

## СОДЕРЖАНИЕ

### Предисловие

## ЧАСТЬ I. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ И АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

### Глава 1. Моделирование элементов энергосистем в расчетах установившихся режимов

- § 1.1. Рациональная запись уравнений источников и приемников электрической энергии
- § 1.2. Моделирование элементов сети энергосистемы в расчетах установившихся режимов
- § 1.3. Моделирование нагрузок
- § 1.4. Моделирование генераторов

### Глава 2. Практические методы расчета установившихся режимов энергосистем

- § 2.1. Расчет установившегося режима методом узловых напряжений
- § 2.2. Методы решения системы узловых уравнений
- § 2.3. Расчет установившегося режима методом эквивалентных преобразований
- § 2.4. Топологический анализ электрической схемы
- § 2.5. Свойства метода эквивалентных преобразований

### Глава 3. Расчеты установившихся режимов и статической устойчивости энергосистем

- § 3.1. Применение метода эквивалентных преобразований для анализа аperiодической устойчивости энергосистем
- § 3.2. Примеры расчетов электрических режимов
- § 3.3. Пример расчета предельного режима энергосистемы сложной структуры
- § 3.4. Применение управляемых шунтирующих реакторов

## Часть II. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

### Глава 4. Моделирование вращающихся машин

- § 4.1. Системы координат

§ 4.2. Соглашения, принимаемые при записи уравнений

§ 4.3. Уравнения Парка-Горева и их использование

## **Глава 5. Математическая модель синхронного генератора**

§ 5.1. Уравнения синхронного генератора в собственных  $d, q$  осях

§ 5.2. Учет насыщения стали

§ 5.3. Упрощенные уравнения синхронного генератора

§ 5.4. Синхронная машина как источник ЭДС в собственных  $d, q$  осях

§ 5.5. Расчет параметров модели генератора

§ 5.6. Расчет начальных условий

§ 5.7. Расчет производных интегрируемых переменных

## **Глава 6. Моделирование агрегата турбина-генератор**

§ 6.1. Структура модели

§ 6.2. Модель паровой турбины

§ 6.3. Модель гидравлической турбины

§ 6.4. Модель двухвальной газовой турбины

§ 6.5. Модель автоматического регулятора скорости

§ 6.6. Моделирование систем возбуждения

## **Глава 7. Математическая модель комплексной нагрузки**

§ 7.1. Структура модели

§ 7.2. Требования к модели нагрузки

§ 7.3. Динамическая модель асинхронного электродвигателя

§ 7.4. Учет и рассеивание потерь в асинхронном двигателе

§ 7.5. Упрощенные уравнения асинхронного двигателя

§ 7.6. Статическая модель асинхронного двигателя

§ 7.7. Расчет параметров модели асинхронного двигателя по каталожным данным

§ 7.8. Расчет начальных условий асинхронного двигателя

§ 7.9. Динамическая модель синхронного электродвигателя

§ 7.10. Статическая модель синхронного электродвигателя

§ 7.11. Расчет параметров модели синхронного двигателя по каталожным данным

§ 7.12. Моделирование систем возбуждения синхронных двигателей

§ 7.13. Моделирование рабочих механизмов

§ 7.14. Динамическая модель управляемых шунтирующих реакторов

## **Глава 8. Математическая модель релейной защиты и противоаварийной автоматики**

§ 8.1. Структура модели

§ 8.2. Алгоритмическое устройство

§ 8.3. Факторы и действия

- § 8.4. Алгоритм обработки автоматов
- § 8.5. Коммутации в электрической схеме
- § 8.6. Практическая реализация автомата

## **Глава 9. Расчеты электромеханических переходных процессов**

- § 9.1. Общие рекомендации по созданию и настройке динамической модели энергосистемы
- § 9.2. Динамическое балансирование установившихся режимов
- § 9.3. Динамическое утяжеление режима
- § 9.4. Расчеты динамической устойчивости при постоянной частоте
- § 9.5. Расчеты динамической устойчивости при свободной частоте
- § 9.6. Расчет асинхронного режима

## **Глава 10. Расчеты переходных процессов при глубоких снижениях частоты и действии автоматической частотной разгрузки**

