Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой энергетики
___________ Н.В.Савина
«____»__________2007 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
«Математические задачи энергетики»

для специальностей:
140205 – Электроэнергетические системы и сети
140204 – Электрические станции
140211 – Электроснабжение
140203 - Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Составитель: докт. техн. наук, проф. Н.Ш. Чемборисова

Благовещенск

2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного университета

Н.Ш. Чемборисова
Учебно-методический комплекс по дисциплине «Математические задачи энергетики» для студентов очной и заочной форм обучения для специальностей: 140205 – Электроэнергетические системы и сети, 140204 – Электрические станции, 140211 – Электроснабжение, 140203 - Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем– Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. 53 стр.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения по специальностям: 140205 – Электроэнергетические системы и сети, 140204 – Электрические станции, 140211 – Электроснабжение, 140203 - Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем для формирования специальных знаний в области математических задач электроэнергетики и методов их решения при подготовке в качестве специалистов в сфере электроэнергетики на любом уровне (энергосистема, предприятие электрических сетей, район электрических сетей).

Аннотация

Настоящий УМКД предназначен в помощь студентам всех форм обучения по специальностям: 140205 – Электроэнергетические системы и сети, 140204 – Электрические станции, 140211 – Электроснабжение, 140203 - Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем при изучении дисциплины «Эксплуатация электроэнергетических систем».

При его написании учитывались рекомендации из положения «Об учебно-методическом комплексе дисциплины». УМКД разрабатывался на основе утвержденных в установленном порядке Государственного образовательного стандарта, типовых учебных планов и рабочей программы дисциплины, а также нормативных документов Министерства образования и науки Российской Федерации по вопросам организации учебно-воспитательного процесса. Исключением стали следующие пункты, которые не предусматриваются рабочей программой дисциплины «Математические задачи энергетики»:

- программа дисциплины, соответствующая требованиям государственного образовательного стандарта
- методические рекомендации по проведению практических занятий и т.п.;
- методические указания по выполнению расчетно-графических работ и контрольных работ.

Содержание

1. Рабочая программа дисциплины

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Амурский государственный университет
(ГОУВПО «АмГУ»)

“Утверждаю”
Проректор по учебной работе

___________________ Е.С. Астапова
“ ___” ________ 200 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИКИ»
для специальностей:
140205 – Электроэнергетические системы и сети,
140204 – Электрические станции,
140211 – Электроснабжение,
140203 - Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Курс 3	Очная форма Обучения	Заочная форма обучения для спец. 140205, 140211
Семестр	5	6
Лекции (час)	54	12
Практические занятия	18	6
Самостоятельная работа	36	90
РГР	5 семестр	
Контрольная работа		*
Экзамен	5 семестр	6 семестр
ВСЕГО часов	108	108

Составитель докт. техн. наук, проф. Н.Ш. Чемборисова

Факультет – Энергетический

Кафедра – Энергетики

Благовещенск 2006

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования 650900 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА по направлению (специальности) 140205, 140204, 140203, 140211; блок ЕН цикл общих математических и естественно-научных дисциплин, Р2 – Региональный компонент

Программу разработала докт.техн.наук, проф. Н.Ш. Чемборисова

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры энергетики

«_____»_______________200_ г. (протокол №______)

Зав.кафедрой_________________________(Н.В.Савина)

Рабочая программа одобрена на заседании учебно-методического совета направления (специальности)________________________________

«_______»_______________200_ г. (протокол №________)

Председатель

УМС___________________________(__________________)

СОГЛАСОВАНО
Начальник УМУ

____

«___»______________200_г.

СОГЛАСОВАНО
Начальник УМС факультета

____

«___»______________200_г.

СОГЛАСОВАНО
Заведующий выпускающей кафедры

____

«___»______________200_г.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ; ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

В дисциплине «Математические задачи энергетики» рассматриваются вопросы постановки и математического решения задач расчета, анализа режимов работы электрических сетей и систем и управления ими.

Государственный образовательный стандарт (выдержки)

ЕН.Ф.01 Математика:

Графы, дифференциальные уравнения, статистические методы обработки экспериментальных данных.

Электроэнергетика ОПД.Ф.08

Электрические нагрузки узлов электрических сетей; методы расчета электрических нагрузок; схемы замещения линий, трансформаторов; расчет режимов линий электропередачи и электрических сетей в нормальных и послеаварийных режимах; балансы активной мощности в энергосистеме; автоматизация процессов производства электроэнергии на электрических станциях.

1.1 Цель преподавания дисциплины

Целью изучения дисциплины является подготовка студентов к применению современных математических методов для решения электроэнергетических задач с ориентировкой на использование для этого средств вычислительной техники, пакетов прикладных программ.

1.2 Задачи изучения дисциплины

Задачей изучения дисциплины является подготовка инженеров в области применения математических методов и прикладных пакетов к решению задач электроэнергетики с учетом специфики функционирования в конкретном регионе. Основными задачами являются: изучение алгоритмов решения уравнений узловых напряжений (УУН) точными и итерационными методами, решения дифференциальных уравнений аналитическими и численными методами; запись уравнения малых колебаний сложных систем, формирование частотных характеристик системы, критериев устойчивости; статистические методы обработки данных, получение и использование уравнений регрессии; использование основ нейронных сетей и нечеткой логики в задачах управления режимами.

1.3 Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо студентам при изучении данной дисциплины

Изложение содержания дисциплины базируется на математической и общей электротехнической подготовке и знаниях, полученных при изучении специальных дисциплин «Математика», «Теоретические основы электротехники», «Информатика».

1.4 Требования к уровню усвоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- знать базовые способы расчетов установившихся и оптимальных режимов в ЭЭС; базовые методы решения дифференциальных уравнений для расчета переходных режимов, основы анализа статической и динамической устойчивости в ЭЭС; методы получения регрессионных зависимостей;
- уметь проводить расчеты установившихся и переходных режимов, анализировать их устойчивость, получать уравнения регрессии и использовать их при решении задач энергетики;
- иметь навыки составления расчетных схем сети, использования прикладных пакетов программ для расчета, анализа и оптимизации режимов, для обработки экспериментальных данных и использовании результатов в задачах оценки прогноза и надежности режимов с учетом специфики работы в регионе.

2. ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС (54 ЧАСА)

Тема 1. Введение (2часа).

Основные термины и определения. Предмет и задачи курса. Модели основных элементов энергетической системы и системы в целом. Режимы электрических систем, их устойчивость и ее виды.

Тема 2. Уравнения узловых напряжений (6 часов)

Схема замещения электрических систем. Формирование и матричная запись уравнений установившегося режима электрических систем.

Уравнения узловых напряжений (УУН) и их матричная запись. Матрица проводимостей.

Электрическая сеть, как граф. Матрицы инциденции. Использование матриц инциденции при формировании и решении уравнений узловых напряжений.

Тема 3. Прямые методы решения УУН (4 часа)

Метод Гаусса в алгебраической форме. Табличная форма метода Гаусса. Метод триангуляции матриц. Обращение матрицы узловых проводимостей. Решение системы линейных уравнений в обращенной форме, область применения такого подхода.

Тема 4. Методы решения нелинейных УУН (14 часов)

Способы задания нагрузки и генерации в узлах.

Запись нелинейной системы уравнений узловых напряжений (УУН).

Итерационные методы решения УУН. Простая и ускоренная итерация. Коэффициенты ускорения и замедления расчетов режима.

Метод Ньютона.

Градиентный метод и его применение в задачах электроэнергетики.

Метод по параметру, его использование для оценки состояния ЭЭС. Достоинство и недостатки методов первого и второго порядка.

Оптимизация режимов ЭЭС. Метод неопределенных множителей Лагранжа.

Применение градиентного метода в задачах оптимизации режимов ЭЭС.

Тема 5. Решение дифференциальных уравнений в задачах энергетики (8 часов).

Постановка задачи анализа переходных режимов. Аналитическое решение уравнения движения ротора. Погрешности расчета.

Численные методы решения дифференциальных уравнений: последовательных интервалов, Эйлера, Рунге-Кутта четвертого порядка. Область применения.

Использование синхронизирующей мощности генератора для оценки статической устойчивости.

Метод площадей для анализа динамической устойчивости.

Тема 6. Методы решения систем дифференциальных уравнений для анализа устойчивости ЭЭС (12 часов).

Формирование и решение систем дифференциальных уравнений.

Анализ возможности упрощения системы дифференциальных уравнений.

Запись и решение уравнений в отклонениях. Определение устойчивости по Ляпунову.

Запись системы линеаризованных уравнений на операторной плоскости и ее решение. Характеристическое уравнение и его решение.

Частотные критерии оценки результирующей устойчивости в ЭЭС. Оценка статической устойчивости ЭЭС.

Практические и расчетные критерии, их взаимосвязь.

Тема 7. Использование основ теории вероятности и математической статистики в задачах электроэнергетики (8 часов).

Статическая обработка результатов замеров режимных параметров в энергосистеме.

Уравнения парной регрессии: линейное и квадратичное. Коэффициенты корреляции. Использование уравнений регрессии в задачах прогнозирования режимных параметров и оптимизации режимов.

Множественная линейная регрессия, прогнозирование графиков нагрузки энергообъектов на ее основе.
Основные понятия надежности функционирования ЭЭС, виды надежности.
Использование нейронных сетей, нечетких множеств в задачах управления режимами энергосистем.

3. Примерный перечень практических занятий (18 ЧАСОВ)

1. Запись уравнений узловых напряжений, приведение к виду, удобному для решения – 2 часа;
2. Решение системы уравнений табличным методом Гаусса. Обращение матрицы узловых проводимостей – 2 часа;
3. Формирование нелинейной системы уравнений узловых напряжений, решение методами простой и ускоренной итерации – 2 часа;
4. Решение нелинейной системы УУН градиентным методом – 2 часа;
5. Решение системы уравнений методом Ньютона – 2 часа;
6. Формирование и решение систем уравнений оптимизации режима – 2 часа;
7. Решение дифференциальных уравнений методом последовательных интервалов, метод площадей – 2 часа;
8. Статистическая обработка результатов замеров режимных параметров, уравнения – 2 часа;
9. Оценка устойчивости по критериям – 2 часа;

4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА (36 часов)

Включает изучение лекционного материала и методической литературы при подготовке к практическим занятиям, выполнение самостоятельных заданий по темам практических занятий (9 часов), выполнение РГР (27 часов).

