

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению курсовой работы по дисциплине
«Моделирование установившихся режимов в электрических системах»

Донецк
2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

КАФЕДРА «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению курсовой работы по дисциплине
«Моделирование установившихся режимов в электрических системах»

для обучающихся по направлению подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электроэнергетические системы и сети»
всех форм обучения

РАССМОТРЕНО
на заседании кафедры электрических
систем
Протокол № 8 от 07.03.2023 г.

УТВЕРЖДЕНО
на заседании учебно-издательского
совета ДонНТУ
Протокол № 5 от 17.05.2023 г.

Донецк
2023

УДК 621.311(076)
М54

Составитель:

Гришанов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры электрических систем ФГБОУ ВО «ДонНТУ»;

М54 Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» : для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроэнергетические системы и сети» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «ДонНТУ»; Каф. электрических систем ; сост. С. А. Гришанов. – Донецк : ДонНТУ, 2023. – Систем. требования: Acrobat Reader. – Загл. с титул. экрана.

В методических указаниях изложены основные положения, перечень теоретических вопросов и методические указания к выполнению курсовой работы. Данные указания помогут приобрести знания в области решения задач энергетики известными математическими методами с использованием теории графов и матричной алгебры в рамках дисциплины «Моделирование установившихся режимов в электрических системах».

Ответственный за выпуск:

Полковниченко Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрических систем и сетей ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

УДК 621.311(076)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Общие положения	7
2 Задание к курсовой работе для студентов очной формы обучения.....	8
3 Задание к курсовой работе для студентов заочной формы обучения	19
4 Указания к выполнению	28
4.1 Составление схемы замещения сети и расчет ее параметров.....	28
4.2 Получение расчетных мощностей узлов нагрузки (в задании заочников)	31
4.2 Расчет установившегося режима электрической системы.....	32
4.2.1 Метод узловых напряжений.....	34
4.2.2 Использование метода обобщенного уравнения состояния и метода контурных токов.....	36
4.2.3 Расчет токов в ветвях разомкнутой сети при помощи коэффициентов распределения токов дерева	39
4.2.4 Получение фактических значений токов и напряжений.....	40
4.2.5 Итерационные методы	40
4.2.6 Составление балансов мощностей.....	42
5 Требования к оформлению курсовой работы.....	44
Литература	46

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации электрических систем и сетей требуется решать разнообразные задачи, связанные с анализом установившихся режимов ее работы. Для этого широко применяются вычислительные методы высшей математики. Так расчет установившихся режимов электрических сетей сводится к составлению и решению системы линейных (и нелинейных) алгебраических уравнений с использованием понятий, которые хорошо известны из общего курса математического анализа [1-3].

Математическое описание электрической системы имеет свою специфику, а именно построение схем замещения отдельных элементов электрической системы: генераторов (источников электрической энергии), трансформаторов, линий электропередач и нагрузок [4]. А также получение математического описания электрических связей между основными элементами электрической системы. Чтобы создать математическое описание системы, необходимо в виде математической модели представить все связи между переменными процессами. Изучение этих процессов, включая их математическую интерпретацию, направлено на обеспечение лучшей работы электрической системы, основная задача которой - выработка энергии. Значительный объем постановочной задачи, большая размерность фактических объектов исследования, затрудняют их «классическое» решение. Поэтому основное внимание в данных методических указаниях сосредоточено на методах, которые способны существенно упростить и в максимальной степени формализовать процедуру расчета. Это создает предпосылки для применения в расчетах персональных ЭВМ: не только для производства вычислений, но и для выбора рационального решения и последующего его анализа.

При этом современные математические программные пакеты позволяют довольно просто и наглядно решать подобные инженерные задачи без знания языков программирования, а также обладают богатыми графическими возможностями для визуализации результатов расчета. В большинстве подобных программ используются общепринятые математические обозначения и интуитивно понят-

ные имена встроенных функций, что облегчает работу с ним пользователям, не знакомым с программированием. В частности, в методических указаниях рассмотрены возможности применения математического пакета MATHCAD [5] при изучении курса «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» и выполнении курсовой работы по данной дисциплине.

Характерной чертой курса «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» является широкое разнообразие разделов математики, отдельные части которой используются для решения задач электроэнергетики. Среди разделов в первую очередь следует назвать следующие: линейная алгебра; теория графов; дифференциальные уравнения; операторные преобразования; теория оптимизации; численные методы. Частично теоретические сведения и примеры из указанных разделов математики приведены в настоящих методических указаниях.

Одним из основных видов занятий студентов очной формы обучения по курсу «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» является выполнение курсовой работы. Приступать к выполнению работы следует после изучения необходимого материала на лекционных и практических занятиях, а также используя рекомендованную литературу.

Цель данной курсовой работы является закрепление теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины «Моделирование установившихся режимов в электрических системах», а также выработка практических навыков расчета установившихся режимов работы электрической сети при изменении условий ее работы. Для облегчения расчетов курсовой работы, все расчеты рекомендуется выполнять с использованием вычислительной техники при помощи программного комплекса MATHCAD.

В целях стимулирования самостоятельной работы в методических указаниях нет готовых числовых примеров. Здесь приводятся только основные формулы, алгоритмы и порядок оформления расчетов. Их практической реализацией на ЭВМ и, тем более, аналитической работой каждый студент занимается самостоятельно, при необходимости консультируясь с преподавателем.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовая работа – это документ, который представляет собой форму отчетности о самостоятельной работе студента по дисциплине «Моделирование установившихся режимов в электрических системах». Курсовая работа включает аналитическую и расчетную части, и представляет собой законченное решение поставленной проблемы в рамках изучаемой дисциплины.

Основной задачей курсовой работы по дисциплине «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» является расчет и анализ установившихся режимов электрической системы, которая имеет сложнзамкнутую структуру и питается от одного источника питания (базисный узел). Курсовая работа предусматривает расчет параметров схем замещения элементов сети, а также расчет естественного распределения потоков мощности для замкнутой сети.

Работа оформляется в виде рукописи (пояснительной записки), объемом не более 30-40 страниц, излагающей постановку и решение задачи, содержание исследования и его основные результаты. Обязательным структурным элементом курсовой работы является аналитический обзор темы, содержащий обобщенные, систематизированные и критически сведения об исследуемых методах и области их применения. В пояснительную записку должны быть включены схема замещения, с нанесенными на нее параметрами и номерами узлов и ветвей и структурная схема с результатами расчетов режимов (токи в ветвях и напряжения в узлах). К ним прилагаются файлы программ и исходных данных.

При выполнении всех разделов следует использовать специальные вычислительные методы, которые реализуются на ЭВМ с использованием известных программных пакетов (MATHCAD). Отлаженность программ подтверждается сравнением результатов расчета, выполненного различными методами на ЭВМ и при использовании встроенных функций MATHCAD.

Курсовая работа завершается заключением, в котором излагаются выводы, сформулированные из анализа параметров расчетных режимов и возможностей разработанных программ.

2 ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

Общее задание

1. Составить схему замещения электрической системы (номер схемы рис. 2.1-2.4 в соответствии с вариантом задания по табл. 2.1). Выбрать положительные направления токов ветвей.

2. Определить параметры схемы замещения. Параметры линий и трансформаторов взять из табл.2.2-2.5. По заданной нагрузке потребителей (табл.2.6), по зарядным мощностям линий (актуально для сетей напряжением 110-220 кВ) и по потерям холостого хода трансформаторов [4] получить расчетные мощности узлов потребления. Нагрузку узлов представить в виде задающих токов. Задающие токи получить, используя напряжения и проводимости этих узлов.

3. Построить направленный граф сети. Выделить в нем дерево и хорды. Проверить правильность выделения дерева и хорд. Пронумеровать узлы и ветви в установленном порядке (базисный узел имеет последний номер).

4. Составить первую и вторую матрицы соединений.

Для задания 1.

1. Нагрузки представить в виде задающих токов.

2. Составить вектор задающих токов в узлах.

3. Составить матрицу сопротивлений ветвей.

4. Выполнить расчет установившегося режима сети с использованием аналитических методов: на основе обобщенного уравнения состояния; методом узловых напряжений; методом контурных токов. Получить точное решение, используя элементы теории графов и матричной алгебры.

5. Полученные в результате расчета токи ветвей и напряжения узлов нанести на граф сети. Уточнить направления ветвей по результатам расчета.

6. Проанализировать полученное решение.

Для задания 2.

1. Изменить схему в соответствии с заданием. Вариант послеаварийного режима приведен в табл. 2.1.
2. Нагрузки представить в виде задающих токов
3. Составить матрицу коэффициентов распределения дерева для разомкнутой сети.
4. Выполнить расчет послеаварийного режима методом на основе матрицы коэффициентов распределения дерева.
5. Полученные в результате расчета токи ветвей и напряжения узлов нанести на граф сети. Уточнить направления ветвей по результатам расчета.
6. Проанализировать полученное решение.

Для задания 3.

1. Нагрузки представить в виде мощностей. Задающие токи принимают вид нелинейных зависимостей от напряжения в узлах их приложения.
2. Составить матрицу узловых проводимостей для заданной схемы сети.
3. Составить систему нелинейных узловых уравнений в матричной форме.
4. Решить задачу используя метод Ньютона или Ньютона-Рафсона, простой итерации или метод Зейделя в зависимости от задания. В качестве начальных приближений принять номинальное напряжения сети.
5. На основании полученных токов в ветвях и напряжений в узлах получить мощности начала и конца ветви и соответственно потери мощности в сети.
6. Проанализировать уровни напряжения на участках сети и уточнить фактические напряжения в узлах нагрузки с учетом коэффициента трансформации.
7. Нанести на граф сети мощности начала и конца ветви, а также напряжения узлов.
8. Проанализировать полученное решение.