- § 10.1. Автоматическая частотная разгрузка
- § 10.2. Требования к моделям элементов энергосистем
- § 10.3. Примеры расчетов АЧР

## **Глава 11. Расчеты переходных процессов в узлах нагрузки**

- § 11.1. Самозапуск асинхронных электродвигателей
- § 11.2. Пуск асинхронных двигателей от автономных источников
- § 11.3. Влияние конденсаторных батарей на переходные процессы в узле нагрузки

## **Список литературы**

- Приложение 1. Сопоставление методов расчета напряжений в узлах электрической схемы.
- Приложение 2. Определение параметров асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по каталожным данным
- Приложение 3. Определение параметров синхронного электродвигателя по каталожным данным
- Приложение 4. Программа расчета установившихся режимов и переходных электромеханических процессов в энергосистемах и узлах нагрузки

## Предисловие

В настоящей книге обобщен опыт авторов в разработке методов математического моделирования элементов многомашинных энергетических систем и узлов нагрузки для решения задач расчета установившихся режимов, электромеханических переходных процессов, анализа статической и динамической устойчивости. Ресурсы современных компьютеров снимают ограничения на размерность математической модели энергосистемы и позволяют применить новые методы расчета статических и динамических режимов энергосистем с использованием более полных и корректных математических моделей элементов электрических схем.

Книга состоит из двух частей. В первой части рассмотрены модели элементов энергосистем, используемые в расчетах установившихся режимов и при анализе статической устойчивости методом утяжеления режима. Разработан и доведен до практической реализации новый безматричный метод расчета электрических режимов, названный методом эквивалентных преобразований, базирующийся на представлении генераторов не идеальными, а реальными источниками ЭДС и тока. Сопоставлены свойства классических методов расчета установившихся режимов и метода эквивалентных преобразований, в котором сведение балансов активной и реактивной мощностей (балансов токов) в узлах схемы при итеративном расчете установившегося режима достигается за счет локального регулирования генераторов на поддержание заданных уставок активной мощности и напряжения. Метод не критичен к начальному приближению, обеспечивает полный и точный контроль ограничений режима генераторов и дает однозначное решение. Приведены примеры расчета установившихся режимов и анализа

статической устойчивости энергосистем методом утяжеления режимов.

Во второй части книги рассмотрена полная динамическая модель энергосистемы, в которой вращающиеся машины и статические элементы моделируются по уравнениям Парка-Горева. Обобщены требования к моделям генераторов, асинхронных и синхронных двигателей и сетевых элементов при решении практических задач, показана необходимость модификации классических уравнений Парка-Горева. Предложены универсальные математические модели асинхронных и синхронных двигателей различных типов, обеспечивающие воспроизведение пусковых характеристик в полном диапазоне изменения скольжения ротора и пригодные как для индивидуального моделирования двигателей в узлах нагрузки, так и для эквивалентных двигателей в составе комплексной нагрузки узлов. Приведены математические модели первичных двигателей и регуляторов скорости, систем возбуждения и регуляторов возбуждения различных типов. Предложена объектная модель релейной защиты и автоматики как системы автоматического управления энергосистемой, которая обеспечивает возможность моделирования алгоритмов работы различных устройств релейной защиты и автоматики с произвольными наборами измеряемых режимных параметров, контролируемых состояний объектов энергосистемы, сигналов и управляющих воздействий. Математическая модель энергосистемы рассмотрена весьма подробно. Приведены системы уравнений, описывающие элементы энергосистемы, объединение моделей элементов в единую модель, расчет параметров моделей, начальных условий и производных интегрируемых переменных.

Динамическая модель энергосистемы реализована в программе расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах и узлах нагрузки, все примеры расчетов выполнены по этой программе. Приведены подробные примеры динамического балансирования установившихся режимов, расчетов динамической устойчивости, асинхронных режимов, переходных процессов при глубоких снижениях частоты и действии автоматической частотной разгрузки, а также переходных процессов в автономных энергосистемах и в узлах нагрузки. Даны общие рекомендации по выбору адекватных моделей элементов энергосистем, по созданию и настройке динамической модели энергосистемы.