4.1 РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

Расчетно-графическая работа студента (РГР) включает расчет установившегося и оптимального режима ЭС различными методами, анализ режима, его статической устойчивости, запасов устойчивости. Расчет и анализ переходного режима, его динамической устойчивости.

Для заданной схемы сети:

составляются уравнения узловых напряжений (УУН);

система линейных УУН решается методами: алгебраическим или табличным методом Гаусса, методом триангуляции;

система нелинейных УУН решается методами: Ньютона, градиентным, простой или ускоренной итерации;

задача оптимизации решается методом неопределенных множителей Лагранжа, градиентным;

расчет переходного режима проводится методом последовательных интервалов, анализ режима – построением характеристик и методом площадей;

анализ статической устойчивости проводится по критериям (определитель матрицы Якоби УУН, сходимость итерационного процесса);

проводится сопоставление методов первого и второго порядков.

7. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1)Уравнение движения ротора.

2)Обращение матрицы.

3)Простая итерация.

4)Метод Ньютона для решения нелинейной задачи.

5)Градиентный метод в задачах оптимизации.

6)Понятие о стохастической связи. Множественная регрессия.

7)Характеристическое уравнение и его корни.

8)Алгебраический метод Гаусса.

9)Метод Ньютона, его достоинства и недостатки.

10)Метод Эйлера, его вывод, погрешности.

11)Оценка устойчивости по критериям.

12)Решение систем дифференциальных уравнений.

13)Прямые методы (область применения).

14)Табличный метод Гаусса.

15)Критерий статической устойчивости.

16)Метод неопределенных множителей Лагранжа.

17)Алгебраическая форма метода Гаусса.

18)Ускоренная итерация.

19)Решение дифференциального уравнения с постоянной правой частью.

20)Корни характеристического уравнения.

21)Прогнозирование нагрузки энергообъектов.

22)Определение устойчивости по Ляпунову.

23)Метод Эйлера, область его применения.

24)Парная линейная и квадратичная регрессия. Область применения.

25)Решение системы дифференциальных уравнений в отклонениях.

26)Метод триангуляции. Достоинства и недостатки методов первого порядка.

27)Условие сходимости итерационного процесса.

28)Анализ переходных режимов ЭЭС (постановка задачи).

29)Метод последовательных интервалов.

30)Численное решение дифференциальных уравнений.

31)Коэффициент корреляции. Его смысл.

32)Оценка устойчивости по корням характеристического уравнения.

33)Система нелинейных дифференциальных уравнений в задачах управления режимами (постановка задачи).

34)Метод Рунге-Кутта 4-го порядка, область его применения.

35)Основные виды надежности ЭЭС.

36)Прогнозирование нагрузки в ЭЭС.

37)Регулирование параметров ЭЭС.

8. ЗАОЧНАЯ И ЗАОЧНО-СОКРАЩЕННАЯ ФОРМА ОБУЧЕНИЯ

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС (12 ЧАСОВ)

1.Запись уравнений узловых напряжений (4 часа)

Основные термины и определения. Модели основных элементов энергетической системы и системы в целом. Режимы электрических систем, их устойчивость и ее виды.

Схема замещения электрических систем, Формирование и матричная запись уравнений установившегося режима электрических систем, уравнений узловых напряжений (УУН). Матрица проводимостей. Электрическая сеть, как граф. Матрицы инциденции. Использование матриц инциденции при формировании и решении уравнений узловых напряжений.

2.Методы решения УУН (4 часа)

Табличная форма метода Гаусса. Решение системы линейных уравнений в обращенной форме, область применения такого подхода.

Способы задания нагрузки и генерации в узлах. Запись нелинейной системы УУН. Простая и ускоренная итерация. Коэффициенты ускорения и замедления расчетов режима. Метод Ньютона. Достоинство и недостатки методов первого и второго порядка.

Оптимизация режимов ЭЭС. Метод неопределенных множителей Лагранжа. Применение градиентного метода в задачах оптимизации режимов ЭЭС.

3.Решение дифференциальных уравнений в задачах энергетики.(4 часа).

Постановка задачи анализа переходных режимов. Аналитическое решение уравнения движения ротора. Погрешности расчета. Численные методы решения дифференциальных уравнений: последовательных интервалов, Эйлера, Рунге-Кутта четвертого порядка. Область применения. Использование синхронизирующей мощности генератора для оценки статической устойчивости. Метод площадей для анализа динамической устойчивости.

Формирование и решение систем дифференциальных уравнений. Оценка статической устойчивости ЭЭС.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ (6 ЧАСОВ)

1. Запись уравнений узловых напряжений, приведение к виду, удобному для решения. Решение нелинейной системы уравнений узловых напряжений методами простой и ускоренной итерации – 2 часа;
2. Решение системы уравнений методом Ньютона. Формирование и решение систем уравнений оптимизации режима – 2 часа;

Решение дифференциальных уравнений методом последовательных интервалов, метод площадей – 2 часа.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА

Включает изучение лекционного материала и методической литературы при подготовке к практическим занятиям, выполнение самостоятельных заданий по темам практических занятий, выполнение РГР.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

Расчетно-графическая работа студента (РГР) включает расчет установившегося и оптимального режима ЭС различными методами, анализ режима, его статической устойчивости, запасов устойчивости. Расчет и анализ переходного режима, его динамической устойчивости.

Для заданной схемы сети:

- составляются уравнения узловых напряжений (УУН);

система линейных УУН решается методами: алгебраическим или табличным методом Гаусса, методом триангуляции;

- система нелинейных УУН решается методами: Ньютона, градиентным, простой или ускоренной итерации;
- задача оптимизации решается методом неопределенных множителей Лагранжа, градиентным;

- расчет переходного режима проводится методом последовательных интервалов, анализ режима – построением характеристик и методом площадей;

анализ статической устойчивости проводится по критериям (определитель матрицы Якоби УУН, сходимость итерационного процесса);

проводится сопоставление методов первого и второго порядков.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Контрольная работа соответствует РГР.

Примерный вариант задания по дисциплине "Математические задачи энергетики"

№ вар.	Z01, Ом	Z02, Ом	Z12 (Z21)	Z13 (Z31)	Z23 (Z32)	A01	A12 (A21)	A13 (A31)	A23 (A32)	S1, МВт	S2, МВт	S3, МВт	U0, кВ
1.	5	3	6	7	2	1	1	1	1	180	100	-100	230

Вопросы к экзаменам для заочникам соответствуют вопросам очной формы обучения.

9. Учебно-методическая (технологическая) карта дисциплины «Математические задачи энергетики»

Номер недели	Номер темы	Вопросы, изучаемые на лекции	Занятия (номера)		Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			практ.	Лаб		содержание	час	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	*Тема 1- Введение* Основные термины и определения. Предмет и задачи курса. Модели основных элементов энергетической системы и системы в целом. Режимы электрических систем, их устойчивость и ее виды. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
1	2	*Тема 2. Уравнения узловых напряжений* Схема замещения электрических систем. Формирование и матричная запись уравнений установившегося режима электрических систем. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. .		2	Выборочный опрос
2	2	Уравнения узловых напряжений (УУН) и их матричная запись. Матрица проводимостей. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. .		2	Выборочный опрос
3	2	Электрическая сеть, как граф. Матрицы инциденции. Использование матриц инциденции при формировании и решении уравнений узловых напряжений.			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. .Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006		2	Выборочный опрос
3	3	*Тема 3. Прямые методы решения УУН* Метод Гаусса в алгебраической форме. Табличная форма метода Гаусса. Метод триангуляции матриц. Обращение матрицы узловых проводимостей. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006		2	Выборочный опрос
4	3	Решение системы линейных уравнений в обращенной форме, область применения такого подхода. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
5	4	*Тема 4. Методы решения нелинейных УУН.* Способы задания нагрузки и генерации в узлах. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002		2	Выборочный опрос
5	4	Запись нелинейной системы уравнений узловых напряжений (УУН). 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002		2	Выборочный опрос
6	4	Итерационные методы решения УУН. Простая и ускоренная итерация. Коэффициенты ускорения и замедления расчетов режима. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
7	4	Метод Ньютона. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002		2	Выборочный опрос
7	4	Градиентный метод и его применение в задачах электроэнергетики. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
8	4	Метод по параметру, его использование для оценки состояния ЭЭС. Достоинство и недостатки методов первого и второго порядка. 2 ч			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос