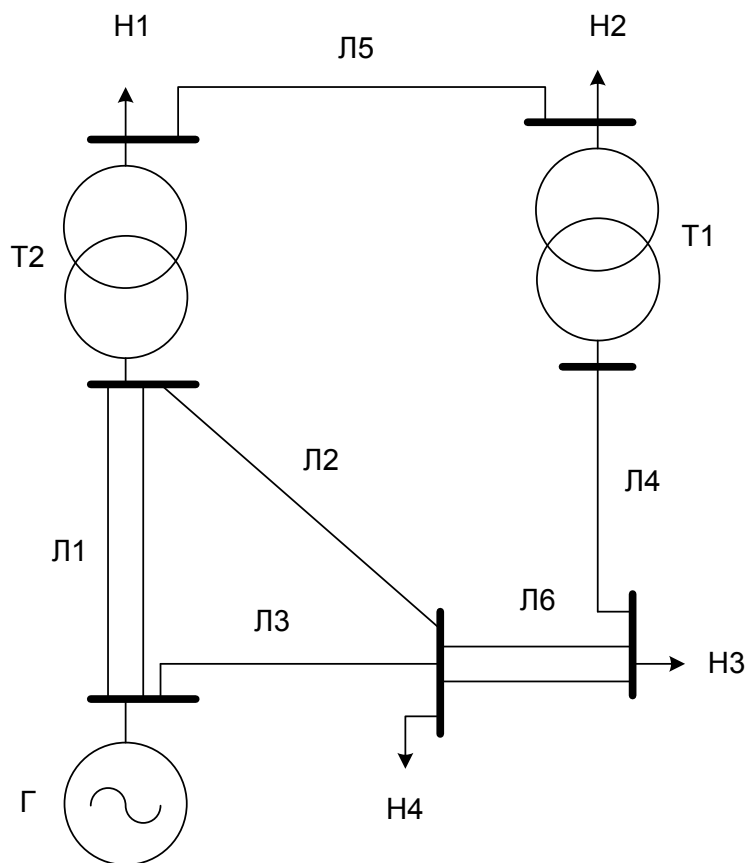


Рисунок 2.1 – Схема системы № 1

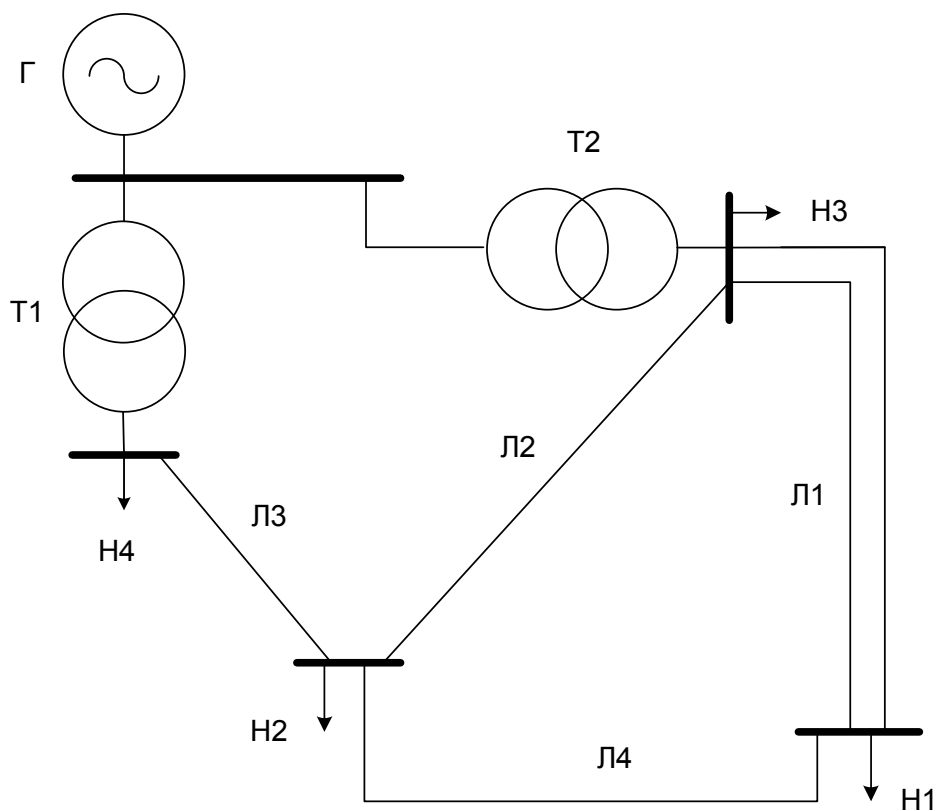


Рисунок 2.2 – Схема системы № 2

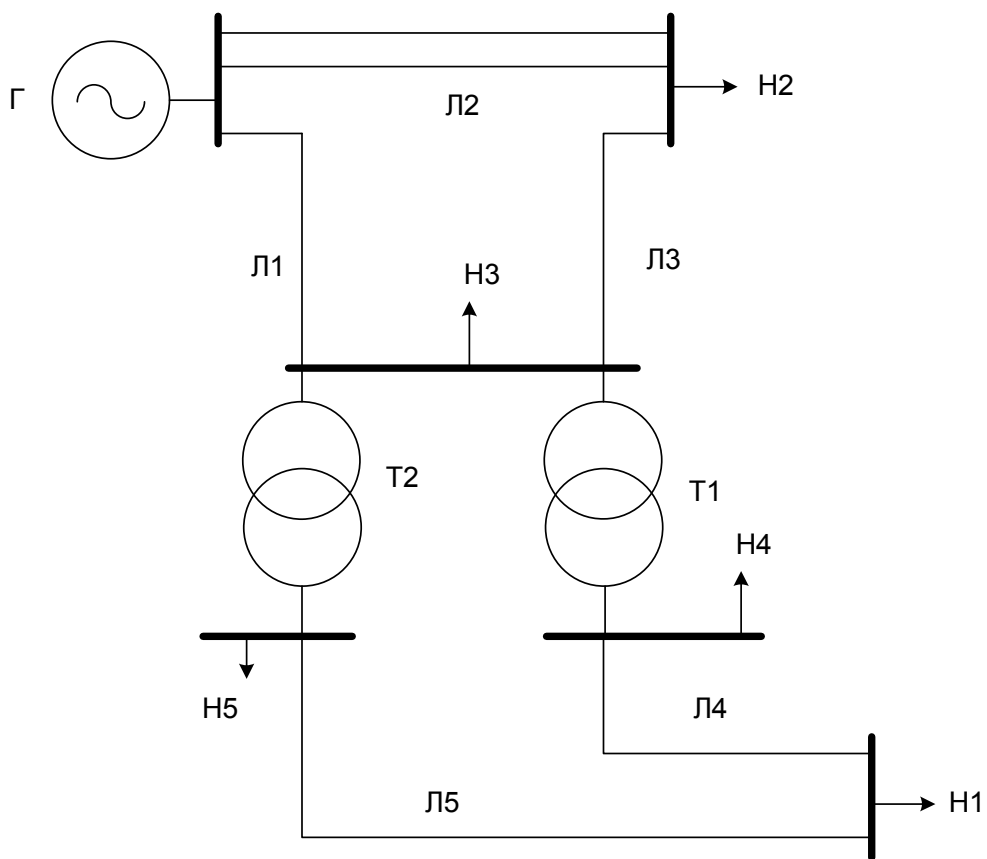


Рисунок 2.3 – Схема системы № 3

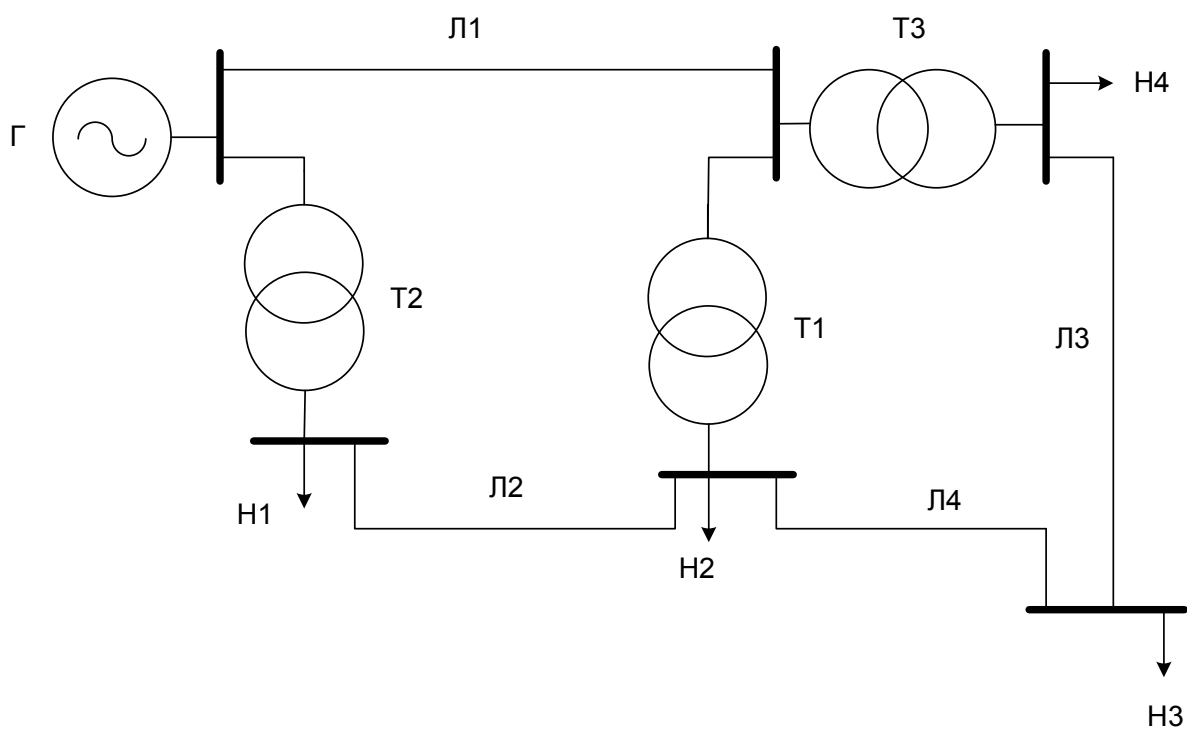


Рисунок 2.4 – Схема системы № 4

Таблица 2.1 – Исходные данные

№ вар	№ схемы	U _{ном.ВН} , кВ	U _{ном.НН} , кВ	U _{ип} , кВ	К заданию 2	К заданию 3
1	1	110	10	121	аварийно отключены Л1 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
2	2	35	6	38	аварийно отключены Л1 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
3	3	110	10	121	аварийно отключены Л1 и Л5	Метод простой итерации Метод Ньютона
4	4	35	6	37	аварийно отключены Л1 и Л3	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
5	1	220	10	230	аварийно отключены Л5 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
6	2	110	6	118	аварийно отключены Л3 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
7	3	220	10	231	аварийно отключены Л3 и Л4	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
8	4	110	10	116	аварийно отключены Л1 и Л4	Метод простой итерации Метод Ньютона
9	1	35	6	36	аварийно отключены Л6 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
10	2	220	10	235	аварийно отключены Л4 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
11	3	110	6	118	аварийно отключены Т2 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
12	4	35	10	35	аварийно отключены Л3 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
13	1	110	6	124	аварийно отключены Л1 и Л4	Метод простой итерации Метод Ньютона
14	2	220	10	235	аварийно отключены Т1 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона

Продолжение таблицы 2.1

№ вар	№ схемы	U _{ном.ВН,} кВ	U _{ном.НН,} кВ	U _{ип,} кВ	К заданию 2	К заданию 3
15	3	35	6	37	аварийно отключены Т2 и Л3	Метод простой итерации Метод Ньютона
16	4	110	10	121	аварийно отключены Л4 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
17	1	35	6	37	аварийно отключены Л3 и Л5	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
18	2	110	10	116	аварийно отключены Т2 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
19	3	35	6	36	аварийно отключены Л1 и Т1	Метод простой итерации Метод Ньютона
20	4	220	10	224	аварийно отключены Т1 и Т2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
21	1	220	6	220	аварийно отключены Л3 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
22	2	110	10	114	аварийно отключены Л3 и Л4	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
23	3	35	6	36	аварийно отключены Т2 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
24	4	220	10	230	аварийно отключены Т1 и Л3	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
25	1	110	10	121	аварийно отключены Л1 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
26	2	220	6	224	аварийно отключены Т3 и Л4	Метод простой итерации Метод Ньютона
27	3	35	6	35	аварийно отключены Л1 и Л4	Метод простой итерации Метод Ньютона
28	4	110	10	115	аварийно отключены Л3 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона

