

На правах рукописи



**ГЛАЗУНОВА АННА МИХАЙЛОВНА**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОБОДНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Иркутск - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Официальные  
оппоненты: **Паздерин Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Автоматизированные электрические системы», заведующий кафедрой

**Савина Наталья Викторовна**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Амурский государственный университет», проректор по учебной работе

**Фишов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы», профессор

Ведущая  
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Защита состоится 18 июня 2019г. в 9.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: **664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2019-1/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 003.017.01, доктор технических наук,  
профессор



**Александр Матвеевич Клер**

### **Актуальность темы**

Обеспечение эффективного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) является важным требованием при ведении режимов ЭЭС. Корректность результатов, полученных при решении задач по управлению режимами, зависит от многих факторов, в том числе от достоверности информации о пропускных способностях связей. величиной, характеризующей пропускную способность линии, является максимально допустимый переток (МДП) активной мощности. Разность между значением МДП и величиной текущего перетока, определяемая недоиспользованием пропускной способности линии, называется свободной пропускной способностью (СПС).

При вычислении МДП и СПС необходимо учитывать мощность генерации, которая вносит некоторую неопределенность в работу ЭЭС в связи с ее зависимостью от природных условий, и принимать во внимание нестационарное поведение электрической нагрузки. Вследствие изменения условий функционирования ЭЭС передаваемая по линии мощность и значение МДП оказываются непостоянными в различные промежутки времени. Поэтому величины МДП и СПС контролируемых линий необходимо вычислять (оценивать) в режиме реального времени по измерительной информации.

Главным условием получения корректных результатов при решении задач, исходными данными для которых служит измерительная информация, является полнота и достоверность этой информации. Высокое качество исходных данных достигается с помощью процедуры оценивания состояния (ОС), которая, в свою очередь, вычисляет оценки параметров режима адекватно отражающие текущее состояние ЭЭС только при отсутствии грубых ошибок в обрабатываемых данных. Неправильное представление о состоянии ЭЭС, в том числе и из-за неточного определения значений МДП и СПС контролируемых линий, может привести к неверным решениям при управлении режимами ЭЭС и быть причиной серьезных аварий. Поэтому обнаружение грубых ошибок в измерениях (обрабатываемых данных) и подавление их влияния на оценки параметров режима ЭЭС является одной из наиболее актуальных проблем при решении задач ОС и оценивания режима с МДП в контролируемых линиях (далее оценивание МДР).

Управление электрическим режимом энергосистемы осуществляется на основе не только фактических, но и прогнозируемых параметров режима с использованием математического моделирования. Процесс выработки управляющих воздействий (УВ) увеличивает время принятия решения по корректировке режима. Знание величин перетоков, МДП и СПС с некоторым упреждением дает возможность заранее вычислять УВ, что способствует ускорению реакции системы управления. По этой причине задача краткосрочного прогнозирования параметров режима, МДП и СПС является актуальной.

Использование СПС контролируемых линий в реальном времени предполагает увеличение загрузки рассматриваемых линий за короткий промежуток времени. В этом случае, с целью принятия оптимального решения по корректировке режима, диспетчерам необходимо не только предоставить информацию о величине СПС, но и предложить управляющие воздействия,

направленные на использование СПС. Реализация предложенных УВ должна обеспечить наибольшую выгоду всем заинтересованным субъектам и не причинить ущерб соседним энергосистемам. Быстрая выработка управляющих воздействий возможна при применении быстродействующих алгоритмов для вычисления текущих перетоков активной мощности, режима с МДП и СПС. При оценивании режима с МДП значения максимально допустимых перетоков в контролируемых линиях определяются с некоторыми допущениями и поэтому являются максимально допустимыми только в рассматриваемом режиме при выполнении текущих схемно-режимных ограничений. Для отличия МДП, полученных по строгим правилам, от оценок МДП, последние называются максимально допустимыми перетоками в текущем режиме (МДПр).

Актуальность работы определяется необходимостью:

- создания новой методологии, которая объединяет все этапы вычисления текущих параметров режима, параметров режима с МДПр и СПС, начиная с получения измерительной информации от систем сбора данных, обработки этой информации и заканчивая вычислением УВ, которые необходимо предпринять для максимального использования пропускной способности заданных линий конкретной ЭЭС. Существующие в настоящее время методы вычисления текущих параметров режима и МДП не объединены общей методологией, позволяющей обрабатывать измерительную стохастическую информацию, оценивать режим с МДПр и вычислять значения СПС;

- разработки методов, алгоритмов и методики вычисления режимов с МДПр и СПС контролируемых линий по измерительной стохастической информации;