9	4	Оптимизация режимов ЭЭС. Метод неопределенных множителей Лагранжа. Применение градиентного метода в задачах оптимизации режимов ЭЭС. 2 ч.			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006		2	Выборочный опрос
9	5	*Тема 5. Решение дифференциальных уравнений в задачах энергетики.* Постановка задачи анализа переходных режимов. Аналитическое решение уравнения движения ротора. Погрешности расчета. 2 ч			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006		2	Выборочный опрос
10	5	Численные методы решения дифференциальных уравнений: последовательных интервалов, Эйлера, Рунге-Кутта четвертого порядка. Область применения. 2 ч			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006		2	Выборочный опрос
11	5	Использование синхронизирующей мощности генератора для оценки статической устойчивости. 2 ч			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
11	5	Метод площадей для анализа динамической устойчивости. 2 ч			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
12	6	*Тема 6. Методы решения систем дифференциальных уравнений для анализа устойчивости ЭЭС.* Формирование и решение систем дифференциальных уравнений. 2 ч			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
13	6	Анализ возможности упрощения системы дифференциальных уравнений. 2 ч.			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
13	6	Запись и решение уравнений в отклонениях. Определение устойчивости по Ляпунову. 2 ч.			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
14	6	Запись системы линеаризованных уравнений на операторной плоскости и ее решение. Характеристическое уравнение и его решение. 2 ч.			Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
15	6	Частотные критерии оценки результирующей устойчивости в ЭЭС. Оценка статической устойчивости ЭЭС. 2 ч.			Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002. Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.		2	Выборочный опрос
15	6	Практические и расчетные критерии, их взаимосвязь. 2 ч			Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002		2	Выборочный опрос
16	7	*Тема 7. Использование основ теории вероятности и математической статистики в задачах электроэнергетики.* Статическая обработка результатов замеров режимных параметров в энергосистеме. 2 ч.			Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006.		2	Выборочный опрос
17	7	Уравнения парной регрессии: линейное и квадратичное. Коэффициенты корреляции. Использование уравнений регрессии в задачах прогнозирования режимных параметров и оптимизации режимов. 2 ч.			Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006.		2	Выборочный опрос
17	7	Множественная линейная регрессия, прогнозирование графиков нагрузки энергообъектов на ее основе. 2 ч.			Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006.		2	Выборочный опрос
18	7	Основные понятия надежности функционирования ЭЭС, виды надежности. Использование нейронных сетей, нечетких множеств в задачах управления режимами энергосистем. 2 ч.			Надежность систем энергетики. Достижения, проблемы, перспективы/Под ред. Воропая Н.И. Новосибирск, «Наука», 2000..		2	Выборочный опрос

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1.ПЕРЕЧЕНЬ ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ (ОСНОВНОЙ) ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по устойчивости энергосистем.- М.: ОРГРЭС, 2003.
2. Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.
3. Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.
4. Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.
5. Электрический справочник Т.1, Т.2.: М.: «Знак» Изд-во МЭИ, 2000.
6. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006.

2. ПЕРЕЧЕНЬ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические системы: Математические задачи энергетики /Под ред. В.А. Веникова. М.: Высш. Школа, 1989.
2. Системные исследования проблем энергетики /Под ред. Воропая Н.И. Новосибирск, «Наука», 2000.
3. Надежность систем энергетики. Достижения, проблемы, перспективы/ Под ред. Воропая Н.И. Новосибирск, «Наука», 2000.
4. Веников В.А. Переходные процессы в электрических системах . М.: Высшая школа, 1981.
5. дельчик В.И. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Дальэнергоатомиздат, 1988.
6. Львовский Е.Н. Статические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988.

Список сайтов

www.rao-ees.ru
www.mpei.ru
www.amurenergo.ru
www.so-edu.ru
www.vniie-ees.ru
www.e-m.ru
www.news-elteh.ru

2.КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электрическая система является частью электроэнергетической системы, она включает электрические сети, источники и преобразователи электрической энергии, ее потребителей. Для управления электрической системой требуется расчет ее режима. В схеме замещения есть ветви и узлы. Ветвью называется любая неразветвленная часть схемы, узлом – пункт соединения нескольких ветвей.

Воздействия, вызывающие малые возмущения, происходят в системе непрерывно, т.е. установившийся режим по сути является режимом малых возмущений. Статической устойчивостью называют способность системы возвращаться к устойчивому режиму, близкому к нему при малых возмущениях.

Аварийные переходные процессы возникают при больших возмущающих воздействиях. Такие воздействия приводят к значительным отклонениям параметров режима от их исходного состояния. Динамической устойчивостью называют способность системы восстанавливать после больших возмущений состояние, близкое к исходному.

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТОВ РЕЖИМОВ ЭЭС

Сети современных электрических систем состоят из трехфазных симметричных устройств. Обычно в основе анализа таких сетей лежит некоторая расчетная схема (схема замещения), приведенная к одной фазе. Переход от реальных трехфазных сетей к их расчетным схемам позволяет уменьшать необходимый объем исходной информации и повышать эффективность расчетных методов.

Решения уравнений систем трехфазной линейной электрической сети могут быть основаны на методах контурных токов или узловых напряжений.

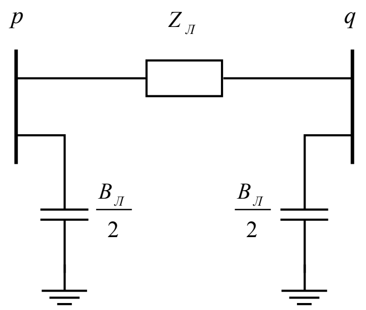
В подавляющем большинстве случаев конечная цель режимных расчетов состоит в вычислении напряжений узлов сети. По их величине судят о качестве и надежности электроснабжения потребителей и проводят мероприятия по его улучшению. Уравнения узловых напряжений (УУН) отвечают этим целям непосредственно.

При необходимости по напряжениям узлов можно определить и токи в ветвях и перетоки мощности по ним.

3. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Линии электропередач чаще всего в расчетах представляются

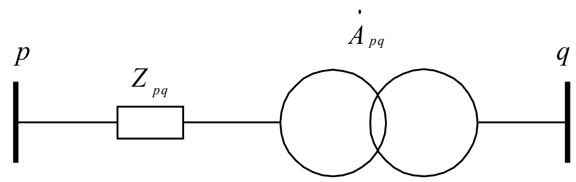
П-образной схемой замещения.



4. ВЫБОР МОДЕЛЕЙ НАГРУЗКИ И ГЕНЕРАЦИИ В УЗЛЕ, СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Многообразие моделей, представляющих генерирующие и нагрузочные узлы, усложняет задачу расчета режимов сложных ЭЭС. Одним из наиболее существенных факторов при этом является способ задания нагрузки в сети. В практике режимных расчетов применяется задание нагрузки постоянными мощностями или токами, постоянными проводимостями или сопротивлениями, статическими характеристиками нагрузки.

Для генерирующих узлов зачастую применяющаяся модель – задание постоянных активной мощности и напряжения на шинах генератора. Трансформаторы представляются для расчетов в виде следующей схемы замещения



Задание нагрузки или генерации в узлах встречается чаще всего в следующем виде.

Таблица 1

Представление генераторов в узлах

	Задано	Определяется
1	$P,\ Q$	$\lvert U\rvert,\ \delta$
2	$P,\ \lvert U\rvert$	$Q,\ \delta$
3	$\lvert U\rvert,\ \delta$	$P,\ Q$
4	$Q,\ \delta$	$P,\ \lvert U\rvert$

5. ПОРЯДОК ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Пусть рассматривается *i*-й узел представленной схемы.

Записывается баланс токов в *i*-м узле:

Каждый из токов в полученном уравнении записывается через напряжения по концам сетевых элементов. Проводимости приводятся к напряжению *i*-го узла в трансформаторных ветвях.

Просуммировав все токи, можно получить уравнения, которые преобразуется к виду, удобному для решения. Для всех узлов электрической системы, кроме балансирующего, записываются такие уравнения. Их совокупность дает уравнения узловых напряжений всей сети.

6. ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ В ЭВМ

Собственная проводимость узла формируется из проводимостей всех отходящих от него ветвей, следовательно, формирование матрицы [Y] в памяти

ЭВМ идет при прохождении информации о ветвях. Поскольку электрические системы не имеют схем, где все узлы связаны друг с другом, то она слабо заполнена. При компактной записи в памяти ЭВМ только значимых элементов можно получить значительную экономию памяти.

Собственные проводимости в матрице [Y] получены со знаком (+), а все взаимные – со знаком (-). Матрица [Y] симметрична относительно своей главной диагонали при отсутствии в сети трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации.

7. СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КАК СВЯЗАННЫЙ ГРАФ

Применение элементов теории графов позволяет рационализировать обобщение записи математических соотношений. Матрица соединений по узлам (матрица инциденций) служит для аналитического представления схемы соединений узлов и ветвей (вершин и ребер) в направленном графе (схеме электрической сети). При этом используются коэффициенты соединения (инцидентности).

Матрица дает полное представление о всех соединениях ветвей в узлах схемы, является прямоугольной, так как число строк равно числу узлов, а число столбцов – числу ветвей.

8. ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ СОЕДИНЕНИЙ

1. Матрица соединений позволяет записать в общем виде узловое уравнение для схемы в целом. Применение матрицы соединений позволяет провести формализацию записи уравнений балансов токов в узлах, достаточно простую алгоритмизацию их для расчетов на ЭВМ.

Сформировав уравнения узловых напряжений и приведя к удобному для решения виду, рассмотрим методы их решения.

2. С помощью матрицы инциденции можно провести расчет токов в ветвях. Проверка правильности решения производится по закону Кирхгофа.

3. С помощью матрицы инциденции можно провести расчет токов КЗ в ветвях. При этом образуется дополнительная ветвь с ЭДС, равной напряжению сети. Проверка правильности решения производится по закону Кирхгофа, при этом из вектор-столбца *Iкз* исключается ток шунта КЗ I_6 .

9. ЗАДАНИЕ УУН В ДЕКАРТОВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

При задании сопротивления элементов сети в виде $Z = (R + jX)$ уравнения узловых напряжений могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} G & -B \\ B & G \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U' \\ U'' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I' \\ I'' \end{vmatrix}$$

В матричном виде с разделением на действительные и мнимые составляющие разделение удобно для решения с помощью ЭВМ , так как при представлении УУН в полярной системе координат (U,δ) приходится иметь дело с тригонометрическими функциями , что замедляет вычислительный процесс.

10. МЕТОД ГАУССА В АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ФОРМЕ

Рассмотрим систему уравнений. Выбираем в качестве ведущего элемента $a_{11} = 0$. Разделив на него обе части первого уравнения. Затем умножим обе части полученного уравнения на a_{21} .

Вычтем из второго уравнения полученный результат (так исключается x_1).

Проделаем такую же работу с третьим уравнением исходной системы, исключив из него x_1. Теперь получена система из двух уравнений с двумя неизвестными.