Продолжение таблицы 2.1

№ вар	№ схемы	U _{ном.ВН} , кВ	U _{ном.НН} , кВ	U _{ип} , кВ	К заданию 2	К заданию 3
29	1	110	6	121	аварийно отключены Л4 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
30	2	35	10	36	аварийно отключены Л1 и Т1	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
31	3	220	6	230	аварийно отключены Л3 и Л5	Метод простой итерации Метод Ньютона
32	4	35	10	38	аварийно отключены Л4 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
33	1	220	10	240	аварийно отключены Л5 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
34	2	110	10	115	аварийно отключены Т2 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
35	3	35	6	36	аварийно отключены Л5 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
36	4	220	10	235	аварийно отключены Л4 и Т2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
37	1	35	10	37	аварийно отключены Л5 и Л6	Метод простой итерации Метод Ньютона
38	2	110	10	115	аварийно отключены Л1 и Л2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона
39	3	220	6	230	аварийно отключены Л4 и Л2	Метод простой итерации Метод Ньютона
40	4	35	10	38	аварийно отключены Т3 и Т2	Метод Зейделя Метод Ньютона-Рафсона

Таблица 2.2 – Данные линий

№ вар	№ схемы	ЛЭП 1 (марка, длина, км)	ЛЭП 2 (марка, длина, км)	ЛЭП 3 (марка, длина, км)	ЛЭП 4 (марка, длина, км)	ЛЭП 5 (марка, длина, км)	ЛЭП 6 (марка, длина, км)
1	1	АС-95, 12	АС-70, 7	АС-120, 17	АС-70, 10	АС-95 , 10	АС-35, 7
2	2	АС-70, 17	АС-35, 20	АС-50, 10	АС-120, 16	-	-
3	3	АС-95, 10	АС-240, 20	АС-120, 7	АС-50, 10	АС-35 , 11	-
4	4	АС-150, 27	АС-35, 10	АС-50, 12	АС-70, 16	-	-
5	1	АС-300, 40	АС-240, 12	АС-240, 9	АС-240, 8	АС-400, 20	АС-50, 5
6	2	АС-150, 22	АС-70, 17	АС-185, 27	АС-95, 15	-	-
7	3	АС-400, 22	АС-240, 11	АС-300, 25	АС-50, 11	АС-50 , 16	-
8	4	АС-200, 22	АС-50, 7	АС-50, 14	АС-35, 12	-	-
9	1	АС-95, 15	АС-50, 18	АС-95, 20	АС-120, 6	АС-70, 7	АС-35, 9
10	2	АС-300, 12	АС-300, 21	АС-240, 15	АС-400, 28	-	-
11	3	АС-150, 7	АС-185, 21	АС-150, 17	АС-70, 17	АС-35 , 18	-
12	4	АС-120, 27	АС-70, 6	АС-50, 11	АС-35, 12	-	-
13	1	АС-120, 25	АС-120, 22	АС-95, 10	АС-150, 16	АС-70, 10	АС-35, 11
14	2	АС-400, 20	АС-400, 10	АС-240, 13	АС-300, 20	-	-
15	3	АС-150, 15	АС-95, 10	АС-95, 11	АС-35, 15	АС-50 , 11	-
16	4	АС-185, 22	АС-35, 11	АС-50, 9	АС-70, 6	-	-
17	1	АС-150, 17	АС-35, 10	АС-70, 10	АС-150, 9	АС-35, 17	АС-50,13
18	2	АС-185, 21	АС-150, 14	АС-240, 20	АС-70, 10	-	-
19	3	АС-120, 17	АС-50, 7	АС-120, 16	АС-35, 10	АС-35 , 15	-
20	4	АС-300, 30	АС-50, 10	АС-35, 11	АС-25, 18	-	-
21	1	АС-400, 22	АС-300, 11	АС-240, 9	АС-300, 18	АС-240, 28	АС-35, 8
22	2	АС-120, 17	АС-95, 10	АС-95, 20	АС-150, 16	-	-
23	3	АС-50, 5	АС-120, 10	АС-95, 18	АС-50, 10	АС-50 , 13	-
24	4	АС-120, 12	АС-25, 11	АС-35, 14	АС-50, 6	-	-
25	1	АС-150, 27	АС-95, 17	АС-70, 27	АС-120, 11	АС-185, 14	АС-35, 8
26	2	АС-240, 13	АС-400, 23	АС-300, 27	АС-400, 11	-	-
27	3	АС-150, 15	АС-50, 8	АС-120, 28	АС-70, 7	АС-35 , 15	-
28	4	АС-300, 26	АС-35, 8	АС-50, 15	АС-25, 6	-	-
29	1	АС-70, 14	АС-150, 17	АС-240, 24	АС-70, 16	АС-150, 20	АС-50, 10
30	2	АС-120, 7	АС-50, 7	АС-35, 16	АС-150, 11	-	-
31	3	АС-300, 25	АС-240, 10	АС-400, 28	АС-35, 10	АС-50 , 4	-
32	4	АС-150, 17	АС-25, 10	АС-70, 6	АС-50, 11	-	-
33	1	АС-400, 23	АС-400, 10	АС-300, 17	АС-240, 9	АС-240, 19	АС-35, 11
34	2	АС-120, 17	АС-150, 16	АС-240, 20	АС-150, 12		
35	3	АС-50, 5	АС-120, 20	АС-70, 18	АС-35, 10	АС-35, 14	-
36	4	АС-240, 21	АС-50, 11	АС-70, 8	АС-25, 6	-	-
37	1	АС-120, 13	АС-50, 11	АС-95, 15	АС-120, 7	АС-50, 14	АС-50,10
38	2	АС-70, 7	АС-95, 8	АС-70, 11	АС-150, 16	-	-
39	3	АС-400, 15	АС-300, 14	АС-240, 18	АС-50, 10	АС-35 , 7	-
40	4	АС-95, 12	АС-35, 11	АС-70, 5	АС-50, 6	-	-

Таблица 2.3 – Данные трансформаторов

№ вар	№ схемы	Т-1	Т-1	Т-1
1	1	ТДН-10000	ТДН-16000	-
2	2	ТДН-10000	ТДН-16000	-
3	3	ТДН-16000	ТДН-10000	-
4	4	ТДН-10000	ТДН-16000	ТДН-10000
5	1	ТРДН-40000	ТРДН-32000	-
6	2	ТДН-10000	ТРДН-25000	-
7	3	ТРДН-40000	ТРДН-63000	-
8	4	ТДН-16000	ТРДН-40000	ТДН-16000
9	1	ТДН-10000	ТМН-6300	-
10	2	ТРДН-32000	ТРДН-40000	-
11	3	ТРДН-25000	ТРДН-40000	-
12	4	ТДН-10000	ТМН-4000	ТДН-16000
13	1	ТДН-16000	ТМН-6300	-
14	2	ТРДН-40000	ТРДН-63000	-
15	3	ТДН-16000	ТДН-10000	-
16	4	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТРДН-40000
17	1	ТРДН-25000	ТДН-16000	-
18	2	ТРДН-25000	ТРДН-40000	-
19	3	ТМН-6300	ТМН-4000	-
20	4	ТРДН-40000	ТРДН-63000	ТРДН-40000
21	1	ТРДН-63000	ТРДН-40000	-
22	2	ТДН-16000	ТДН-10000	-
23	3	ТТН-16000	ТМН-4000	-
24	4	ТРДН-63000	ТРДН-40000	ТРДН-32000
25	1	ТДН-16000	ТМН-6300	-
26	2	ТРДН-32000	ТРДН-63000	-
27	3	ТМН-4000	ТДН-10000	-
28	4	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТДН-10000
29	1	ТДН-10000	ТРДН-25000	-
30	2	ТРДН-25000	ТДН-10000	-
31	3	ТРДН-63000	ТРДН-32000	-
32	4	ТРДН-25000	ТМН-4000	ТДН-10000
33	1	ТРДН-40000	ТРДН-40000	-
34	2	ТДН-16000	ТРДН-40000	-
35	3	ТДН-10000	ТДН-16000	-
36	4	ТРДН-63000	ТРДН-32000	ТРДН-40000
37	1	ТМН-4000	ТДН-10000	-
38	2	ТДН-10000	ТРДН-40000	-
39	3	ТРДН-40000	ТРДН-32000	-
40	4	ТМН-6300	ТМН-4000	ТДН-16000

Таблица 2.4 – Справочные данные по ЛЭП

Напряжение сети	Марка провода	R_0 , Ом/км	X_0 , Ом/км
6-10 кВ	АС-25	1,176	0,44
6-10 кВ	АС-35	0,79	0,429
6-10 кВ	АС-50	0,603	0,418
35 кВ	АС-50	0,603	0,435
35 кВ	АС-70	0,428	0,432
35 кВ	АС-95	0,306	0,421
35 кВ	АС-120	0,249	0,414
35 кВ	АС-150	0,198	0,406
110 кВ	АС-70	0,428	0,444
110 кВ	АС-95	0,306	0,434
110 кВ	АС-120	0,249	0,427
110 кВ	АС-150	0,198	0,42
110 кВ	АС-185	0,162	0,413
110 кВ	АС-240	0,12	0,405
220 кВ	АС-240	0,121	0,435
220 кВ	АС-300	0,098	0,429
220 кВ	АС-400	0,075	0,42

Таблица 2.5 – Справочные данные по трансформаторам

Напряжение сети	Тип трансформатора	R_T , Ом	X_T , Ом
35 кВ	ТМН-4000	2,6	23
35 кВ	ТМН-6300	1,4	14,6
35 кВ	ТДН-10000	0,81	10,8
35 кВ	ТДН-16000	0,45	8,4
35 кВ	ТРДН-25000	0,25	5,1
110 кВ	ТМН-6300	14,7	220,4
110 кВ	ТДН-10000	7,95	139
110 кВ	ТДН-16000	4,38	86,7
110 кВ	ТРДН-25000	2,54	55,9
110 кВ	ТРДН-40000	1,4	34,7
220 кВ	ТРДН-32000	6,3	175
220 кВ	ТРДН-40000	5,6	158,7
220 кВ	ТРДН-63000	3,9	100,7