- разработки методов обнаружения ошибок в измерительной информации для случаев, в которых отмечается низкая работоспособность известных методов: при интеграции данных, полученных от системы SCADA (сокр. от англ. Supervisory Control And Data Acquisition — система диспетчерского контроля и сбора данных реального времени) и СМПП (система мониторинга переходных процессов) и при низкой информационной избыточности. Разработка новых методов необходима для обеспечения системного оператора достоверной и полной информацией о текущем и заблаговременном состояниях ЭЭС, что включает текущие и прогнозные параметры режима, параметры режима с МДПр и СПС в текущий и в предстоящий моменты времени;

- создания методики достоверизации измерений по ретроспективной, текущей и прогнозной информации;

- выработки управляющих воздействий, направленных на использование СПС в реальном времени.

**Степень изученности проблемы.** Вопросами расчета МДП занимаются многие российские и зарубежные ученые. В России это: Б.И. Аюев, А.С. Александров, А.В. Данилин, А.В. Жуков, А.Т. Демчук, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.М. Конторович, В. Г. Неуймин, А.В. Паздерин, А.Г. Фишов и их коллеги. Зарубежные ученые это: N.D. Ghawghawe, K.L. Thakre, Kowshik Mushfiq-Ur-Rahman, Md. Saiduzzaman, Md. Naieem Mahmood, Md. Rokunuzzaman, Yunfei

Chu, Zhinong Wei, Guoqiang Sun, Yichi Li, Xiaochen Zhang, A. K. Kumar, Sinha Liang Min, Ali Abur, M. R. Aghaebrahimi, R. Kazemi, S. Ahmadnia и др.

Большой вклад в развитие методов оценивания состояния внесли П. И. Бартоломей, А.З. Гамм, Л.Н. Герасимов, И.И. Голуб, Ю.А. Гришин, И.Н. Колосок, В. Л. Прихно, М.В. Хохлов, J.F. Dorazo, F.C. Schweppe, E.Handshin и их коллеги.

### **Концепция работы и описание методологии**

В диссертации разработана методология мониторинга текущих режимов ЭЭС, режимов с МДПр, СПС и использования СПС в реальном времени.

На рисунке 1 представлена схема методологии.