Выбираем ведущий элемент $a_{22}^{(1)}$ и делим на него обе части первого уравнения полученной системы. Продолжаем до тех пор, пока все неизвестные, кроме одного не будут исключены. Этим заканчивается прямой ход метода Гаусса. Теперь осуществим обратный ход по методу Гаусса. Метод применим при не равных нулю ведущих элементах.

11. ТАБЛИЧНАЯ ФОРМА МЕТОДА ГАУССА

Вычисления по методу Гаусса удобно вести в табличной форме. Используемая при этом схема называется схемой единственности деления , т.е. каждый член следующего раздела равен члену предыдущего минус произведение его проекций на последнюю строку и первый столбец этого раздела.

Последняя строка каждого раздела образована делением первой строки раздела на ведущий элемент. Прямой ход заканчивается, когда в разделе будет только одна строка коэффициентов , не считая преобразованной.

Далее осуществляется обратный ход . Для него используются только последние строки каждого раздела прямого хода, содержащие “1”.

Для контроля вычислений используются контрольные суммы в столбце, представляющие собой сумму всех элементов строк матриц исходной системы, включая свободные члены.

12. МЕТОД ТРИАНГУЛЯЦИИ

Метод использует разложение квадратичной матрицы коэффициентов системы уравнений на произведение двух треугольных матриц.

Пусть заданная система уравнений последовательным исключением неизвестных сводится к системе с верхней треугольной матрицей.

т. е.:

$$AX = \gamma\,\alpha\,X = \gamma\,V = B.$$

Метод Гаусса в алгебраической и табличной формах и метод триангуляции матриц носят название прямых методов расчета.

13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ В УЗЛАХ И СУММАРНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СЕТИ

Полные мощности в узлах определяются после расчета значений напряжений U_j в узле как

$$\dot{S}_j = \dot{U}_j \hat{I}_j .$$

Потери активной мощности в сети могут быть определены как разность между мощностью балансирующего узла и суммой заданных (или подсчитанных) во всех узлах активных мощностей.

14. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ИТЕРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ. ПРОСТАЯ ИТЕРАЦИЯ

Задаемся некоторыми начальными приближениями x_j, т.е. примем

$$x_1^{(1)} = \frac{b_1 - a_{12}x_2^{(0)} - a_{13}x_3^{(0)}}{a_{11}}.$$

Из второго уравнения определим $x_2^{(1)}$, а из третьего – $x_3^{(1)}$.

Значения $x_1^{(1)}$, $x_2^{(1)}$ и $x_3^{(1)}$ имеют более приближенные к решению величины. Теперь вместо нулевого приближения зададимся полученными на первом шаге (первой итерации) значениями x. Повторим ту же последовательность действий. и т.д. Расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто оговоренная заранее точность ε, то есть пока не станут выполняться неравенства:

$$| x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)} | \geq \varepsilon ,$$

где j – номер неизвестного параметра;

i – номер итерации.

15. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДОМ ГАУССА – ЗЕЙДЕЛЯ

Отличие этого метода от метода Гаусса состоит в том, что полученные на данной итерации уточнения значений неизвестных сразу подставляются в выражение для определения следующего неизвестного параметра. Решая ту же систему уравнений, получаем процесс, который идет быстрее.

Сходимость итерационного метода Гаусса – Зейделя лучше, чем у простого метода Гаусса.

Расчет продолжается также до соблюдения условия

$$\left|\Delta U_j^{(k)}\right| = \left|U_j^{(k)} - U_j^{(k-1)}\right| \le \varepsilon \qquad (\text{при } j = 1 + n),$$

где ε – погрешность расчета по напряжению.

Вводят вектор невязок уравнений узловых напряжений. В точке решения все компоненты вектора равны нулю, поэтому окончание расчета может быть определено по условию:

$$\left[W_j^{(k)}\right] \le \varepsilon_1 \qquad (\text{ при } j = 1+n \text{ }).$$

16. КОЭФФИЦИЕНТЫ УСКОРЕНИЯ И ЗАМЕДЛЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Для ускорения расчетов можно ввести в ходе итерационного процесса коэффициенты ускорения α и замедления β. Расчетная формула для определения переменной x на (i + 1)-й итерации будет иметь вид:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + \alpha \Delta x^{(i+1)},$$

Иногда при плохой сходимости вычислительного процесса вводят коэффициент замедления β, определяемый в диапазоне 0,8…1 . Расчетная формула для нахождения $x^{(i+1)}$ аналогична расчетной формуле с коэффициентом α. Коэффициент замедления может помочь при плохой сходимости вычислительного процесса.

17. МЕТОД НЬЮТОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Метод основан на последовательной замене нелинейной системы уравнений некоторой линейной, решение которой дает более близкие к искомым значения неизвестных.

Рассмотрим сущность метода Ньютона. Для решения этой системы методом Ньютона примем начальное приближение $x_1^{(0)}$, $x_2^{(0)}$ и каждое из уравнений разложим в ряд Тейлора, ограничиваясь только линейными составляющими.

Решив полученное уравнение, находим новые приближения.

Проверяем условия сходимости: max $\Delta x^{(1)} \le \varepsilon$.

В случае невыполнения этого условия просчитывается следующая итерация.

Матрица Якоби – квадратичная матрица первых производных от выражений невязок уравнений, вычисленная при определенных значениях неизвестных $x_i^{(k-1)}$.

18. ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МЕТОДА НЬЮТОНА

Пусть задана функция одной переменной $y = f(x)$. Решением уравнения $y = 0$ будет точка пересечения графика функции $f(x)$ с осью абсцисс.

Зададимся нулевым приближением $x = x^{(0)}$. Соответствующее ему значение $y = y^{(0)}$. Проведем к точке с координатами $(x^{(0)}, y^{(0)})$.Тогда по определению первой производной

$$tg\alpha = y'(x^{(0)}).$$

Из полученного прямоугольного треугольника

$$\Delta x^{(0)} = \frac{y^{(0)}}{y'(x^{(0)})}.$$

При приближении к решению x_p можно записать

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - \Delta x^{(i)} .$$

Но тогда
$$\Delta x^{(i)} = -\frac{y^{(0)}}{y'(x^{(0)})}.$$

19. ГРАДИЕНТНЫЙ МЕТОД

При использование градиентного метода составляется функция суммы квадратов невязок

$$\psi(x) = \psi(x_1, x_2, \ldots x_n) = \sum_{k=1}^{n} \omega_k^2 (x_1, x_2, \ldots x_n).$$

Эта сумма всегда неотрицательна . Они равна нулю, если все невязки равны нулю. Значение переменных при этом являются решениями нелинейной системы уравнений. На практике достаточно бывает, чтобы $\psi(x) \le \varepsilon$, т.е. желательно определить минимум функции $\psi(x)$. Необходимым условием минимума является

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_k} = 0$$

для всех “k” из интервала (1 + n) . Градиентом функции ψ ($grad_x \psi$) называют вектор , k-я компонента которого равна частной производной $\frac{\partial \psi}{\partial x_k}$. В этом случае $grad_x \psi = 0$

Значения x могут быть определены по формуле $x^{(i+1)} = x^{(i)} + \rho . grad_x \psi$

Итерационный процесс сходится , если

$$\left|\Delta \psi^{(i+1)}\right| = \left|\psi^{(i+1)} - \psi^{(i)}\right| \le \varepsilon ,$$

Градиентный метод требует малой памяти ЭВМ . Его сходимость слабо зависит от выбора начальных приближений . Этот метод иногда предлагают использовать в качестве стартового алгоритма с переходом затем к методу Ньютона.

20. МЕТОД ПО ПАРАМЕТРУ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЭЭС

Метод по параметру используется в тех случаях, когда расходится метод Ньютона. Итерационная форма имеет вид :

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} * Y(x^{(k)})^{-1} * W(x^{(k)}),$$

где $\lambda^{(k)}$ – параметр (причем $|\lambda| \le 1$), для вычисления которого наиболее эффективны аналитические выражения с использованием матрицы вторых производных – матрицы Гессе :

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x_j \partial x_i}.$$

Ньютоновские методы обладают быстрой сходимостью и часто зависят от выбора исходного приближения.

21. ОБРАЩЕНИЕ МАТРИЦЫ УЗЛОВЫХ ПРОВОДИМОСТЕЙ МЕТОДОМ ГАУССА

Пусть необходимо получить матрицу $A^{-1} = C$.

По правилу $A*A^{-1} = E$ запишем $A*C = E$.

Тогда метод Гаусса представляется в табличной форме.

Проверка выполняется с помощью выражения $A*C = E$.

22. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ В ОБРАЩЕННОЙ ФОРМЕ

Пусть дано:

$$[Y]*[U] = [Y_{k0}]*U_0 - [I].$$

Решая систему уравнений с помощью обратной матрицы $Y^{-1} = Z$, получим :

$$U = Z([Y_{k0}]*U_0 - I) = [A_{k0}]*U_0 - Z*I,$$

23. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМ МЕТОДОМ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА

Пусть в энергосистеме содержится n тепловых электростанций, у которых зависимость расхода топлива B_i от активной мощности P_i выражается в виде: $B_i(P_i)$, рассчитывается суммарный расход условного топлива по всей системе в целом B. Целью оптимизации является минимизация расхода топлива B. В любой энергосистеме должно соблюдаться условие баланса мощностей. Составляется некоторая функция Лагранжа, содержащая и функцию цели и условие соблюдения баланса мощности. Теперь вместо поиска минимума целевой функции проводят поиск минимума функции Лагранжа, для чего определяют частные производные по всем независимым переменным P_i

и μ и приравнивают их к нулю. Решая полученную систему алгебраических уравнений относительно P_i и μ одним из ранее рассмотренных способов, можно получить их значения, которые соответствуют оптимальному по расходу топлива в энергосистеме режиму.

24. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ГРАДИЕНТНЫМ МЕТОДОМ

Для той же задачи найдем решение градиентным методом.

Определим одну из станций как балансирующую.