Таблица 2.6 – Нагрузки

№ вар	№ схемы	Н-1 (МБА)	Н-2 (МБА)	Н-3 (МБА)	Н-4 (МБА)	Н-5 (МБА)
1	1	10+j5	12+j6	17+j8	8+j4	-
2	2	21+j7	17+j5	27+j10	9+j4	-
3	3	14+j5	22+j7	6+j2	11+j5	15+j4
4	4	18+j6	5+j2	19+j6	21+j8	-
5	1	27+j8	37+j11	29+j12	30+j15	-
6	2	21+j5	26+j7	17+j6	19+j5	-
7	3	26+j15	43+j25	28+j16	33+j17	26+j5
8	4	18+j5	27+j9	21+j3	26+j5	-
9	1	11+j5	21+j7	16+j7	19+j5	-
10	2	25+j8	36+j11	31+j16	40+j14	-
11	3	41+j20	27+j15	36+j19	41+j15	25+j5
12	4	19+j6	17+j5	12+j4	18+j5	-
13	1	12+j5	6+j2	16+j7	9+j3	-
14	2	34+j15	26+j11	36+j9	42+j25	-
15	3	25+j5	23+j7	16+j5	16+j8	15+j5
16	4	20+j5	17+j6	19+j7	8+j3	-
17	1	10+j5	22+j11	18+j7	18+j5	-
18	2	23+j8	26+j9	27+j6	10+j2	-
19	3	16+j6	12+j5	6+j3	21+j7	11+j5
20	4	28+j9	35+j15	39+j16	27+j10	-
21	1	30+j10	32+j11	37+j14	28+j7	-
22	2	21+j5	17+j7	27+j11	9+j4	-
23	3	14+j4	22+j8	6+j3	11+j5	15+j4
24	4	38+j15	25+j10	29+j11	29+j12	-
25	1	21+j8	26+j9	17+j5	19+j4	-
26	2	26+j5	36+j15	37+j12	39+j25	-
27	3	16+j5	13+j5	18+j7	13+j4	16+j8
28	4	18+j7	27+j9	21+j5	26+j6	-
29	1	11+j5	21+j8	16+j5	19+j6	-
30	2	15+j6	16+j3	11+j5	10+j2	-
31	3	41+j15	27+j12	36+j11	41+j25	25+j15
32	4	19+j5	17+j7	12+j5	18+j4	-
33	1	42+j15	36+j12	26+j5	29+j8	-
34	2	12+j5	6+j2	16+j6	9+j5	-
35	3	15+j7	13+j5	16+j6	16+j3	15+j5
36	4	40+j15	37+j11	29+j12	38+j14	-
37	1	10+j5	12+j4	18+j6	18+j5	-
38	2	23+j7	26+j8	27+j9	10+j5	-
39	3	28+j5	35+j15	39+j12	27+j10	26+j9
40	4	18+j7	15+j5	39+j13	27+j5	-

3 ЗАДАНИЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

Общее задание

1 Составить схему замещения электрической системы. Выбрать положительные направления токов ветвей.

2 Определить параметры схемы замещения. Параметры линий и трансформаторов взять с табл.3.2-3.5. По заданной нагрузке потребителей получить расчетные мощности узлов потребления. Нагрузку узлов представить в виде задающих токов.

3 Построить направленный граф сети. Выделить в нем дерево и хорды. Проверить правильность выделения дерева и хорд. Пронумеровать узлы и ветви в установленном порядке (базисный узел имеет последний номер).

4 Составить первую и вторую матрицы соединений.

Для задания 1

1 Составить вектор задающих токов в узлах.

2 Составить матрицу сопротивлений ветвей.

3 Выполнить расчет установившегося режима сети с использованием узловых уравнений (метод узловых напряжений) и одним из методов, указанных в варианте задания (для четных вариантов использовать метод на основе контурных уравнений, а для нечетных метод с использованием обобщенного уравнения состояния). Получить точное решение, используя элементы теории графов и матричной алгебры.

4 Полученные в результате расчета токи ветвей и напряжения узлов нанести на граф сети. Уточнить направления ветвей по результатам расчета.

5 Проанализировать полученное решение.

Для задания 2

1 Изменить схему в соответствии с заданием.

2 Составить матрицу коэффициентов распределения дерева для разомкнутой сети.

3 Выполнить расчет послеаварийного режима методом на основе матрицы коэффициентов распределения дерева.

4 Полученные в результате расчета токи ветвей и напряжения узлов нанести на граф сети. Уточнить направления ветвей по результатам расчета.

5 Проанализировать полученное решение.

Для задания 3

1 Нагрузки представить в виде мощностей.

2 Составить матрицу узловых проводимостей для заданной схемы сети.

3 Составить систему нелинейных узловых уравнений в матричной форме.

4 Решить задачу используя метод Зейделя, Ньютона или Ньютона-Рафсона в зависимости от задания. В качестве начальных приближений принять номинальное напряжения сети.

5 На основании полученных токов в ветвях и напряжений в узлах получить мощности начала и конца ветви и соответственно потери мощности в сети.

6 Проанализировать уровни напряжения на участках сети и уточнить фактические напряжения в узлах нагрузки с учетом коэффициента трансформации.

7 Нанести на граф сети мощности начала и конца ветви, а также напряжения узлов.

8 Проанализировать полученное решение.

Исходная схема сети приведена на рис. 3.1. В таблице 3.1 указаны исходные данные для схемы сети (номера узлов и ветвей) в таблицах 3.2-3.5 – информация об оборудовании, а таблице 3.6 – информация об нагрузках.

Для нечетных вариантов заданий использовать метод Зейделя для расчета нелинейной системы алгебраических уравнений, для группы четных вариантов метод Ньютона или метод Ньютона-Рафсона по заданию преподавателя.

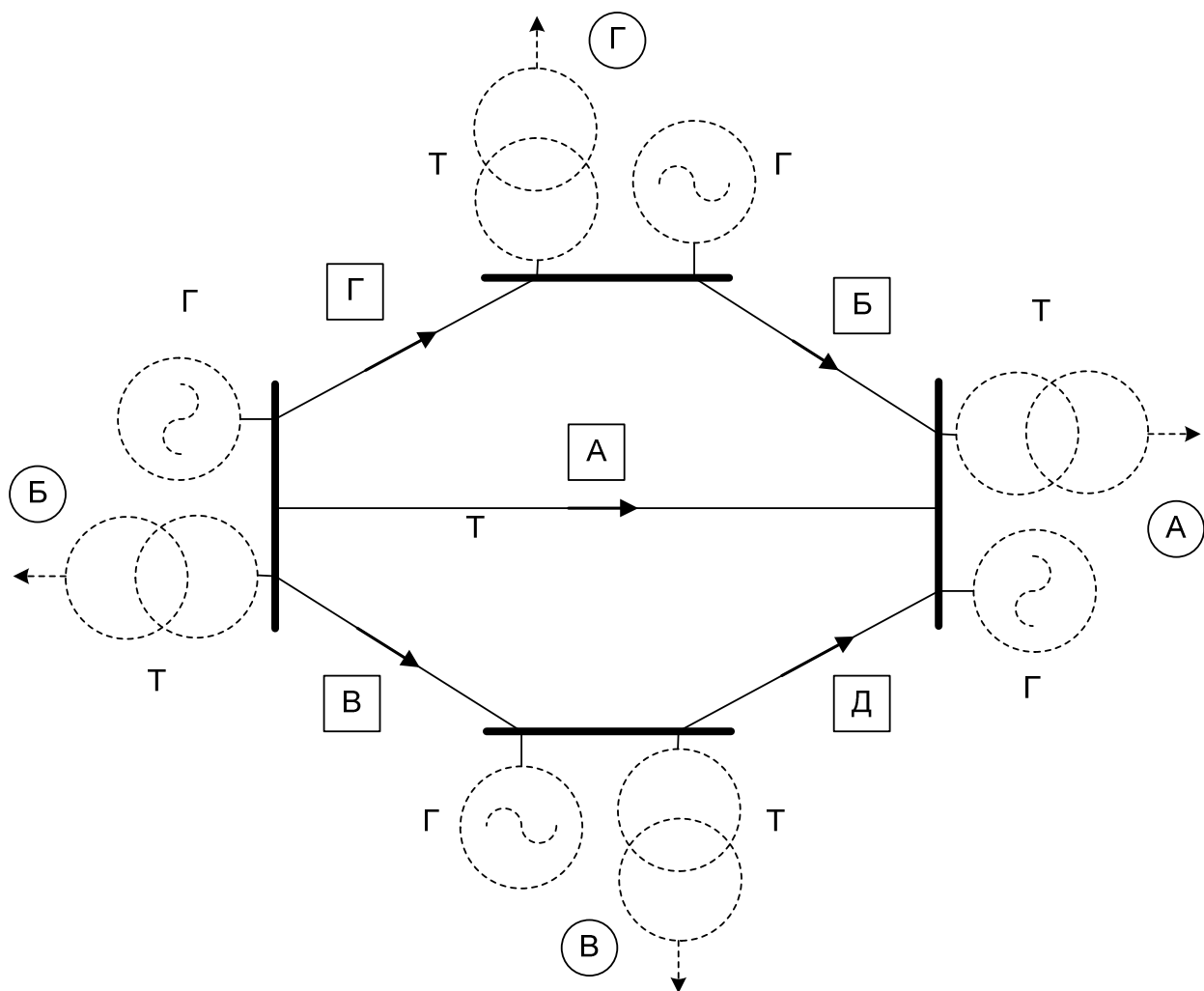


Рисунок 3.1 – Схема системы

Таблица 3.1 – Номера ветвей и узлов

№ вар.	№ ветви					№ узла			
	а	б	в	г	д	а	б	в	г
1	3	5	1	4	2	3	4	1	2
2	2	3	5	4	1	3	4	1	2
3	1	2	3	4	5	2	3	4	1
4	5	1	2	4	3	2	3	4	1
5	3	5	1	4	2	2	3	4	1
6	2	3	5	4	1	2	3	4	1
7	5	1	2	4	3	2	1	3	4
8	1	4	3	2	5	2	1	3	4
9	5	1	2	4	3	2	1	3	4
10	2	3	5	4	1	2	1	3	4
11	3	5	1	4	2	4	1	3	2
12	2	3	5	4	1	3	4	1	2
13	5	1	2	4	3	2	1	3	4
14	2	3	5	4	1	1	2	3	4
15	1	2	3	4	5	4	1	2	3

Продолжение таблицы 3.1

№ вар.	№ ветви					№ узла			
	а	б	в	г	д	а	б	в	г
16	2	1	3	5	4	4	3	1	2
17	2	5	1	3	4	2	3	1	4
18	1	2	4	5	3	4	2	3	1
19	5	4	1	2	3	3	4	2	1
20	1	2	4	3	5	4	1	2	3
21	1	2	3	4	5	1	2	3	4
22	5	1	2	4	3	1	2	3	4
23	3	5	1	4	2	1	2	3	4
24	2	3	5	4	1	1	2	3	4
25	1	2	3	4	5	4	1	2	3
26	5	1	2	4	3	4	1	2	3
27	3	5	1	4	2	4	1	2	3
28	2	3	5	4	1	4	1	2	3
29	1	2	3	4	5	3	4	1	2
30	5	1	2	4	3	3	4	1	2
31	3	5	1	4	2	3	4	1	2
32	2	3	5	4	1	3	4	1	2
33	1	2	3	4	5	2	3	4	1
34	5	1	2	4	3	2	3	4	1
35	3	5	1	4	2	2	3	4	1
36	2	3	5	4	1	2	3	4	1
37	5	1	2	4	3	2	1	3	4
38	1	4	3	2	5	2	1	3	4
39	5	1	2	4	3	2	1	3	4
40	2	3	5	4	1	2	1	3	4
41	3	5	1	4	2	4	1	3	2
42	2	3	5	4	1	3	4	1	2
43	5	1	2	4	3	2	1	3	4
44	2	3	5	4	1	1	2	3	4
45	1	2	3	4	5	4	1	2	3
46	2	1	3	5	4	4	3	1	2
47	2	5	1	3	4	2	3	1	4
48	1	2	4	5	3	4	2	3	1
49	5	4	1	2	3	3	4	2	1
50	1	2	4	3	5	4	1	2	3

