

Российская академия наук
Уральское отделение
Коми научный центр
Институт социально-экономических
и энергетических проблем Севера

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ
ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ответственный редактор
кандидат технических наук Н.А. Манов

Сыктывкар 2010

УДК 621.311.1

Коллектив авторов. **Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем.** – Сыктывкар, 2010. – 292 с. (Коми научный центр УрО РАН).

Монография посвящена оценке и обеспечению режимной и балансовой надежности электроэнергетических систем. Дана оригинальная трактовка структуры свойства надежности ЭЭС, приведены данные по адекватности и оперативной надежности зон Единой ЭЭС США и Канады за 2002-2007 гг., рассмотрены задачи управления статической и динамической надежностью ЭЭС в увязке с их информационным обеспечением, раскрыты методы и модели исследования балансовой надежности многозонных ЭЭС с учетом рыночных отношений в электроэнергетике.

Книга может представлять интерес для лиц, занимающихся теоретическими проблемами надежности электроэнергетических систем и практическими приложениями их решений.

Авторы

Н.А. Манов, М.В. Хохлов, Ю.Я. Чукреев,
Г.П. Шумилова, М.И. Успенский, М.Ю. Чукреев,
Д.В. Полуботко, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева

Рецензенты

д.т.н. Б.В. Папков, д.т.н. В.П. Обоскалов, к.т.н. П.А. Малкин

ISBN 978-5-89606-409-1

© Н.А. Манов, М.В. Хохлов,
Ю.Я. Чукреев и др., 2010
© Коми научный центр
УрО РАН, 2010

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АГК – анализ главных компонент
АиСН – анализ и синтез надежности
АПВ – автоматическое повторное включение
АРВ – автомат регулирования возбуждения
АСДУ – автоматизированная система диспетчерского управления
АСКУЭ – автоматическая система комплексного учета электроэнергии
АСУ – автоматизированная система управления
АЭС – атомная электростанция
ВНИИЭ – Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики
ГРЭС – государственная районная электростанция
ГЭС – гидроэлектростанция
ДГ – диспетчерский график
ЕЭС – Единая энергетическая система
ЗСПМ – зона свободного перетока мощности
ИИС – информационно-измерительная система
ИНС – искусственная нейронная сеть
ИСЭиЭПС – Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера
ИСЭМ – Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева
КСН – комплексное свойство надежности
ЛЭП – линия электропередачи
НАГК – нелинейный анализ главных компонент
НИ – неверное измерение
НЦ – научный центр
ОГК – оптовая генерирующая компания
ОДУ – объединенное диспетчерское управление
ОЗ – операционная зона
ОИК – оперативно-информационный комплекс
ОС – оценивание состояния
ОСВ – островная схема восстановления
ОТН – общетехническая теория надежности
ОЭЭС – объединенная электроэнергетическая система
ПАА – противоаварийная автоматика

ПВК – программно-вычислительный комплекс
 ПИ – псевдоизмерение
 ПН – показатель надежности
 ППП – программа последовательности переключения
 ПС – программное средство
 ПССС – пропускная способность системообразующей связи
 ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина
 РАН – Российская академия наук
 РАО – Российское акционерное общество
 РДМ – распределение дефицита мощности
 РДУ – региональное диспетчерское управление
 РЗА – релейная защита и автоматика
 РПН – регулирование под нагрузкой
 РЭЭС – районная электроэнергетическая система
 СВО – система восстановления острова
 СЛПК – Сыктывкарский лесопромышленный комплекс
 СМРР – система мониторинга переходных режимов
 СО ЕЭС – Системный оператор ЕЭС
 СО РАН – Сибирское отделение РАН
 СУБД – система управления базой данных
 СХН – статическая характеристика нагрузки
 СЭ – система энергетики
 ТГ – турбогенератор
 DLK (Директорский язык) – фирменная система подключаемая библиотека измерение
 DSA (Dynamic Security Assessment) – оценка динамической надежности сигнал
 EMS (Energy Management System) – система управления энергией
 ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
 C++ (C++ language) – язык написания программ для ПК
 ФСК – федеральная сетевая компания
 GUI (Graphical User Interface) – графический интерфейс пользователя
 ПЭВМ – электронно-вычислительная машина
 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Институт инженеров по электротехнике и электронике, США
 NERC (North American Electric Reliability Corporation) – фирма Бюро американская корпорация по надежности
 COM (Component Object Model) – модель компонентных объектов
 PMU (Phasor Measurement Unit) – устройство векторных изме-

рений

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система сбора информации и телеизмерений

UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) – Европейский союз по координации передачи электроэнергии