Тогда P_1 – зависимая переменная, а остальные P_i – независимые переменные. По ним определяются градиенты. Мощности станций, за исключением балансирующей, на (k+1) итерации определяется как

$$P_i^{(k+1)} = P_i^{(k)} - h^{(k)} \frac{\partial B^{(k)}}{\partial P_i},$$

Задаемся начальными приближениями $P_i^{(0)}$ $(i = 2 + n)$. Затем по формуле для $P_i^{(k+1)}$ определяется первый шаг.

Расчеты повторяются до выполнения условия сходимости.
Получив $B^{(1)}$, сравним его с $B^{(0)}$. Если $B^{(0)} > B^{(1)}$, то шаг выбран верно.

25. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Инженерам-электрикам любой специальности необходимо знать и уметь применять в практической деятельности численные методы решения дифференциальных уравнений. Частотные характеристики способны дать представление об устойчивой работе системы без решения дифференциальных уравнений, поэтому далее рассмотрены основные методы оценки устойчивости по частотным характеристикам. Излагаемые упрощенные методы оценки статической устойчивости, не требующие больших затрат машинного времени, позволяют существенно сузить диапазон режимов системы, для которых следует проводить уточненные расчеты. Тем самым существенно уменьшается объем исследований. Использование критериев статической устойчивости, широко распространенное в практической деятельности инженеров-электриков, сокращает количество необходимых для оценки статической устойчивости расчетов.

26. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА.

Рассмотрим простейшую схему сети генератор –шины.

Пусть схема замещения сети содержит только индуктивные сопротивления, поддерживается постоянным напряжение на шинах генератора Uг = const. Пусть на одной из параллельных линий произошло короткое замыкание (к.з.), тогда вместо сопротивления связи Xсв в схеме появится Xав – сопротивление в аварийном режиме.

Движение ротора синхронного генератора при протекании переходного процесса в общем случае описывается в следующем виде:

$$Tj\frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0*(P_0 - P_m*\sin\delta) = \omega_0*(\Delta P),$$

Решение дифференциального уравнения можно получить, дважды его проинтегрировав. Зависимость $\delta(t)$ позволяет оценить динамическую устойчивость системы.

27. РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Дифференциальное уравнение первого порядка можно записать в виде :

$$y' = f(y,t).$$

Это уравнение имеет семейство решений y(t). Например, если f(y,t)= y, функция $y(t)=C*e^t$ является решением. Выбор начального значения $y_{(o)}$ служит для выделения одной из кривых семейства.

28. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ПРОСТЕЙШЕЙ СХЕМЕ

Решение полученного уравнения не вызывает трудностей, если справа стоит постоянная величина, т.е. $\Delta P = const$ (3-фазное симметричное к.з. на землю) начальные условия, определяемые из режима системы до аварии $\delta = \delta o$, $\Delta\omega = 0$. Если же справа стоит переменная величина ($\Delta P \neq const$, случаи всех остальных видов к.з.), то используется метод последовательных интервалов.

РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

29. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Обыкновенное дифференциальное уравнение имеет, как известно, бесконечное множество решений. Для отыскания фиксированного решения требуются дополнительные условия. При решении задачи Коши удобно представить себе единственное уравнение:

$$У' = f(t,У)$$

$$У(t_o) = У_o .$$

Однако численные методы применимы и к системам уравнений.

Сущность численных методов состоит в следующем. На отрезке решения выбирается некоторое множество точек, называемое сеткой $X_0, X_1, X_2, ... X_k$, в общем случае с переменной длиной шага $h_i = X_{i+1} - X_i$. В каждой точке X_{i+1} вычисляется приближенное значение $У_{i+1}$ решения задачи по предыдущим значениям. Разностный метод, дающий формулу для вычисления $У_{n+1}$ по "k"-предыдущим значениям $У_{i-k+1}, У_{i-k+2}, ... У_i$, называется К-шаговым методом. Если $К = 1$, то это одношаговый метод, при $К \geq 2$ – многошаговый.

Методы также делятся на явные и неявные. Метод называют явным, если для определения значения $У_{i+1}$ требуются только предшествующие значения. При использовании неявного метода для определения $У_{i+1}$ необходимо (i+1) значений.

30. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Суть этого метода состоит в том, что ось времени разбивается на некоторое число интервалов с одинаковой величиной Δt в них. Полагают, что на интервале величина ΔP не изменяется, т.е. нелинейную правую часть заменяют ступенчатой характеристикой с $\Delta Pi = const$ и для каждого интервала проводят решение уравнений.

31. МЕТОДЫ РУНГЕ-КУТТА

Методы Рунге-Кутта являются одношаговыми. Они численно устойчивы для широкого класса задач и легко программируемы. Для вычисления $У_{i+1}$ используют лишь одно значение $У_i$, поэтому методы называют самоначинающими (самостартующими).

Различают методы Рунге-Кутта первого, второго, третьего и четвертого порядков. Наиболее часто употребимы методы первого и четвертого порядков. Метод первого порядка называют методом Эйлера.

$$У(X_{m+1}) \cong У(X_m) + h*f(X_m, У(X_m)), \quad m = 0,1...(n-1).$$

Метод Эйлера наиболее прост, но и наименее точен. Его ошибка, нарастает по мере вычислений.

Все методы второго и более высоких порядков, являясь одношаговыми, существенно более точны, чем метод Эйлера для достаточно гладких решений задачи Коши. Наиболее употребим метод 4-го порядка.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЭС

32. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многие технические устройства, в частности автоматически регулируемые системы, относят к числу описываемых системой обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами при анализе переходных процессов. При решении проблем управления современными электроэнергетическими системами возникает необходимость отыскать способы и средства воздействия на ЭЭС для придания переходному процессу желательного по тем или иным соображениям характера. Отыскание и реализация таких воздействий составляют задачу управления переходными режимами ЭЭС. Нелинейные дифференциальные уравнения не имеют универсальных методов решения, их изучение трудоемко. Поэтому их стараются свести к линейной системе с постоянными коэффициентами.

Решение соответствует состоянию равновесия (может физически соответствовать состоянию установившегося движения).

33. УСТОЙЧИВОСТЬ СОСТОЯНИЯ РАВНОВЕСИЯ

При математической оценке устойчивости имеют в виду: на промежутке $t\ (-\infty,\ t_0)$ (в качестве t_0 берут чаще всего $t=0$) возмущающие силы $f_1(t)$ вызывают отклонение от состояния равновесия:

$$X_i(t_0) \neq 0, \quad X_i(t_0) \neq 0, \quad (i = 1..n).$$

В момент $t = t_0$ действия возмущающих сил прекращается $[f_i(t) \equiv 0 \quad t>t_0]$ и далее имеет место переходный процесс, обусловленный начальными возмущениями. Он соответствует решению системы уравнений с начальными условиями и приобретенными в силу действия возмущающих сил при $t < t_0$:

$$\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}\frac{d^2X_j}{dt^2} + b_{ij}\frac{dX_j}{dt} + c_{ij}{*}X_j\right) = 0 \qquad (i=1\ldots n).$$

34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ЛЯПУНОВУ

Положение равновесия системы называется устойчивым, если для любого $\varepsilon > 0$ можно найти $\delta > 0$, когда все решения с начальными условиями $|X_{i0}| < |\delta_{i0}|$, $\delta_i = 1..n$ для $t>t_0$ будут удовлетворять $|X_i(t)| < \varepsilon$ $(i=1..n)$.

Положение равновесия называется асимптотически устойчивым, если оно устойчиво, а кроме того, удовлетворяют условию:

$$\lim_{t \to \infty} X_i(t) = 0 \qquad (i = 1 \,..\, n),$$

т.е. возмущенное движение асимптотически приближается к положению равновесия. Свойство, обратное устойчивости, называется неустойчивостью. Устойчивость состояние равновесия – необходимое условие нормального функционирования системы.

Устойчивость или неустойчивость состояние равновесия – чисто качественная характеристика решений системы уравнений, близких к решению $X_i = 0$ $(i = 1 \,..n)$. Количественная оценка возможна, если на множестве рассматриваемых решений системы уравнений определяют функции (или функционалы), способные служить критериями качества переходного процесса. Сравнивая значения критериев качества переходного процесса для различных систем, определяют такую систему, которая обладает заданными качествами переходных процессов.

35. РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ РАВНОВЕСИЯ НА ОПЕРАТОРНОЙ ПЛОСКОСТИ

Пусть $X_j(t)$ в соответствии с преобразованием Лапласа и Фурье имеет изображение $X_j(P)$:

$$L[X_j(t)] = X_j(P) \qquad P \text{ – оператор .}$$

Учитывая это, получаем:

$$\sum_{j=1}^{n}(a_{ij}P^2 + b_{ij}P + c_{ij}) * X_j(P) = f_j(P) + \sum_{j=1}^{n} [a_{ij}P + b_{ij})X_{i0} + a_{ij}X'_{i0}] = \psi_i(P) \quad (i = 1 \ldots n).$$

Отсюда: $$X_j(P) = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_{ji}(P) * \psi_j(P)}{D(P)} \qquad (i = 1 \ldots n),$$

где $D(P)$ – главный определитель системы уравнений;

$D_{ji}(P)$ – алгебраические дополнения элемента, стоящие на j-й строке в i-м столбце главного определителя.

или передаточными функциями системы от воздействия f_j к переменной X_i.

Если рассматривать систему как некоторое звено с входными и выходными параметрами, то $\frac{D_{ij}(P)}{D(P)}$ – передаточная функция от j-го входа к i-му выходу.

При этом $X_i(P)$ имеет полюса, совпадающие с корнями главного определителя D(P),т.е. с корнями (P_1, P_2,...P_m)

$$D(P) = 0.$$

Полюса $X_i(P)$ – значения P_i, при которых $X_i(P)$ обращается в бесконечность.

Это уравнение называется характеристическим (m – степень характеристического уравнения).

Нахождение корней характеристического уравнения при анализе переходного процесса во времени для сложных систем трудоемко. Поэтому в ряде случаев ограничиваются изучением устойчивости или оценкой переходных процессов во времени с помощью методов, не требующих вычисления корней характеристического уравнения.