Таблица 3.2 – Информация о линиях электропередачи

№ вар	U _{ном} , кВ	ЛЭП 1 (марка, длина, км)	ЛЭП 2 (марка, длина, км)	ЛЭП 3 (марка, длина, км)	ЛЭП 4 (марка, длина, км)	ЛЭП 5 (марка, длина, км)
1	35	АС-95, 12	АС-70, 7	АС-120, 17	АС-150, 10	АС-50 , 10
2	110	АС-70, 17	АС-150, 20	АС-185, 10	АС-120, 16	АС-240, 16
3	220	АС-300, 18	АС-240, 20	АС-240, 17	АС-400, 20	АС-300 , 21
4	35	АС-150, 27	АС-35, 10	АС-50, 12	АС-70, 16	АС-25, 6
5	110	АС-150, 22	АС-70, 17	АС-185, 27	АС-95, 15	АС-120, 20
6	220	АС-300, 40	АС-240, 12	АС-240, 19	АС-240, 18	АС-400, 20

Продолжение таблицы 3.2

№ вар	U _{ном} , кВ	ЛЭП 1 (марка, длина, км)	ЛЭП 2 (марка, длина, км)	ЛЭП 3 (марка, длина, км)	ЛЭП 4 (марка, длина, км)	ЛЭП 5 (марка, длина, км)
7	35	АС-50, 22	АС-120, 11	АС-35, 5	АС-50, 11	АС-70 , 16
8	35	АС-70, 12	АС-50, 7	АС-50, 14	АС-35, 12	АС-95 , 16
9	110	АС-95, 15	АС-150, 18	АС-95, 20	АС-120, 6	АС-70, 7
10	220	АС-300, 12	АС-300, 21	АС-240, 15	АС-400, 28	АС-240, 25
11	110	АС-150, 7	АС-185, 21	АС-120, 17	АС-70, 17	АС-95 , 18
12	35	АС-120, 27	АС-70, 6	АС-50, 11	АС-35, 12	АС-25, 5
13	110	АС-120, 25	АС-240, 22	АС-95, 10	АС-150, 16	АС-70, 10
14	220	АС-400, 20	АС-400, 10	АС-240, 13	АС-300, 20	АС-240, 19
15	35	АС-150, 15	АС-95, 10	АС-95, 11	АС-35, 15	АС-50 , 11
16	110	АС-185, 22	АС-150, 11	АС-95, 9	АС-70, 6	АС-240, 15
17	35	АС-150, 17	АС-35, 10	АС-70, 10	АС-150, 9	АС-35, 17
18	110	АС-185, 21	АС-150, 14	АС-240, 20	АС-70, 10	АС-120, 18
19	35	АС-120, 17	АС-50, 7	АС-150, 16	АС-35, 10	АС-25 , 5
20	35	АС-35, 10	АС-50, 10	АС-70, 11	АС-25, 18	АС-120, 15
21	220	АС-400, 22	АС-300, 11	АС-240, 9	АС-300, 18	АС-240, 28
22	110	АС-120, 17	АС-95, 10	АС-70, 20	АС-150, 16	АС-185, 15
23	35	АС-50, 5	АС-120, 10	АС-95, 18	АС-50, 10	АС-35 , 13
24	35	АС-120, 12	АС-25, 11	АС-35, 14	АС-50, 6	АС-70, 15
25	110	АС-150, 27	АС-95, 17	АС-70, 27	АС-120, 11	АС-185, 14
26	220	АС-240, 13	АС-400, 23	АС-300, 27	АС-400, 11	АС-400, 25
27	35	АС-150, 15	АС-50, 8	АС-120, 28	АС-70, 7	АС-35 , 15
28	220	АС-300, 26	АС-300, 28	АС-400, 35	АС-240, 26	АС-240, 35
29	110	АС-70, 14	АС-150, 17	АС-240, 24	АС-70, 16	АС-150, 20
30	35	АС-120, 7	АС-50, 7	АС-35, 16	АС-150, 11	АС-70, 15
31	35	АС-95, 12	АС-70, 7	АС-120, 17	АС-150, 10	АС-50 , 10
32	110	АС-70, 17	АС-150, 20	АС-185, 10	АС-120, 16	АС-240, 16
33	220	АС-300, 18	АС-240, 20	АС-240, 17	АС-400, 20	АС-300 , 21
34	35	АС-150, 27	АС-35, 10	АС-50, 12	АС-70, 16	АС-25, 6
35	110	АС-150, 22	АС-70, 17	АС-185, 27	АС-95, 15	АС-120, 20
36	220	АС-300, 40	АС-240, 12	АС-240, 19	АС-240, 18	АС-400, 20
37	35	АС-50, 22	АС-120, 11	АС-35, 5	АС-50, 11	АС-70 , 16
38	35	АС-70, 12	АС-50, 7	АС-50, 14	АС-35, 12	АС-95 , 16
39	110	АС-95, 15	АС-150, 18	АС-95, 20	АС-120, 6	АС-70, 7
40	220	АС-300, 12	АС-300, 21	АС-240, 15	АС-400, 28	АС-240, 25
41	110	АС-150, 7	АС-185, 21	АС-120, 17	АС-70, 17	АС-95 , 18
42	35	АС-120, 27	АС-70, 6	АС-50, 11	АС-35, 12	АС-25, 5
43	110	АС-120, 25	АС-240, 22	АС-95, 10	АС-150, 16	АС-70, 10
44	220	АС-400, 20	АС-400, 10	АС-240, 13	АС-300, 20	АС-240, 19
45	35	АС-150, 15	АС-95, 10	АС-95, 11	АС-35, 15	АС-50 , 11
46	110	АС-185, 22	АС-150, 11	АС-95, 9	АС-70, 6	АС-240, 15
47	35	АС-150, 17	АС-35, 10	АС-70, 10	АС-150, 9	АС-35, 17
48	110	АС-185, 21	АС-150, 14	АС-240, 20	АС-70, 10	АС-120, 18
49	35	АС-120, 17	АС-50, 7	АС-150, 16	АС-35, 10	АС-25 , 5
50	35	АС-35, 10	АС-50, 10	АС-70, 11	АС-25, 18	АС-120, 15

Таблица 3.3 – Информация о трансформаторах ПС

№ вар	U _{ном} , кВ	U _б , кВ	Т-1	Т-2	Т-3
1	35	35	ТДН-10000	ТДН-16000	ТМН-6300
2	110	121	ТДН-10000	ТДН-16000	ТРДН-25000
3	220	230	ТРДН-40000	ТРДН-32000	ТРДН-63000
4	35	36	ТДН-10000	ТМН-6300	ТМН-4000
5	110	120	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТМН-6300
6	220	235	ТРДН-40000	ТРДН-32000	ТРДН-63000
7	35	37	ТМН-4000	ТМН-6300	ТРДН-25000
8	35	37,5	ТДН-16000	ТМН-4000	ТДН-10000
9	110	119	ТДН-10000	ТМН-6300	ТДН-16000
10	220	227	ТРДН-32000	ТРДН-40000	ТРДН-40000
11	110	117	ТРДН-25000	ТРДН-25000	ТДН-16000
12	35	38	ТДН-10000	ТМН-4000	ТДН-16000
13	110	115	ТДН-16000	ТМН-6300	ТРДН-25000
14	220	220	ТРДН-40000	ТРДН-63000	ТРДН-40000
15	35	36,5	ТДН-16000	ТДН-10000	ТМН-6300
16	110	112	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТРДН-40000
17	35	34	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТМН-4000
18	110	110	ТРДН-25000	ТРДН-40000	ТДН-16000
19	35	35	ТМН-6300	ТМН-4000	ТДН-10000
20	35	37	ТМН-4000	ТМН-6300	ТМН-4000
21	220	230	ТРДН-63000	ТРДН-40000	ТРДН-32000
22	110	115	ТДН-16000	ТДН-10000	ТРДН-25000
23	35	38	ТДН-16000	ТМН-4000	ТМН-6300
24	35	36	ТМН-6300	ТМН-4000	ТРДН-25000
25	110	122	ТДН-16000	ТМН-6300	ТДН-10000
26	220	232	ТРДН-63000	ТРДН-40000	ТРДН-32000
27	35	36	ТМН-4000	ТДН-10000	ТМН-6300
28	220	227	ТРДН-32000	ТРДН-63000	ТРДН-40000
29	110	124	ТДН-10000	ТРДН-25000	ТРДН-40000
30	35	37	ТРДН-25000	ТДН-10000	ТМН-6300
31	35	35	ТДН-10000	ТДН-16000	ТМН-6300
32	110	121	ТДН-10000	ТДН-16000	ТРДН-25000
33	220	230	ТРДН-40000	ТРДН-32000	ТРДН-63000
34	35	36	ТДН-10000	ТМН-6300	ТМН-4000
35	110	120	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТМН-6300
36	220	235	ТРДН-40000	ТРДН-32000	ТРДН-63000
37	35	37	ТМН-4000	ТМН-6300	ТРДН-25000
38	35	37,5	ТДН-16000	ТМН-4000	ТДН-10000
39	110	119	ТДН-10000	ТМН-6300	ТДН-16000
40	220	227	ТРДН-32000	ТРДН-40000	ТРДН-40000
41	110	117	ТРДН-25000	ТРДН-25000	ТДН-16000
42	35	38	ТДН-10000	ТМН-4000	ТДН-16000
43	110	115	ТДН-16000	ТМН-6300	ТРДН-25000
44	220	220	ТРДН-40000	ТРДН-63000	ТРДН-40000
45	35	36,5	ТДН-16000	ТДН-10000	ТМН-6300
46	110	112	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТРДН-40000

Продолжение таблицы 3.3

№ вар	U _{ном} , кВ	U _б , кВ	Т-1	Т-2	Т-3
47	35	34	ТРДН-25000	ТДН-16000	ТМН-4000
48	110	110	ТРДН-25000	ТРДН-40000	ТДН-16000
49	35	35	ТМН-6300	ТМН-4000	ТДН-10000
50	35	37	ТМН-4000	ТМН-6300	ТМН-4000

Таблица 3.4 – Справочник по ЛЭП

Напряжение сети	Марка прово- да	R ₀ , Ом/км	X ₀ , Ом/км
35 кВ	АС-25	1,176	0,44
35 кВ	АС-35	0,79	0,429
35 кВ	АС-50	0,603	0,435
35 кВ	АС-70	0,428	0,432
35 кВ	АС-95	0,306	0,421
35 кВ	АС-120	0,249	0,414
35 кВ	АС-150	0,198	0,406
110 кВ	АС-70	0,428	0,444
110 кВ	АС-95	0,306	0,434
110 кВ	АС-120	0,249	0,427
110 кВ	АС-150	0,198	0,42
110 кВ	АС-185	0,162	0,413
110 кВ	АС-240	0,12	0,405
220 кВ	АС-240	0,121	0,435
220 кВ	АС-300	0,098	0,429
220 кВ	АС-400	0,075	0,42

Таблица 3.5 – Справочник по трансформаторам

Напряжение сети	Тип трансформатор	R _т , Ом	X _т , Ом
35 кВ	ТМН-4000	2,6	23
35 кВ	ТМН-6300	1,4	14,6
35 кВ	ТДН-10000	0,81	10,8
35 кВ	ТДН-16000	0,45	8,4
35 кВ	ТРДН-25000	0,25	5,1
110 кВ	ТМН-6300	14,7	220,4
110 кВ	ТДН-10000	7,95	139
110 кВ	ТДН-16000	4,38	86,7
110 кВ	ТРДН-25000	2,54	55,9
110 кВ	ТРДН-40000	1,4	34,7
220 кВ	ТРДН-32000	6,3	175
220 кВ	ТРДН-40000	5,6	158,7
220 кВ	ТРДН-63000	3,9	100,7

