСО-300	600	300
5	1000	500	3хАСО-300	500	300
6	1000	500	3хАСО-300	800	300
7	700	500	3хАСО-400	400	180
8	600	500	3хАСО-300	500	300
9	500	500	3хАСО-500	750	180
10	1200	500	3хАСО-500	600	300
11	1000	750	4хАСО-500	1000	300
12	1100	750	4хАСО-600	1200	360
13	1200	750	4хАСО-700	1300	360
14	800	750	4хАСО-500	900	300
15	900	750	4хАСО-600	800	500
16	700	750	4хАСО-700	500	500
17	600	750	4хАСО-500	1000	300
18	500	750	4хАСО-600	1100	300
19	400	750	4хАСО-700	1200	360
20	1100	750	4хАСО-600	950	500
21	700	500	3хАСО-300	550	260
22	600	330	3хАСО-300	420	180
23	550	500	3хАСО-300	500	250
24	650	500	4хАСО-300	950	180
25	700	500	4хАСО-300	1000	180

Список литературы

- 1 Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
- 2 Электрические системы. Т. II Электрические сети/Под ред. В.А. Веникова. М.: Высшая школа, 1999. – 412 с.
- 3 Поспелов Г.Е., Федин В.Т. и др. Электрические системы и сети. – Минск: УП Технопринт, 2004. – 720 с.
- 4 Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. Учеб. для вузов. – Изд. дом МЭИ, 2007.- 488 с.
- 5 Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учебн. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 272 с.

Наталья Алексеевна Генбач
Ляззат Шынбулатовна Утешкалиева
Анур Бектемиров

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ

Методические указания по выполнению расчетно-графических работ
для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика

Редактор Сластихина Л.Т.

Специалист по стандартизации Данько Е.Т.

Подпись в печать _____
Тираж 30 экз.
Объем 2,0 уч.-изд. л.

Формат 60x84 1/16
Бумага типографская № 1
Заказ ____ Цена 1000 тг

Копировально-множительное бюро
Некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева»
050013, Алматы, Байтурсынова, 126/1