При этом:

1) состояние равновесия асимптотически устойчиво, если все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части. Это верно и в том случае, если все корни кратные;

2) если хотя бы один корень характеристического уравнения имеет положительную действительную часть, то положение равновесия неустойчиво;

3) если характеристическое уравнение имеет корни с нулевой действительной частью (чисто мнимые или один корень нулевой), то положение равновесия устойчиво, но ассимптотической устойчивости нет;

4) если характеристическое уравнение имеет два нулевых корня, то положение равновесия неустойчиво.

36. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

Если степень характеристического уравнения достаточно велика, то для оценки устойчивости существуют методы, не требующие вычисления корней характеристического уравнения. Группа таких методов основана на изучении характеристик установившегося движения рассматриваемой системы при гармонических возмущающих воздействиях. Эта группа называется частотными методами. В их математической основе лежит теория функций комплексного переменного – рядов и интеграла Фурье.

Если на вход устойчивой линейной системы длительно действует гармонически изменяющая сила:

$$f(t) = a_f * \sin \omega = a_f * \mathrm{Im}\,(e^{j\omega t}),$$

то после достаточно большого промежутка времени (после затухания переходных процессов) на выходе установятся гармонические колебания с такой же частотой. Однако их амплитуда и начальные фазы будут зависеть от динамических свойств системы.

Пусть $W(P)_i = a_o p^n + a_i p^{n-1} + ... + a_n$

– передаточная функция рассматриваемой системы, тогда

$$A(\omega) * e^{j\varphi(\omega)} = W(j\omega) * a_f.$$

Значение передаточной функции $W(P)$ при $P = j\omega$ называется комплексным коэффициентом усилия системы при частоте ω, или просто комплексным коэффициентом усиления.

Геометрически $W(j\omega)$ представляет собой вектор на комплексной плоскости:

$$W(j\omega) = A(\omega) * e^{j\varphi(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega).$$

Зависимости $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$, $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ называются частотными характеристиками системы. Изучение их при изменении ω от 0 до $+\infty$ позволяет оценить устойчивость и качество переходных процессов.

37. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Задача исследования устойчивости электрических систем требует методов, позволяющих по доступным, легко получаемым признакам установить, устойчива ли система. В основе таких методов лежат критерии устойчивости.

Критерием устойчивости называется необходимое и достаточное условие или группа условий, при выполнении которых система устойчива.

Чтобы состояние равновесия было асимптотически устойчиво, необходимо и достаточно, чтобы все корни характеристического уравнения P_1, P_2... P_n лежали в левой полуплоскости. Характеристическое уравнение электрической системы обычно содержит несколько действительных и несколько комплексно-сопряженных корней.

КРИТЕРИИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЭС

38. ЗАДАЧА ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ В ЭЭС

Причины нарушения статической устойчивости в реальных ЭЭС разнообразны: увеличение или перераспределение генерирующих мощностей (нагрузок), снижение напряжения, изменение схемы замещения и т.п. В связи с этим задачу исследования статической устойчивости и средств ее обеспечения необходимо разделить на несколько подзадач:

1) анализ апериодической статической устойчивости;
2) исследование статической устойчивости с учетом самораскачивания;
3) синтез структуры стабилизации всей ЭЭС и отдельных ее объектов.

Очередность и целесообразность решения этих подзадач определяются целями проводимых исследований. При оперативном управлении режимами, например, можно ограничиться только анализом апериодической статической устойчивости .

39. ТРЕБОВАНИЯ К ПОКАЗАТЕЛЯМ ЗАПАСА ПО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Необходимо, чтобы показатель запаса статической устойчивости в энергосистемах отвечал ряду требований. Во-первых, он должен быть универсальным, т. е. применимым в электрических системах любой структуры, сложности, конфигурации – так, чтобы расчеты статической устойчивости можно было проводить по единой методике независимо от рассматриваемой схемы или состава работающего оборудования. При этом желательно его соответствие сложившейся в этом вопросе практике анализа устойчивости. Кроме того, показатель запаса должен рассчитываться на базе информации

40. ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТЕРИЕВ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

В ряде работ показано, что при определенных условиях свободный член характеристического уравнения совпадает с определителем матрицы Якоби уравнений установившегося режима полностью или с точностью до постоянного множителя.

$$a_n \equiv \frac{D(F_i, F_j)}{D(x_{10}, x_{20}, \ldots x_{n0},)} .$$

Параметры установившегося режима находят при решении системы линейных алгебраических уравнений:

$$W(X, Y) = 0.$$

Статическую апериодическую устойчивость при этом можно оценить по смене знака якобиана уравнений установившегося режима.

Несложно доказать и совпадение практического критерия $S = | dP/d\delta |$ (S – синхронизирующая мощность генераторов системы) с критерием по a_n. Проводя соответствующие преобразования, можно и здесь получить

$$S_i^* = a_n^* .$$

Можно построить и исследовать зависимость величины критерия от утяжеляемого параметра или контролируемого перетока. В простейшей схеме генератор – шины бесконечной мощности, содержащей только чисто индуктивное сопротивление, единственный член якобиана D = dP/dδ и критерий апериодической статической устойчивости совпадают с практическим критерием S = dP/dδ ≥ 0.

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

41. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Одной из распространенных задач в энергетике является аппроксимация экспериментальных данных аналитическими выражениями. Инженерам часто требуется описать результаты измерений аналитически. Чаще всего данные можно описать функциями линейной и полиномиальной регрессии. Наличие линейной зависимости, по крайней мере, на исследуемом интервале позволяет успешно использовать формулы линейного приближения.

В случае нелинейных уравнений, допускающих линеаризацию с помощью замены переменных, функции линейной регрессии можно применять к преобразованным уравнениям. Если же уравнения не могут быть линеаризованы, можно подобрать коэффициенты таким образом, чтобы добиться минимальной остаточной ошибки (суммы квадратов разностей между фактическими и прогнозируемыми значениями) или максимального коэффициента корреляции.

Наконец, те данные, которые не могут быть удовлетворительно описаны ни одним из вышеперечисленных методов, можно представить в виде таблицы, находящей с помощью методов интерполяции значения для точек, отсутствующих в таблице.

42. МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Условие наименьших квадратов состоит в следующем: необходимо минимизировать отклонение прогнозируемой функции от исходной:

$$\min(y_i - \sum_{j=1}^{N} x_{ij} * a_j)^2, \tag{10}$$

где a_j –определяемые в ходе решения коэффициенты;

y_i – наблюдаемые величины (функция отклика);

x_{ij} – функции – регрессоры.

43. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

При использовании функций регрессии для аппроксимации данных происходит минимизация остаточной квадратичной ошибки между фактическими и прогнозируемыми значениями (метод наименьших квадратов). Остаточная ошибка вычисляется по следующей формуле

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(y(x_i) - y_i \right)^2$$

где $y(x_i)$ — прогнозируемые значения, n — число точек, а x_i и y_i — фактические значения.

Модель многомерной линейной регрессии имеет вид

$$y\left(x_{1,i}, x_{2,i}, \dots\right) = A + Bx_{1,i} + Cx_{2,i} + \dots$$

где A, B *и* C – искомые коэффициенты.

44. КОРРЕЛЯЦИЯ

На практике часто возникает задача — установить, являются ли две наблюдаемые случайные величины x и y независимыми или связаны какой-либо зависимостью (не обязательно строго детерминированной). С этой целью рассматриваются две последовательности значений наблюдаемых величин $x_1, x_2,\dots, x_n$ и $y_1, y_2,\dots, y_n$, так что искомая зависимость (в случае ее существования) .должна иметь место между соответствующими членами последовательностей (с одинаковыми индексами). Обозначим через x_{cp} и y_{cp} средние значения этих величин, а через σ_x и σ_y— их средние квадратичные отклонения. Величина

$$r = \frac{1}{n\sigma_x\sigma_y}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{\text{ср}})(y_i - y_{\text{ср}})$$

называется коэффициентом корреляции двух рассматриваемых последовательностей значений. Величина **r** может меняться в пределах от —1 до +1.

45. УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ

Если обозначить через y_x среднее значение величины y, вычисленное для всех значений второй последовательности, отвечающих одному и тому же значению (равному x) величины второй последовательности, то получим уравнение $y_x - y_{\text{ср}} = r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x - x_{\text{ср}})$, которое называется уравнением регрессии y на x. Аналогично уравнение $x_y - x_{\text{ср}} = r\frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - y_{\text{ср}})$ называются уравнением регрессии x на y. Уравнения регрессии дают наилучшие (но методу наименьших квадратов) линейные аппроксимации для зависимостей условных (при заданном y или x) средних значений величин y и x от величин x и y соответственно.

Разумеется, линейные аппроксимации могут плохо отражать истинную природу указанных зависимостей. Для нахождения нелинейных аппроксимаций (нелинейных регрессий) в случае необходимости могут быть использованы методы, применяемые к последовательностям условных средних значений измеряемых величии.

Для оценки ошибки аппроксимации используются две суммы квадратов. Регрессионная сумма равна сумме квадратов разностей между значениями y и средним значением y.

$$\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \langle y\rangle\right)^2$$

Таким образом, эта величина является мерой разброса данных относительно среднего значения.

3. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

Индивидуальная работа студента

Включает изучение лекционного материала и методической литературы при подготовке к практическим занятиям, решение части задач дома.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Методические рекомендации по проведению практических занятий

Перечень тем практических занятий (18 часов)

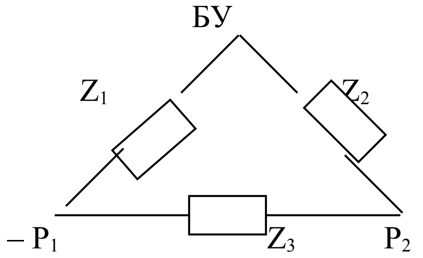
№ темы	Тема занятия	Число часов
1.	Запись уравнений узловых напряжений, приведение к виду, удобному для решения	2
2.	Решение системы уравнений табличным методом Гаусса. Обращение матрицы узловых проводимостей.	2
3.	Формирование нелинейной системы уравнений узловых напряжений, решение методами простой и ускоренной итерации	2
4.	Решение нелинейной системы УУН градиентным методом	2
5.	Решение системы уравнений методом Ньютона	2
6.	Формирование и решение систем уравнений оптимизации режима	2
7.	Решение дифференциальных уравнений методом последовательных интервалов, метод площадей	2
8.	Статистическая обработка результатов замеров режимных параметров, уравнения	2
9.	Оценка устойчивости по критериям.	2
	Итого:	18

Задания 2, 6, 7, 8 завершаются студентами самостоятельно.

Практические занятия по дисциплине «Математические задачи энергетики» проводятся в компьютерном классе с использованием программных продуктов Exel, Matcad. Рассматривается заданная схема сети, записываются необходимые для решения поставленной задачи уравнения, решение которых может осуществляться с использованием компьютера или вручную. После получения решения результаты проверяются подстановкой в уравнения, оценивается осуществимость полученного решения, его физическая обоснованность, делаются необходимые выводы. Решение задачи различными методами дает возможность сопоставления этих методов, выбора наиболее приемлемого в данной расчетной ситуации.

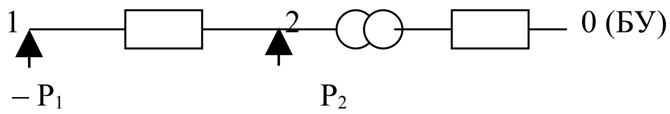
Примеры расчетных схем и исходных данных для практических занятий:

Схема 1



$U_{БУ} = 110$кВ
$Z_1 = 3$ Ома, $Z_2 = 5$ Ом, $Z_3 = 4$ Ома;
$P_1 = 5$ кА, $P_2 = 8$ кА

Схема 2



Z_{12}=2 Ома; Z_{20}=5 Ом; $A_{02} = \frac{220}{110}$
$|U_0|$=220 кВ , $P_1 = 3$кА,
$P_2 = 5$ кА

Исходные данные: Для простейшей схемы максимальное значение мощности в доаварийном режиме $P_1 = 40$ МВт, в послеаварийном режиме $P_2 = 40$ МВт , в аварийном режиме $P_3 = 20$ МВт, $T_j = 6$ сек., $t_{кз} = 0.4$ сек., интервал интегрирования $t = 0.1$ сек.

Пример расчета задачи оптимизации режима для двух станций с использованием пакета Matcad.

Çà ãåíåðèðóþùèé ïðèíèìàþ óçåë 2

$a_{0Ã} := 11.3$	$a_{0Á} := 11.3 + 0.02$	$a_{0Á} = 11.32$	$P_H := 25 + 27.3 + 25.6$	$P_H = 77.9$
$a_{1Ã} := 0.33$	$a_{1Á} := 0.33 + 0.02$	$a_{1Á} = 0.35$		
$a_{2Ã} := 0.039$	$a_{2Á} := 0.039 + 0.02$	$a_{2Á} = 0.059$		

Ìîùíîñòè ãåíåðèðóåìîãî è áàëàíñèðóþùåãî óçëîâ

$P_{Ã1} := 23.5$

$P_{Á1} := P_H - P_{Ã1}$ $\qquad P_{Á1} = 54.4$

Ðàñõîä óñëîâíîãî òîïëèâà

$B_Ã := a_{0Ã} + a_{1Ã} \cdot P_{Ã1} + a_{2Ã} \cdot P_{Ã1}^2$ $\qquad B_Ã = 40.593$

$B_Á := a_{0Á} + a_{1Á} \cdot P_{Á1} + a_{2Á} \cdot P_{Á1}^2$ $\qquad B_Á = 204.962$

$B_{\Sigma 1} := B_Á + B_Ã$ $\qquad B_{\Sigma 1} = 245.555$

Îòíîñèòåëüíûå ïðèðîñòû ðàñõîäà òîïëèâà

$b_1 := a_{1Ã} + 2 \cdot a_{2Ã} \cdot P_{Ã1}$ $\qquad b_1 = 2.163$

$b_2 := a_{1Á} + 2 \cdot a_{2Á} \cdot P_{Á1}$ $\qquad b_2 = 6.769$

Øàã $h := -0.1$

$b_2 - b_1 = 4.606$

Ìîùíîñòü ñòàíöèè

$P'_{\tilde{A}} := P_{\tilde{A}1} - h \cdot b_1$ $\qquad P'_{\tilde{A}} = 23.716$

$P'_{\acute{A}} := P_H - P'_{\tilde{A}}$ $\qquad P'_{\acute{A}} = 54.184$

$\varepsilon_1 := \left| P'_{\tilde{A}} - P_{\tilde{A}1} \right|$ $\qquad \varepsilon_1 = 0.216$

$\varepsilon_2 := \left| P'_{\acute{A}} - P_{\acute{A}1} \right|$ $\qquad \varepsilon_2 = 0.216$

$B'_{\tilde{A}} := a_{0\tilde{A}} + a_{1\tilde{A}} \cdot P'_{\tilde{A}} + a_{2\tilde{A}} \cdot P'^{2}_{\tilde{A}}$ $\qquad B'_{\tilde{A}} = 41.062$

$B'_{\acute{A}} := a_{0\acute{A}} + a_{1\acute{A}} \cdot P'_{\acute{A}} + a_{2\acute{A}} \cdot P'^{2}_{\acute{A}}$ $\qquad B'_{\acute{A}} = 203.501$

$B'_{\Sigma 1} := B'_{\acute{A}} + B'_{\tilde{A}}$ $\qquad B'_{\Sigma 1} = 244.563$

5. Методические указания к практическим занятиям

Для проведения практических занятий рассматриваются простейшие схемы сети, для которых формируются и решаются задачи расчета установившегося и переходного режимов, оптимизации режима, расчета критериев устойчивости, оценки устойчивости, обработки статистических данных. Практические занятия по дисциплине «Математические задачи энергетики» удобнее всего проводить в компьютерном классе. Использование студентами программных продуктов Excel, Mathcad позволяют прививать студентам навыки решения поставленных задач и использования программных продуктов. Необходимые для проведения практических занятий методы, формулы и алгоритмы решения поставленных задач, примеры с использованием Excel приведены в [5] основного списка, а с использованием Matcad в [8] основного списка литературы.

6. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ И КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТЫ

Студенты очной формы обучения выполняют расчетно-графическую работу. Студенты заочной формы обучения выполняют контрольную работу.

Расчетно-графическая работа студента (РГР) включает расчет установившегося и оптимального режима ЭС различными методами, анализ режима, его статической устойчивости, запасов устойчивости. Расчет и анализ переходного режима, его динамической устойчивости.

Для заданной схемы сети:

1) составляются уравнения узловых напряжений (УУН),

2) система линейных УУН решается матричным методом,: алгебраическим или табличным методом Гаусса или методом триангуляции,
3) система нелинейных УУН решается методами: Ньютона, градиентным, простой или ускоренной итерации
4) Задача оптимизации решается методом неопределенных множителей Лагранжа, градиентным
5) Расчет переходного режима проводится методом последовательных интервалов, анализ режима – построением характеристик и методом площадей.
6) Анализ статической устойчивости проводится по критериям (определитель матрицы Якоби УУН, сходимость итерационного процесса).
7) Проводится сопоставление методов первого и второго порядков.

Методические указания для выполнения расчетно-графической работы (основные расчетные формулы и алгоритмы) изложены в [6] основного списка на стр. 12-16 для выполнения п.1, на стр. 16-25 для выполнения п. 2, на стр. 26-31, стр. 33-37 для выполнения п.3, на стр. 41-45 для выполнения п.4, на стр. 32-34 для выполнения п. 6; а также в [7] основного списка на стр. 6-8, 10-11 для выполнения п. 5.

Контрольная работа включает в себя формирование матрицы узловых проводимостей, уравнений узловых напряжений и их решение матричным методом, определение токов в ветвях в нормальном установившемся и аварийном установившемся режимах.

Для заданной схемы сети:
1) составляется первая матрица соединений,
2) формируются уравнения балансов токов в узлах сети,
3) рассчитывается матрица узловых проводимостей,
4) определяются и проверяются токи в ветвях.
5) Составляется вторая матрица соединений для установившегося аварийного режима и повторяются пп. 2-4.

Основные формулы и алгоритмы, примеры по выполнению контрольной работы изложены в [5] основного списка.

Варианты заданий по дисциплине "Математические задачи энергетики"

№ вар.	Z01, Ом	Z02, Ом	Z03, Ом	Z12, Ом	Z13 , Ом	Z23 , Ом	S1, МВт	S2, МВт	S3, МВт	U0, кВ	
2.	5	3		6	7	2	180	100	-100	230	V12
3.	10	4		5	6	3	150	-110	100	230	V12
4.	6			4	6		70	40	-70	110	V2
5.	10			5	7		70	-50	70	230	V2
6.	4			4	5	3	80	50	-70	121	V21
7.	11			5	4	2	80	-60	70	230	V21

8.	5		2	4	5		100	60	-100	110	V22
9.	8		3	5	6		110	-70	90	230	V22
10.	6			6	7	3	180	180	-120	121	V3
11.	10			5	6	4	180	-150	120	220	V3

7. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ

В качестве входного контроля используются результаты проверки остаточных знаний студентов по высшей математике.

Межсессионный контроль осуществляется в виде опросов по изученному материалу, а также выполненных разделов РГР и решенных на практических занятиях задач.

Контроль остаточных знаний осуществляется с помощью тестов. Тесты для контроля остаточных знаний по дисциплине «Математические задачи энергетики» находятся в папке тестов кафедры.

Для проведения экзаменационного контроля ниже приводятся вопросы к экзамену.

КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ВОПРОСЫ

1) Уравнение движения ротора.
2) Обращение матрицы. Простая итерация. Метод Ньютона для решения нелинейной задачи. Градиентный метод в задачах оптимизации.
3) Понятие о стохастической связи. Множественная регрессия.
4) Характеристическое уравнение и его корни.
5) Градиентный метод в задачах оптимизации. Алгебраический метод Гаусса. Простая итерация. Метод Ньютона, его достоинства и недостатки.
6) Метод Эйлера, его вывод, погрешности.
7) Оценка устойчивости по критериям.
8) Решение систем дифференциальных уравнений.
9) Прямые методы (область применения). Метод Гаусса. Метод Ньютона.
10) Критерий статической устойчивости.
11) Метод неопределенных множителей Лагранжа. Алгебраическая форма метода Гаусса. Ускоренная итерация.
12) Решение дифференциального уравнения с постоянной правой частью.
13) Корни характеристического уравнения.
14) Прогнозирование нагрузки энергообъектов.
15) Определение устойчивости по Ляпунову.
16) Метод Эйлера, область его применения.
17) Парная линейная и квадратичная регрессия. Область применения.
18) Решение системы дифференциальных уравнений в отклонениях.
19) Метод триангуляции. Достоинства и недостатки методов первого порядка.
20) Условие сходимости итерационного процесса. Метод Ньютона, область его применения.
21) Анализ переходных режимов ЭЭС (постановка задачи).

22) Метод последовательных интервалов.
23) Численное решение дифференциальных уравнений.
24) Коэффициент корреляции. Его смысл.
25) Оценка устойчивости по корням характеристического уравнения.
26) Система нелинейных дифференциальных уравнений в задачах управления режимами (постановка задачи).
27) Метод Рунге-Кутта 4-го порядка, область его применения.
28) Уравнения в отклонениях, их решение.
29) Прогнозирование нагрузки в ЭЭС.
30) Регулирование параметров ЭЭС.

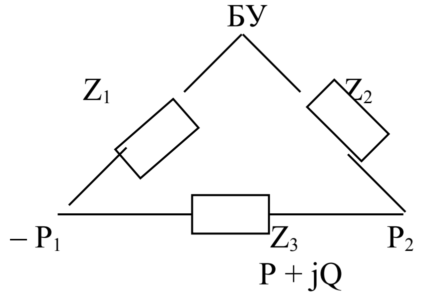
Для примера приведен экзаменационный билет по дисциплине.

Э К З А М Е Н А Ц И О Н Н Ы Й Б И Л Е Т N 1

1. Уравнение движения ротора и способы его решения.
2. Градиентный метод в задачах расчета режимов на примере заданной схемы.
3. Множественная линейная регрессия в задаче прогнозирования нагрузки ЭЭС.
4. Характеристическое уравнение и его корни при оценке устойчивости ЭЭС.

Схема к экзаменационному билету:

1.



$U_{БУ} = 115$кВ
$Z_1 = 2$ Ома, $Z_2 = 4$ Ома, $Z_3 = 1$ Ом;
$P_1 = 20$ МВт, $P_2 = 30$ МВт

ФОНДЫ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ

Для входного контроля используются тесты по проверке остаточных знаний студентов по математике.

АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Утверждено на заседании кафедры
23 ноября 2006 г, протокол № 4
Зав. кафедрой САВИНА Н.В.
УТВЕРЖДАЮ_________

Кафедра энергетики
Факультет ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
Курс: ТРЕТИЙ
Дисциплина: МАТЕМ. ЗАДАЧИ ЭНЕРГЕТИКИ

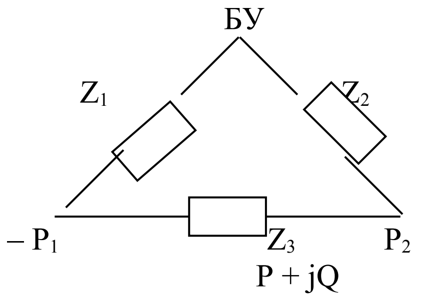
Э К З А М Е Н А Ц И О Н Н Ы Й Б И Л Е Т N 1

1. Уравнение движения ротора и способы его решения.
2. Градиентный метод в задачах расчета режимов на примере заданной схемы.
3. Множественная линейная регрессия в задаче прогнозирования нагрузки ЭЭС.

4. Характеристическое уравнение и его корни при оценке устойчивости ЭЭС.

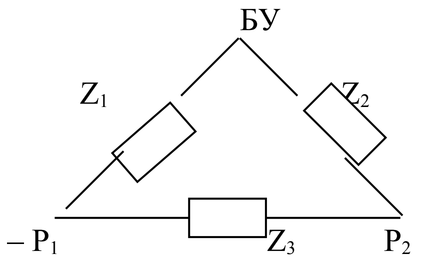
Схема к экзаменационному билету:

1.



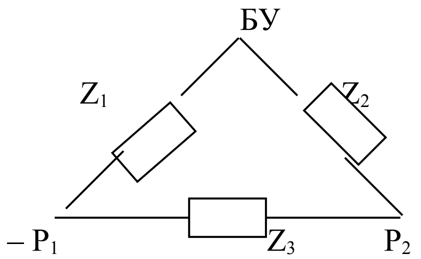
$U_{БУ}$ = 115кВ
Z_1 = 2 Ома, Z_2 = 4 Ома, Z_3 = 1 Ом;
P_1 = 20 МВт, P_2 = 30 МВт

2.



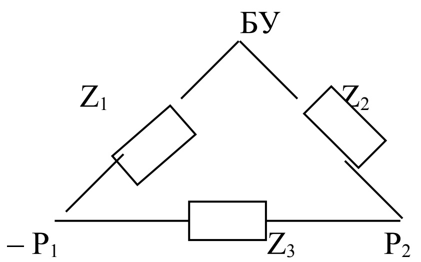
$U_{БУ}$ = 115кВ
Z_1 = 5 Ом, Z_2 = 4 Ома, Z_3 = 2 Ома;
P_1 = 30 МВт, P_2 = 40 МВт

3.



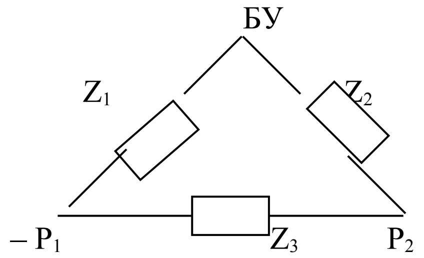
$U_{БУ}$ = 120кВ
Z_1 = 3 Ома, Z_2 = 2 Ома, Z_3 = 4 Ома;
P_1 = 40 МВт, P_2 = 30 МВт

4.



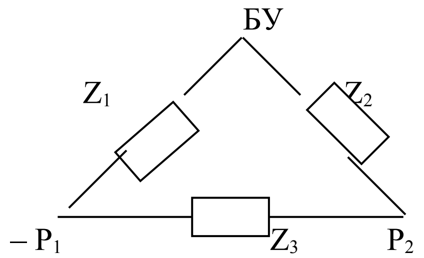
$U_{БУ}$ = 110кВ
Z_1 = 1 Ом, Z_2 = 5 Ом, Z_3 = 4 Ома;
P_1 = 40 МВт, P_2 = 40 МВт

5.



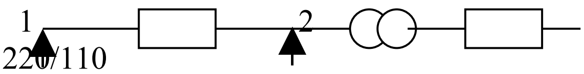
$U_{БУ}$ = 115кВ
Z_1 = 5 Ом, Z_2 = 4 Ома, Z_3 = 2 Ома;
P_1 = 7 кА, P_2 = 5 кА

6.



$U_{БУ}$ = 110кВ
Z_1 = 3 Ома, Z_2 = 5 Ом, Z_3 = 4 Ома;
P_1 = 5 кА, P_2 = 8 кА

7.



Z_{12}=2 Ома; Z_{20}=5 Ом; A_{02}= 220/110

$|U_0|$=220 кВ

8. P_1 = 40 МВт, P_2 = 40 МВт , P_3 = 40 МВт, T = 6 сек., t кз = 0.4 сек., t = 0.1 сек.

Контроль остаточных знаний

Тесты для контроля остаточных знаний по дисциплине «Математические задачи энергетики» находятся в папке тестов кафедры.

8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические системы: Математические задачи энергетики /Под ред. В.А. Веникова. М.: Высш. Школа, 1989.

2. Системные исследования проблем энергетики /Под ред. Воропая Н.И. Новосибирск, «Наука», 2000.

3. Надежность систем энергетики. Достижения, проблемы, перспективы/Под ред. Воропая Н.И. Новосибирск, «Наука», 2000.

4. Руководящие указания по устойчивости энергосистем.- М.: ОРГРЭС, 2003.
5. Алгоритмизация решения задач АСУ в электроэнергетике Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2006.
6. Основы расчетов установившихся режимов. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.
7. Основы расчетов переходных режимов. Чемборисова Н.Ш. Благовещенск: АмГУ, 2002.
8. Методы решения задач электроэнергетики с использованием ЭВМ. Чемборисова Н.Ш., Пешков А.В. Благовещенск: АмГУ, 2002.
9. Электрический справочник Т.1, Т.2.: М.: «Знак» Изд-во МЭИ, 2000.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные процессы в электрических системах . М.: Высшая школа, 1981.
2. Идельчик В.И. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Дальэнергоатомиздат, 1988

3. Фазылов Х.В., Насыров Т.Х. Основы теории и расчеты установившихся режимов электрических систем. Ташкент, Фан. Уз. ССр, 1985.
4. Костюк О.М. Элементы теории устойчивости. Киев.: Наукова думка, 1983.
5. Львовский Е.Н. Статические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988.

9. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско-преподавательского состава.

Вид учебной нагрузки	ППС
Лекции	Чемборисова Н.Ш., проф., доктор. техн. наук
Экзамен	Чемборисова Н.Ш.
Практические занятия	Гурина Л.С,. Чемборисова Н.Ш.