Таблица 3.6 – Информация об узлах нагрузки

№ вар	H-1 (P_1+jQ_1 , MBA)	H-2 (P_2+jQ_2 , MBA)	H-3 (P_3+jQ_3 , MBA)
1	8+j7	17+j5	12+j4
2	12+j8	18+j4	29+j6
3	34+j12	32+j12	50+j18
4	12+j8	8+j6	3+j2
5	20+j12	16+j8	14+j7
6	36+j14	24+j10	50+j28
7	6+j2	7+j5	21+j7
8	18+j6	5+j4	9+j6
9	12+j8	7+j6	18+j5
10	38+j17	40+j25	42+j24
11	24+ j12	25+ j13	17+ j11
12	9+ j3	5+ j4	18+ j13
13	15+ j13	6+ j5	24+ j22
14	44+ j23	57+ j23	37+ j24
15	15+ j3	14+3	8+ j2
16	27+j14	17+j4	26+j24
17	24+j13	15+j7	3+j2
18	27+j14	40+j20	14+j6
19	6+j4	4+j2	9+j5
20	4+j3	8+j4	3+j2
21	50+j26	38+j24	36+j5
22	18+j7	8+j5	20+j7
23	17+j6	6+j4	7+j6
24	8+j3	5+j2	22+j5
25	18+j7	7+j5	12+j4
26	52+j28	38+j14	29+j16
27	4+j2	10+j8	7+j3
28	34+j12	50+j22	37+j13
29	14+j2	20+j18	37+j13
30	24+j12	10+j8	7+j3
31	8+j7	17+j5	12+j4
32	12+j8	18+j4	29+j6
33	34+j12	32+j12	50+j18
34	12+j8	8+j6	3+j2
35	20+j12	16+j8	14+j7
36	36+j14	24+j10	50+j28
37	6+j2	7+j5	21+j7
38	18+j6	5+j4	9+j6
39	12+j8	7+j6	18+j5
40	38+j17	40+j25	42+j24
41	24+ j12	25+ j13	17+ j11
42	9+ j3	5+ j4	18+ j13
43	15+ j13	6+ j5	24+ j22
44	44+ j23	57+ j23	37+ j24
45	15+ j3	14+3	8+ j2
46	27+j14	17+j4	26+j24

Продолжение таблицы 3.6

№ вар	Н-1 (P_1+jQ_1 , MBA)	Н-2 (P_2+jQ_2 , MBA)	Н-3 (P_3+jQ_3 , MBA)
47	24+j13	15+j7	3+j2
48	27+j14	40+j20	14+j6
49	6+j4	4+j2	9+j5
50	4+j3	8+j4	3+j2

4 УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1 Составление схемы замещения сети и расчет ее параметров

Используя типовые схемы замещения отдельных фрагментов сети (воздушные и кабельные линии, трансформаторы) и ее структурную схему, надо составить схему замещения сети. Она может быть полной или упрощенной, например, в схеме замещения отсутствуют поперечные ветви – проводимости.

Схема замещения линий электропередач будет определяться соответствующим классом напряжения [4] (по заданию 35-220 кВ). Возможны следующие варианты схем замещения линий электропередач: для сетей 6, 10 и 35 кВ принимается схема замещения с учётом только продольных параметров схемы замещения, а именно активного и индуктивного сопротивления; для сетей 110-220 кВ принимается схема, в которой учитываются еще емкостные проводимости (зарядные мощности линий); для сетей 330 кВ и выше актуальна полная схема замещения линии электропередачи приведенная на рис. 4.1.

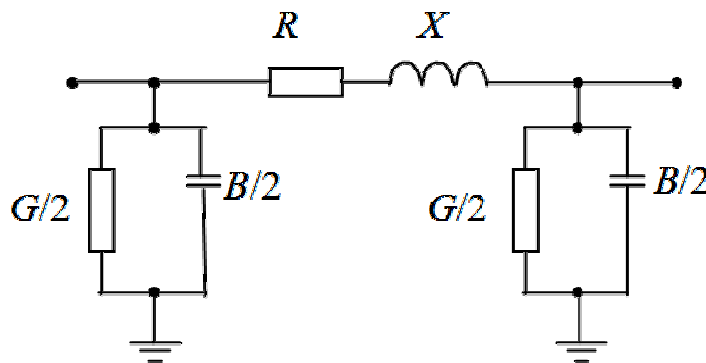


Рисунок 4.1 – Полная схема замещения линии электропередачи

Сопротивления линий электропередачи определяются по формулам:

$$R_{\text{л}} = \frac{r_0 \cdot L}{n}, \quad X_{\text{л}} = \frac{x_0 \cdot L}{n}$$

где r_0 , x_0 – погонные (удельные) активное и реактивное сопротивления линии электропередачи, Ом/км;

L – длина линии, км;

n – количество параллельно работающих цепей линии.

Емкостные проводимости линии электропередачи определяются по следующим формулам:

$$Y_L = -jb_0 \cdot L \cdot n,$$

где b_0 – погонная (удельная) емкостная проводимость линии электропередачи, См/км;

L – длина линии, км;

n – количество параллельно работающих цепей линии.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора будет выглядеть, так как приведено на рис. 4.2. Таким образом, схема замещения трансформаторов в нашей задаче будет представлена активным с индуктивным сопротивлением, а также полной проводимостью учитывающей потери холостого хода [4] (потери в стали трансформатора).

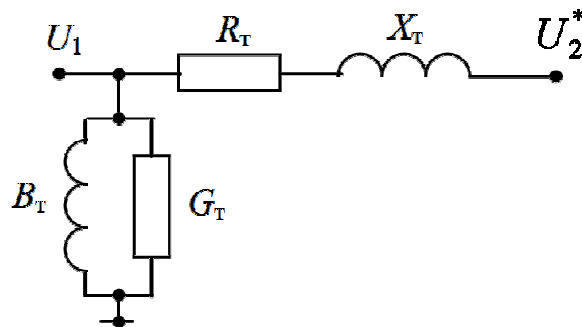


Рисунок 4.2 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора

Сопротивления трансформатора принимаются в соответствии со справочником (см. табл. 2.5 и 3.5). Проводимости трансформатора определяются по формулам:

$$Y_{Tp} = \left(\frac{-\Delta P_{xx}}{U_{ном}^2} + j \frac{I_{xx} \cdot S_{ном}}{100 \cdot U_{ном}^2} \right),$$

где ΔP_{xx} , I_{xx} – справочные данные трансформатора активные потери xx и ток xx из опыта холостого хода [4], МВт и %;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

Параметры схемы замещения следует привести к одному напряжению. В качестве базисного напряжения можно выбрать любое напряжение. Приведение сопротивлений выполняется по формулам

$$R^* = R \cdot k_T^2, \quad X^* = X \cdot k_T^2,$$

где R, X – активное и реактивное сопротивления элемента сети, Ом, приведенные к собственной ступени напряжения (U_{HH});

R^*, X^* – активное и реактивное сопротивления того же элемента, приведенные к базисному напряжению (U_{BH}), Ом;

k_T – коэффициент приведения (коэффициент трансформации).

Коэффициент трансформации определяется по формуле:

$$k_T = \frac{U_{BH}}{U_{HH}},$$

где U_{BH} – высшее номинальное напряжение трансформатора, кВ;

U_{HH} – низшее номинальное напряжение трансформатора, кВ.

Узловые токи нагрузки определяются, используя заданные значения мощностей узлов потребления [1-2]:

$$J_{нагр} = -\frac{P_{нагр}}{U_{ном}} + j \frac{Q_{нагр}}{U_{ном}}.$$

Зарядные токи в линиях будем использовать для получения расчётных токов в узлах потребления через емкостные проводимости по формуле:

$$J_{зарядный} = \frac{Y_L}{n} \cdot U_{ном}.$$

Токи от потерь холостого хода трансформаторов определим через полученные ранее проводимости по формуле:

$$J_{xx} = Y_{Tp} \cdot U_{ном}.$$

После вычерчивания схемы замещения сети на нее наносятся полученные значения сопротивлений и мощности или токи нагрузки. В зависимости от приня-

того метода расчета эти характеристики могут быть представлены числами в комплексной форме.

4.2 Получение расчетных мощностей узлов нагрузки (в задании заочников)

Как известно из лекционного курса исходную схему сети нужно представить в виде расчетной модели, которая будет состоять из схем замещения отдельных элементов сети. В нашем случае (задание для заочников) мы имеем участки сети, представленные только линиями электропередачи. В узлах нагрузки присутствуют понизительные трансформаторы. Нужно получить схемы замещения отдельных элементов сети, а именно линий и трансформаторов. Схема замещения ЛЭП будет определяться соответствующим классом напряжения (по заданию 35-220 кВ), но примем допущение, что для расчета установившегося режима в нашей задаче мы пренебрежем емкостными проводимостями. Поэтому схема замещения ЛЭП на любом классе напряжения будет выглядеть следующим образом, см. рис.4.3.



Рисунок 4.3 – Схема замещения ЛЭП (параметры ветви графа сети)

Схема замещения двухобмоточного трансформатора будет выглядеть аналогично, т.к. мы будем принимать допущение, что потери холостого хода трансформатора равны нулю. Таким образом, схема замещения линий и трансформаторов в нашей задаче будет представлена только активным и индуктивным сопротивлением.

Для упрощения схемы сети выполним ряд преобразований. Избавимся расчетным путем от участков трансформаторов в схеме замещения сети. Выполним расчет потерь мощности, в ветвях трансформатора, используя следующее выражение:

$$\Delta S_{тр} = \frac{P_{нагр}^2 + Q_{нагр}^2}{U_{ном}^2} (R + jX),$$

где $P_{нагр}$ и $Q_{нагр}$ – мощность узла нагрузки по заданию (см. табл.3.6),
 R и X – активное и индуктивное сопротивление трансформатора (справочная информация, см. табл. 3.5).

Далее необходимо получить эквивалентную нагрузку ветви трансформатор-потребитель, используя выражение (расчетная нагрузка):

$$S_p = S_{нагр} + \Delta S_{тр}.$$

Как известно в расчетной модели нагрузку мы будем представлять в виде задающих токов (актуально для случая использования линейных выражений в математической модели, реализованной по методу узловых напряжений, контурных токов и обобщенного уравнения состояния). Поэтому необходимо от мощностей узлов нагрузки перейти к задающим токам используя следующие выражения:

$$I_a = -\frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} \quad I_p = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$$

После этого можно приступить к получению направленного графа сети.

4.2 Расчет установившегося режима электрической системы

Как известно современные электрические сети характеризуются десятками и даже сотнями узлов и ветвей, следовательно, количество уравнений в математической модели для расчета такой сети будет велико. Составление этих уравнений весьма трудоемкая задача, поэтому ее решение целесообразно возложить на вычислительную технику. Для этого будем использовать формализованный подход к составлению уравнений [1], который был бы одинаков для схем любой конфигурации. Такой подход может быть разработан на основе аналитического представления схемы замещения с помощью теории графов.