WAMS (Wide Area Measurement System) – система измерений на больших территориях (российский аналог СМПП).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Глава 1. Свойство надежности электроэнергетических систем	9
1.1. Содержательная характеристика свойства надежности ЭЭС	9
1.2. Адекватность и оперативная надежность зон Единой ЭЭС	18
1.3. Задачи анализа и синтеза надежности ЭЭС	23
Глава 2. Режимная надежность при оперативном управлении ЭЭС	42
2.1. Задачи обеспечения статической режимной надежности ЭЭС	42
2.1.1. Общая характеристика задач	42
2.1.2. Мониторинг системы	44
2.1.3. Оценка статической режимной надежности	47
2.1.4. Управление статической режимной надежностью ...	51
2.1.5. Иллюстративный пример	56
2.2. Роль и место экспертной системы «Советчик диспетчера» при обеспечении режимной надежности региональной ЭЭС	62
2.2.1. Функции «Советчика диспетчера» при опера- тивно-диспетчерском управлении региональ- ной ЭЭС	62
2.2.2. Технология обеспечения режимной надежности региональной ЭЭС	71
2.3. Определение границы динамической режимной надежности ЭЭС	84
2.3.1. Характеристика задачи	84
2.3.2. Существующие методы выбора оптимальной комбинации входных параметров модели оценки границы динамической надежности ЭЭС	86
2.3.2.1. Метод дивергенции для оценки динамической надежности ЭЭС	88
2.3.2.2. Нелинейный анализ главных компонент с использованием автоассоциативных нейронных сетей	89
2.3.3. Сравнение методов выбора оптимальной ком- бинации входных параметров модели оценки динамической надежности ЭЭС	95
2.3.4. Алгоритм определения близости текущего режи- ма ЭЭС к границе динамической надежности	99

2.4. Управляемое деление ЭЭС при системных авариях . . .	112
2.4.1. Проблема восстановления ЭЭС при системных авариях	112
2.4.2. Примеры некоторых системных аварий	121
2.4.3. Управляемое деление ЭЭС при системной аварии . . .	125
Глава 3. Информационное обеспечение оперативного управления режимной надежностью ЭЭС	130
3.1. Исследование надежности информационно-измерительных систем ЭЭС на основе анализа локальной избыточности телеизмерений	130
3.1.1. Постановка задачи	130
3.1.2. Разработка понятийного аппарата	133
3.1.2.1. Топологические показатели локальной избыточности	133
3.1.2.2. Алгебраические показатели локальной избыточности	136
3.1.2.3. Критические группы измерений	138
3.1.3. Разработка методов и алгоритмов анализа локальной топологической избыточности измерений ЭЭС	140
3.1.3.1. Получение критических групп измерений	140
3.1.3.2. Определение локальной избыточности измерений на основе критических групп.	145
3.1.3.3. Определение локальной избыточности измерений на графе измерений	147
3.1.3.4. Визуальный анализ больших систем	151
3.1.4. Надежность наблюдаемости ЭЭС	151
3.1.4.1. Оценка надежности системной наблюдаемости	153
3.1.4.2. Оценка надежности локальной наблюдаемости	159
3.1.4.3. От оценки надежности наблюдаемости к ее повышению	163
3.1.5. Идентифицируемость неверных измерений в ЭЭС	165
3.1.5.1. Топологическая идентифицируемость неверных измерений	166
3.1.5.2. Алгебраическая идентифицируемость неверных измерений	169
3.1.6. Анализ надежности информационно-измерительной системы на примере IEEE 14-узловой ЭЭС	172
3.2. Прогнозирование активной и реактивной нагрузок узлов региональной ЭЭС с использованием искус-	

ственных нейронных сетей	177
3.3. Использование новых компьютерных технологий в оперативном управлении ЭЭС	187
3.3.1. Система мониторинга переходных режимов ЭЭС	187
3.3.2. Архитектура современного программного средства моделирования и ведения режимов ЭЭС	189
3.3.3. Современные подходы в представлении оперативной информации при управлении режимами региональной ЭЭС	201
Глава 4. Методы и модели исследования балансовой надежности многозонной ЭЭС	207
4.1. Характеристика проблемы и существующие модели исследования надежности многозонных ЭЭС	209
4.2. Методика оценки показателей надежности много- зонной ЭЭС для условий рыночных отношений в электроэнергетике	213
4.2.1. Модель формирования случайных состояний системы	215
4.2.2. Модель оценки случайного состояния системы . .	221
4.2.3. Показатели балансовой надежности ЭЭС	226
4.3. Особенности обоснования уровня резервирования ЭЭС для условий рыночных отношений	227
4.4. Расчеты показателей и параметров средств обеспечения балансовой надежности ЭЭС России	231
Приложения	240
П1. Классификация терминов, характеризующих свойство надежности в энергетике	240
П2. Пример расчета деления ЭЭС на зоны по когерентности	252
П3. Доказательства утверждений, сформулированных в разделе 3.1.	255
П4. Подключение расчетного модуля оценивания состояния ЭЭС в программно-вычислительном комплексе «Корнет»	264
П5. Шейдер построения контурной раскраски на языке GLSL	270
Литература	271

ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежности электроэнергетических систем посвящена большая монографическая литература как в России, так и в мире. Тем не менее, в теоретическом плане проблема надежности ЭЭС не только не исчерпана, но и требует усиления внимания и дальнейших исследований. Указанное определяется многоплановостью проблемы надежности ЭЭС, постоянным развитием технологической основы электроэнергетики, внедрением рыночных отношений, либерализацией и глобализацией электроэнергетики и т.д. Данная книга затрагивает некоторые недостаточно изученные аспекты проблемы надежности ЭЭС.