Так, применяя теорию графов к электрическим цепям, в схеме замещения выделяют узлы, независимые контуры, дерево и хорды. Затем все элементы последовательно нумеруются, а их взаимное положение описывается специальными матрицами. На этом этапе работы рекомендуется придерживаться следующих правил:

1. Нумерация узлов (вершин) ведется снизу вверх по иерархии дерева схемы, т.е. в направлении от наиболее удаленных узлов к балансирующему. Балансирующий узел является последним в нумерации узлов.

2. Далее нумеруются ветви *дерева схемы*. Их направление выбирается от балансирующего узла к нагрузке. Каждой ветви присваивается номер конечной вершины.

3. В схеме замещения выделяются и нумеруются *независимые контуры*, выбирается направление их обхода.

4. Выделяются *хорды* схемы, не допуская более одной хорды в каждом независимом контуре. Хорды нумеруются во вторую очередь и в соответствии с последовательностью нумерации контуров. Направления хорд должны совпадать с направлением обхода контуров.

Как известно из курса лекций направленный граф сети может быть представлен в виде так называемой первой и второй матрицы соединений.

Первая матрица соединений (ветвей с узлами) М.

Первая матрица соединений составляется на основе направленного графа электрической сети. Строки первой матрицы соединений соответствуют узлам, столбцы - ветвям. На пересечении i -го столбца и j -й строки ставят (+1), если j -й узел является началом i -й ветви, (-1) - если j -й узел является концом i -й ветви и 0, если узел не имеет связи с i -й ветвью.

Вторая матрица соединений (ветвей в контуре) N.

Количество строк в ней равно числу независимых контуров, а количество столбцов - количеству ветвей графа. Таким образом, каждому контурному току

будет соответствовать своя строка, а каждой ветви схемы - свой столбец. Матрица заполняется следующим образом: при обходе контура ставят (+1), если обход совпадает с направлением ветви, (-1) - если не совпадает и (0) - если ветвь не входит в контур.

Также в расчете режима разомкнутой сети может быть использована матрица коэффициентов распределения дерева (обратная к первой матрице соединений для разомкнутой сети). Эта матрица может быть получена непосредственно из направленного графа схемы.

Правило получения матрицы коэффициентов распределения C_p :

- столбцы матрицы C_p отвечают узлам, а строки ветвям;
- двигаясь от первого узла к базисному, то есть по первому столбцу смотрят какие ветви встречаются на пути движения, при этом, если направление движения совпадает с направлением ветви ставят (+1), если противоположно - (-1), если ветви не встречается на рассмотренном пути - (0).

Далее рассмотрим алгоритмы расчета для некоторых матричных методов подробнее.

4.2.1 Метод узловых напряжений

Одним из наиболее популярных методов по составлению исходной математической модели для расчета установившегося режима электрической сети является метод узловых напряжений [1-3]. Достоинство метода проявляется в выборе в качестве независимых переменных узловых напряжений. Количество узловых напряжений, равное числу независимых узлов, значительно меньше количества ветвей, для которых определяют искомые токи.

В основу этого метода заложена матрица узловых проводимостей (Y_y). По сути необходимо получить матрицу Y_y .

Матрица узловых проводимостей Y_y – неособенная квадратная матрица, порядок которой равен количеству независимых узлов. Элемент Y_{ii} находится как

сумма проводимостей ветвей, которые соединяются с узлом i . На месте Y_{ij} находится проводимость ветви $i-j$ с обратным знаком. Элементы $Y_{ij} = Y_{ji}$, то есть матрица симметрична относительно главной диагонали. Если между узлами i и j нет непосредственной связи, то на месте $Y_{ij} = Y_{ji}$ ставится 0.

Алгоритм метода с использованием матричных операций:

1. В схеме замещения электрической сети выделить дерево и хорды.
2. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы.
3. Составить матрицу узловых задающих токов J .
4. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы - Z_B .
5. Составить первую матрицу соединений M .
6. Транспонировать матрицу M^T .
7. Расчетным путем получить матрицу проводимостей ветвей:

$$Y_B = Z_B^{-1}.$$

8. Используя граф сети получить матрицу узловых проводимостей Y_Y .
9. Определить матрицу узловых сопротивлений:

$$Z_Y = Y_Y^{-1}.$$

10. Решить узловое уравнение:

$$U_{\Delta} = Y_Y^{-1} \cdot J.$$

10. Определить матрицу узловых напряжений

$$U_Y = U_{\Delta} + n \cdot U_B.$$

11. Рассчитать токи в ветвях схемы по закону Ома:

$$I = Z_B^{-1} \cdot M^T \cdot U_{\Delta}.$$

Общим для всех рассмотренных методов является необходимость делать проверку найденных токов в ветвях схемы по первому закону Кирхгофа:

$$M \cdot I - J \leq \varepsilon,$$

и найденных напряжений в узлах по закону Ома:

$$M_p^T \cdot U_{\Delta} - Z_B \cdot I \leq \varepsilon,$$

где - заданная точность, например, 0,001.

4.2.2 Использование метода обобщенного уравнения состояния и метода контурных токов

Метод с использованием обобщенного уравнения состояния, как и метод контурных токов актуален только для замкнутых схем электрической сети [1].

В основе метода обобщенного уравнения состояния заложена так называемая матрица A . Ее можно получить из первой и второй матриц соединений по формуле:

$$A = \begin{vmatrix} M \\ N \cdot Z_B \end{vmatrix}$$

Алгоритм метода на основе обобщенного уравнения состояния:

1. В схеме замещения электрической сети выделить дерево и хорды.
2. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы.
3. Составить матрицу узловых задающих токов J .
4. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы - Z_B .
5. Составить первую матрицу соединений M .
6. Составить вторую матрицу соединений N .
7. Получить матрицу A .
8. Решить обобщенное уравнение состояния:

$$I = A^{-1} \cdot F,$$

где $F = \begin{vmatrix} J \\ 0 \end{vmatrix}$.

9. Выделить из полученных матриц подматрицы дерева и хорд.
10. Определить падение напряжения в ветвях схемы или узловое напряжение из закона Ома:

$$U_{\Delta} = C_{\alpha}^T \cdot Z_{\alpha B} \cdot I_{\alpha}.$$

8. Определить матрицу узловых напряжений:

$$U_V = U_{\Delta} + n \cdot U_B.$$

Общим для всех рассмотренных методов является необходимость делать проверку найденных токов в ветвях схемы по первому закону Кирхгофа:

$$M \cdot I - J \leq \varepsilon,$$

и найденных напряжений в узлах по закону Ома:

$$M_p^T \cdot U_{\Delta} - Z_B \cdot I \leq \varepsilon,$$

где ε - заданная точность, например, 0,001.

При рассмотрении метода контурных токов надо сначала научиться составлять матрицы контурных сопротивлений по формуле:

$$Z_K = N \cdot Z_B \cdot N^T,$$

а также непосредственно по схеме (см. конспект лекций).

Искомое распределение токов может быть найдено путем решения следующей системы уравнений:

$$I_K = Z_K^{-1} \cdot \left(E_K - N \cdot Z_B \cdot \begin{vmatrix} C_{\alpha} \\ 0 \end{vmatrix} \cdot J \right),$$

где I_K – контурный ток;

C_{α} – матрица коэффициентов распределения токов дерева, составляется аналогично матрице C_p ; 0 – в матрице $\begin{vmatrix} C_{\alpha} \\ 0 \end{vmatrix}$ – это строки нулей, количество которых добавляется таким образом, чтобы общее число их в матрице $\begin{vmatrix} C_{\alpha} \\ 0 \end{vmatrix}$ соответствовало числу ветвей.

Алгоритм расчета этим методом контурных токов в общем случае:

1. В графе схемы выделить дерево (α) и хорды (β).
2. Выполнить нумерацию узлов.
3. Выделить независимые контуры, указать направление.
4. Пронумеровать ветви дерева и хорд.

6. Составить матрицу узловых задающих токов J .
7. Составить матрицу сопротивлений ветвей схемы: Z_B . и выделить из нее подматрицу (блок) сопротивлений ветвей дерева Z_{aB} .
8. Составить вторую матрицу соединений N .
9. Составить первую матрицу соединений для дерева схемы M_a .
10. Транспонировать матрицу N , получив матрицу N^T .
11. По матрице M_a определить матрицу коэффициентов распределения токов в ветвях дерева схемы C_a или составить её по схеме.
12. Рассчитать матрицу контурных сопротивлений или составить её по схеме замещения Z_K :
13. Определить матрицу контурных проводимостей:

$$Y_K = Z_K^{-1}.$$

14. Определить контурные токи используя контурное уравнение.
15. Рассчитать токи, в ветвях схемы используя матричное выражение:

$$I = N \cdot I_K + \begin{vmatrix} C_a \\ 0 \end{vmatrix} \cdot J.$$

16. Определить падение напряжения в ветвях схемы или узловое напряжение из закона Ома:

$$U_\Delta = C_a^T \cdot Z_{aB} \cdot I_a.$$

8. Определить матрицу узловых напряжений:

$$U_Y = U_\Delta + n \cdot U_B.$$

Общим для всех рассмотренных методов является необходимость делать проверку найденных токов в ветвях схемы по первому закону Кирхгофа:

$$M \cdot I - J \leq \varepsilon,$$

и найденных напряжений в узлах по закону Ома:

$$M_p^T \cdot U_\Delta - Z_B \cdot I \leq \varepsilon,$$

где ε - заданная точность, например, 0,001.

Мы будем использовать случай при $E_K = 0$.

4.2.3 Расчет токов в ветвях разомкнутой сети при помощи коэффициентов распределения токов дерева

При использовании этого метода расчета разомкнутой сети сначала надо ознакомиться с правилом составления матрицы коэффициентов распределения токов схемы C_p , а затем изучить алгоритм расчета.

При расчете разомкнутых сетей решается только одно матричное уравнение:

$$I = C_p \cdot J,$$

где I – матрица токов в ветвях схемы;

J – матрица столбец узловых задающих токов;

C_p – матрица коэффициентов распределения токов дерева.

Алгоритм метода:

1. Выполнить нумерацию узлов и ветвей схемы замещения сети.
2. Составить матрицу узловых задающих токов по данным схемы замещения.
3. Составить диагональную матрицу сопротивлений ветвей схемы - Z_B .
4. Составить первую матрицу соединений M_p для разомкнутой схемы, включая в нее все узлы, кроме базисного узла.
5. По матрице M_p получить обратную матрицу C_p коэффициентов распределения дерева (обратная к матрице M_p), используя для этого граф схемы.
6. Решить матричное уравнение относительно токов в ветвях.
7. Определить падение напряжения в ветвях схемы или узловое напряжение из закона Ома:

$$U_{\Delta} = C_p^T \cdot Z_B \cdot I.$$

8. Определить матрицу узловых напряжений:

$$U_Y = U_{\Delta} + n \cdot U_B.$$

Общим для всех рассмотренных методов является необходимость делать проверку найденных токов в ветвях схемы по первому закону Кирхгофа:

$$M \cdot I - J \leq \varepsilon,$$

и найденных напряжений в узлах по закону Ома:

$$M_p^T \cdot U_{\Delta} - Z_B \cdot I \leq \varepsilon,$$

где ε - заданная точность, например, 0,001.

4.2.4 Получение фактических значений токов и напряжений

Для всех изложенных ранее метод актуально следующее. Окончательный пересчет токов и напряжений для реальной схемы электрической сети:

- для напряжений узлов с коэффициентом трансформации:

$$U_y^{факт} = \frac{U_y}{k_T} = \frac{U_y}{\left(\frac{U_{BH}}{U_{HH}} \right)} = \frac{U_y \cdot U_{HH}}{U_{BH}} ;$$

- для токов ветвей с учетом коэффициента трансформации:

$$I^* = k_T \cdot I = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} \cdot I.$$

Структурные схемы с результатами расчетов нормально и послеаварийного режимов должны быть отображены по результатам расчета по всем предложенным методам. Тексты программ для ЭВМ размещаются в приложении.

4.2.5 Итерационные методы

Как известно реальные электрические сети могут содержать множество узлов и ветвей, поэтому использование аналитических методов решения задачи расчета установившегося режима практически не возможно. К тому же в реальных сетях нагрузку целесообразно представлять в виде мощностей, а это привносит дополнительную нелинейность в математическую модель [1,3]. Таким образом, возникает необходимость в использовании итерационных методов решения подобных систем нелинейных уравнений. Наиболее популярные из них это метод Зейделя и метод Ньютона (Ньютон-Рафсона).

Решение системы нелинейных уравнений итерационными методами рассматривается на примере метода узловых напряжений. Более подробно об использовании методов Зейделя и Ньютона см. конспект лекций.

Для примера приведем основные выражения для основных итерационных методов.

Метод Зейделя. Зейделя Поправка по напряжению U на каждом шаге выполняется по следующим выражениям для схемы из трех независимых узлов:

$$U_1^{K+1} = \frac{1}{Y_{11}} \left(\frac{-P_1 + Q_1}{U_1^K} + (Y_{11} + Y_{12} + Y_{13})U_B - Y_{12}U_2^K - Y_{13}U_3^K \right);$$

$$U_2^{K+1} = \frac{1}{Y_{22}} \left(\frac{-P_2 + Q_2}{U_2^K} + (Y_{21} + Y_{22} + Y_{23})U_B - Y_{21}U_1^{K+1} - Y_{23}U_3^K \right);$$

$$U_3^{K+1} = \frac{1}{Y_{33}} \left(\frac{-P_3 + Q_3}{U_3^K} + (Y_{31} + Y_{32} + Y_{33})U_B - Y_{31}U_1^{K+1} - Y_{32}U_2^{K+1} \right);$$

$$|U_i^{K+1} - U_i^K| \leq \varepsilon.$$

Метод Ньютона (Ньютона-Расфона). Для сети двух независимых узлов алгоритм метода будет таким:

$$\begin{vmatrix} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 - \frac{P_1 + jQ_1}{U_1} - (Y_{11} + Y_{12} + Y_{13})U_B \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 - \frac{P_2 + jQ_2}{U_2} - (Y_{21} + Y_{22} + Y_{23})U_B \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 - \frac{P_3 + jQ_3}{U_3} - (Y_{31} + Y_{32} + Y_{33})U_B \end{vmatrix}.$$

Знак P в случае нагрузки «-», источника «+».

$$\frac{\partial W}{\partial U_1 \partial U_2 \partial U_3} = \begin{vmatrix} Y_{11} + \frac{-P_1 + jQ_1}{U_1^2} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} + \frac{-P_2 + jQ_2}{U_2^2} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} + \frac{-P_3 + jQ_3}{U_3^2} \end{vmatrix};$$

$$\begin{vmatrix} U_1^{K+1} \\ U_2^{K+1} \\ U_3^{K+1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_1^K \\ U_2^K \\ U_3^K \end{vmatrix} - \left| \frac{\partial W}{\partial U_1 U_2 U_3} (U_1^K, U_2^K, U_3^K) \right|^{-1} W(U_1^K, U_2^K, U_3^K);$$

$$|U_1^{K+1} - U_1^K| \leq \varepsilon; \quad |U_2^{K+1} - U_2^K| \leq \varepsilon.$$

4.2.6 Составление балансов мощностей

При расчете установившегося режима матричными методами мы будем иметь в качестве результатов расчета токи в ветвях и напряжения в узлах. Но для оценки допустимости режимов необходима информация о потерях активной и реактивной мощности в элементах сети. Чтобы получить эти потери в элементах необходимо воспользоваться полученными расчетными значениями токов в ветвях схемы и напряжений в узлах схемы по алгоритму.

1. Необходимо выделить массив положительных и отрицательных значений напряжений в узлах. А именно вектор V1 – положительные напряжения, и вектор V2 – отрицательные напряжения.

2. Получить диагональную матрицу токов в ветвях схемы.

$$\begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 \end{pmatrix}$$

3. Получить матрицы мощности в начале и конце ветви используя алгоритмы приведенные на рис. 4.4.

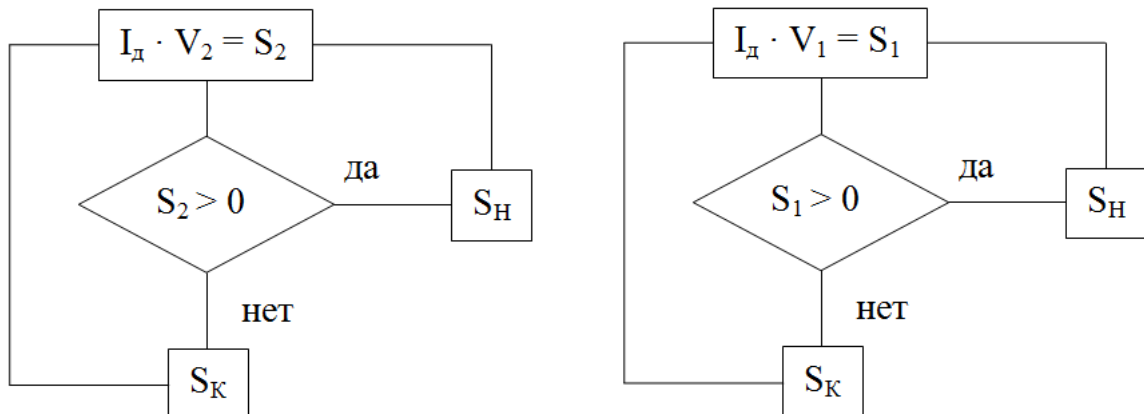


Рисунок 4.4 – Алгоритм расчета мощности в начале и конце ветви

4. Получить матрицу потерь мощности в ветвях.

$$M_{\Sigma}^T \cdot U_{y\Sigma} = Z_B \cdot I$$

$$\Delta S = I_{\partial} \cdot Z_B \cdot I = I_{\partial} \cdot M_{\Sigma}^T \cdot U_{y\Sigma}$$

$$\Delta S = I_{\partial} \cdot M_{\Sigma}^T \cdot U_{y\Sigma}$$

5. Проверка правильности расчета потерь мощности.

$$S_H + S_K - \Delta S \leq \varepsilon$$

где S_K и S_H – вектор столбец мощностей в начале и конце ветви;

ΔS – вектор столбец потерь мощности на участке сети.

6. Суммарные потери мощности

$$\Delta S_{\Sigma} = n^T \cdot \Delta S$$

5 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки объёмом 30-40 страниц. Текст – используется стандартный шрифт «Times new roman» размещается на одной стороне листа формата А4 (210×297 мм). Страницы должны иметь четыре поля: слева - 25мм, справа – 10 мм, а сверху и снизу – не менее 20 мм. Для машинописных работ – шрифт основного текста должен иметь размер 14 пунктов. Междустрочный интервал – полуторный.

Каждый раздел курсовой работы рекомендуется начинать с новой страницы. Разделы (кроме введения и заключения) должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами без точки после цифры. Заголовки пишутся без переноса слов прописными буквами; точка в конце заголовка не ставится.

Подразделы должны иметь порядковые номера в пределах каждого раздела. Подразделы нумеруют двумя цифрами – номером раздела и подраздела, разделёнными между собой точкой.

Расстояние между заголовками и последующим текстом должно быть 10 мм. Расстояние между последней строчкой текста и последующим заголовком – не менее 15 мм.

Сокращение слов в тексте и подрисуночных надписях, как правило, не допускается. При необходимости применять сокращения должен быть приведен перечень принятых сокращений.

Формулы записываются в виде символов на середине строки. Значения каждого символа расшифровывается с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле.

Все иллюстрации (графики, схемы, чертежи) в тексте именуют рисунками и нумеруют в пределах раздела двумя цифрами номером раздела и через точку номером рисунка. После номера обязательно приводится подрисуночный заголовок. Ссылки на ранее приведенные рисунки дают сокращением слова «смотри» (например: *см. рисунок 3.2*).

Цифровой материал рекомендуется оформлять в виде таблиц. Таблицы нумеруют в пределах каждого раздела двумя цифрами: номером раздела и через точку номером таблицы (например: *таблица 2.1*). При переносе данных на следующую страницу в ее верхней части отмечается: *продолжение таблицы 2.1* и повторяются все заголовки столбцов (строк).

Распечатки программ и расчётов, выполненных на ЭВМ, даются в виде приложений, которые размещают в конце пояснительной записки. Каждое приложение должно начинаться с нового листа с указанием вверху по центру слова «Приложение» и иметь обозначение, например: А, Б, В и т.д., а также заголовок (название).

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические системы. Математические задачи энергетики / под ред. В. А. Веникова. – Москва : Высш. шк., 1981. – 288 с.
2. Идельчик, В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик. – Москва : Энергия, 1977. – 192 с.
3. Перхач, В. С. Математичні задачі електроенергетики / В. С. Перхач. – Львів : Вища шк., 1989.- 464 с.
4. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учеб. для вузов. / В. И. Идельчик. - Москва : Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.
5. Образовательный математический сайт Exponenta.ru. Разд.: Mathcad [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://exponenta.ru/soft/Mathcad/Mathcad.asp>. - Загл. с экрана.
6. Лыкин, А.В. Математическое моделирование электрических систем и их элементов: учебное пособие / А.В. Лыкин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 227 с.
7. Любченко, В. Я. Применение математического моделирования в задачах электроэнергетики : учебное пособие / В. Я. Любченко, С. В. Родыгина. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2018. — 72 с.
8. Вычислительные модели потокараспределения в электрических системах/ [Б.И.Аюев, В.В.Давыдов, П.М.Ерохин, В.Г.Неуймин; под. ред. П.И. Бартоломея] – М.: Флинта: Наука, 2008. – 256 с.
9. Конспект лекций к дисциплине «Моделирование установившихся режимов в электрических системах» (для студентов дневной и заочной форм обучения направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки бакалавра «Электроэнергетические системы и сети») / Сост: С.А. Гришанов. - Донецк: ДОННТУ, 2020. - 61 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению курсового проекта по дисциплине
«Электрические системы и сети»**

Составитель:

Гришанов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры «Электрические системы» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Ответственный за выпуск:

Полковниченко Дмитрий Викторович – заведующий кафедрой электрические системы ФГБОУ ВО «ДонНТУ», кандидат технических наук, доцент.