В первой главе охарактеризованы многогранность свойства надежности ЭЭС, необходимость ее обеспечения на всех временных и объектных уровнях управления с помощью множества средств, одним из которых является использование методов теории надежности (общетехнической – ОТН и систем энергетики – ТНСЭ). ОТН имеет дело с техническими объектами, ТНСЭ – с производственно-техническими. Несовпадение понятийного аппарата этих теорий часто игнорируется, при этом для ТНСЭ терминология еще не является устоявшейся. В первом разделе главы и в приложении 1 охарактеризована используемая в монографии терминология, в основном, для ЭЭС. В зависимости от того рассматривается объект энергетики как технический или как производственный должен выбираться аппарат ОТН либо ТНСЭ. Второй раздел дает представление о существующем уровне надежности на примере Единой ЭЭС Северной Америки. В США и Канаде ежегодно анализируется надежность зон Единой ЭЭС на летний и зимний максимумы предстоящего года и на десять лет вперед. Наличие мощной надежностной школы в области ЭЭС, высокий уровень обеспеченности нормативной базой, доступность результатов исследований через Интернет стали причинами включения в монографию материалов по адекватности и оперативной надежности зон Единой ЭЭС США и Канады за последние годы. Последний раздел посвящен классификации задач анализа и синтеза надежности ЭЭС. Показано, что существуют разные подходы при оперативно-диспетчерском управлении и проектировании ЭЭС, а также в зависимости от средств управления надежностью.

Вторая глава посвящена задачам и способам обеспечения режимной надежности, в том числе на примере конкретной региональной ЭЭС. Важность управления надежностью ЭЭС за счет режимных мероприятий была осознана еще в 60-х гг. XX в. Соответствующие исследования привели к созданию аппарата мониторинга, оценки и управления статической режимной надежностью ЭЭС, и его использование стало обязательным в практике оперативного управления большинства зарубежных ЭЭС. Большую помощь в обеспечении режимной надежности может играть экспертная система «Советчик диспетчера», что показано на примере региональной ЭЭС. За

рубежом существенное развитие и применение получили также методы определения границ динамической режимной надежности ЭЭС. В третьем разделе главы дано сравнение возможных методов выбора входных параметров модели оценки динамической надежности, и предложен алгоритм определения близости текущего режима к ее границе. Существующие подходы к улучшению восстановления ЭЭС при системных авариях посредством управляемого деления рассмотрены в четвертом разделе.

Обеспечение режимной надежности ЭЭС затруднено при недостоверной или недостаточной информации от традиционных (SCADA) и новых (PMU) технических средств измерений. Первый раздел третьей главы содержит оригинальный материал по повышению надежности традиционных информационно-измерительных систем ЭЭС за счет локальной избыточности телеизмерений. Применение аппарата искусственных нейронных сетей для прогнозирования нагрузки узлов на примере региональной ЭЭС рассмотрено во втором разделе главы. В третьем – изложены новые подходы к мониторингу переходных процессов ЭЭС, архитектуре программных средств исследования режимов и представления оперативной информации диспетчерскому персоналу.

В четвертой главе описаны методы и модели исследования балансовой надежности ЭЭС, разработанные в Отделе энергетики Коми НЦ УрО РАН. Апробация этих моделей рассматривается на примере Единой ЭЭС России в разрезе как объединенных ЭЭС, так и зон свободного перетока мощности. Некоторые вспомогательные материалы к главам приведены в приложении.

Предисловие, глава 1 и приложение 1 подготовлены Н.А. Мановым; разделы 2.1., 3.1. и приложение 3 – М.В. Хохловым; раздел 2.2. – Ю.Я. Чукреевым; разделы 2.3. и 3.2. – Г.П. Шумиловой, Н.Э. Готман и Т.Б. Старцевой; раздел 2.4. и приложение 2 – М.И. Успенским; раздел 3.3. и приложения 4, 5 – Д.В. Полуботко; глава 4 – Ю.Я. Чукреевым и М.Ю. Чукреевым.

Авторский коллектив выражает благодарность Н.В. Бобылевой и Л.П. Соловьевой (ОАО Институт «Энергосетьпроект», г. Москва), вместе с которыми проводились исследования балансовой надежности ЭЭС России, а также сотрудникам Регионального диспетчерского управления Коми энергосистемы Ю.В. Зарубину, А.А. Хованову и работающему ныне в ОАО «СО ЭЭС» Э.А. Алле за совместную работу по созданию программного комплекса «Советчик диспетчера РДУ».

Авторы надеются, что книга будет полезна специалистам, занимающимся оценкой и обеспечением надежности ЭЭС.

Замечания и предложения по монографии просьба направлять по адресу: 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 26, Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми НЦ УрО РАН, Отдел энергетики.