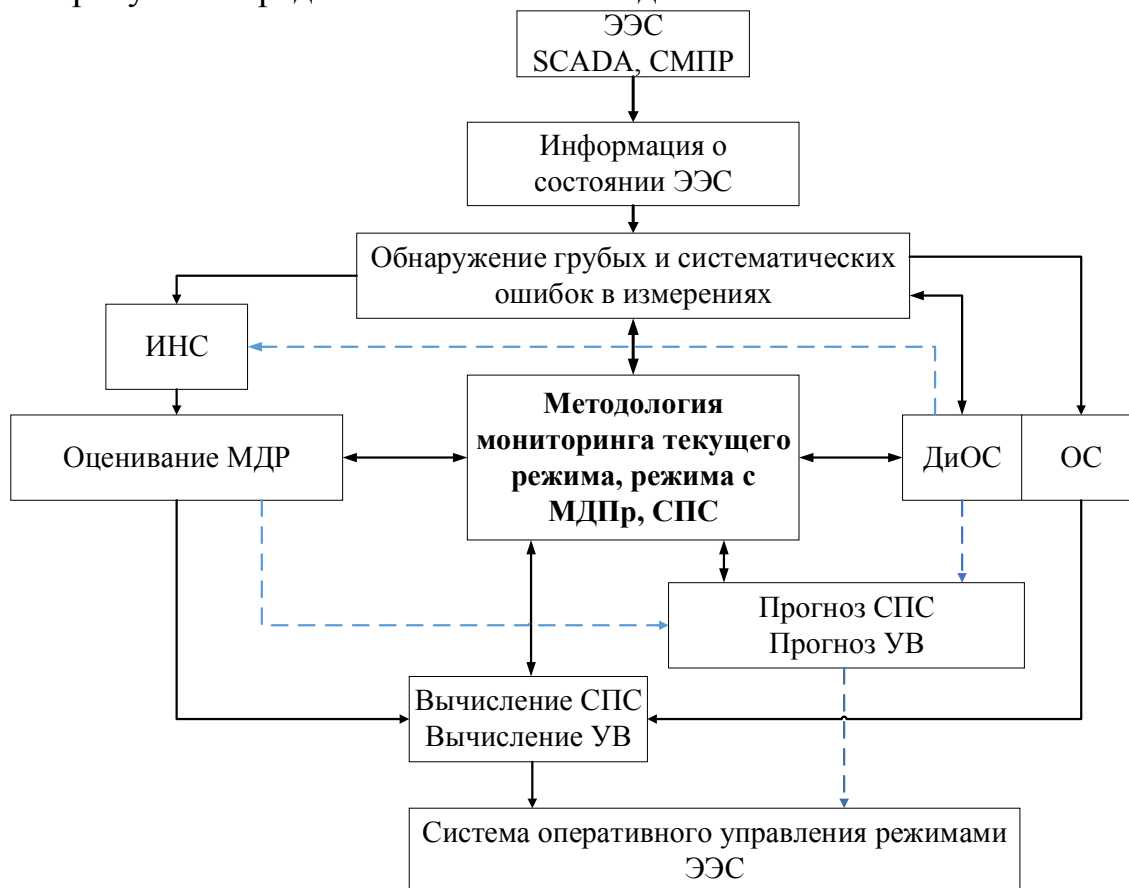


Рис.1. Схема методологии мониторинга текущих режимов, режимов с МДПр и СПС

Информация о состоянии ЭЭС поступает в диспетчерский пункт с помощью системы SCADA и СМПП. С целью использования только достоверной информации в задачах управления режимами ЭЭС в диссертации разработаны априорные методы достоверизации измерений, способные обнаруживать ошибочные измерения в условиях совместного применения данных системы SCADA и PMU (регистраторы СМПП), а также в случае низкой избыточности измерений.

По измерительной достоверной информации решаются задачи оценивания состояния, динамического оценивания состояния (ДиОС) и оценивания режима с МДПр. На временной диаграмме этапов управления режимами ЭЭС перечисленные задачи стоят на одном уровне. В результате оценивания состояния определяется текущий установившийся режим. Итогом оценивания режима с МДПр является результирующий установившийся режим с МДПр в

контролируемых линиях (или: режим с МДПр, а вместо оценивания режима с МДПр далее используется термин: оценивание МДР).

Для определения СПС необходимы значения перетоков в контролируемых линиях в текущий момент времени и значения МДПр, соответствующие данным условиям работы ЭЭС. Режим с МДПр в контролируемых линиях вычисляется по определенным сценариям, для текущих и прогнозных условий функционирования ЭЭС. Под сценарием понимается задание контролируемых линий, определение регулируемых параметров режима, задание диапазона изменения регулируемых параметров режима. Распознавание условий, для которых вычисляется режим с МДПр (режим, ограничения на параметры режима) выполняется с помощью ИНС. Конфигурация расчетной схемы распознается по параметрам режима.

При вычислении МДПр в диссертации были учтены следующие условия, которые указывают на то, что режим является допустимым: выполнение критерия обеспечения статической апериодической устойчивости (имеется ввиду сходимость итерационного процесса разработанного метода); выполнение критериев обеспечения термической стойкости, нормативного коэффициента запаса статической апериодической устойчивости по активной мощности и по напряжению (соблюдаются заданные схемно-режимные ограничения); организация запусков процедуры оценивания МДР в цикле поступления измерительной информации (в работе принимается допущение о малой вероятности аварийных ситуаций за рассматриваемый отрезок времени). Критерий динамической устойчивости в данной работе не рассматривается, поэтому полученные значения МДПр рекомендуется использовать для сечений, в которых МДП определяется статической устойчивостью. Доказательством того, что в полученном режиме перетоки в контролируемых линиях являются максимально возможными, служит факт нарушения заданных ограничений в случае незначительного увеличения перетоков.

С целью ускорения реакции системы управления параметры текущего режима, параметры режима с МДПр и величины СПС, по значениям которых принимается решение о дополнительной загрузке контролируемых линий, необходимо вычислять с некоторым упреждением. Проблема определения текущих и прогнозных оценок параметров режима решается с помощью ДиОС. Прогнозные данные используются для получения оперативного прогноза параметров результирующего режима, включая значения МДПр в контролируемых линиях (рисунок 1, пунктирные линии).

В диссертации определены цель, объект и предмет исследования, разработаны методы решения каждой задачи, методика достоверизации измерений, методика оценивания текущих режимов, режимов с МДПр, СПС.

Применение методов и методик, используемых в рамках разработанной методологии, позволяет повысить управляемость ЭЭС и эффективность функционирования ЭЭС за счет:

- учета требований всех заинтересованных в определении и использовании СПС контролируемых линий сторон;
- максимального использования пропускных способностей линий;

- кратковременного прогнозирования параметров режима, параметров режима с МДПр и СПС в контролируемых линиях.

Предложенные методы и алгоритмы реализованы в ПВК STATE+, который разработан с участием автора.

**Целью работы** является разработка методологии определения свободной пропускной способности контролируемых линий, направленной на повышение эффективности оперативного управления режимами ЭЭС путем:

- предоставления Системному оператору достоверной и полной информации о параметрах текущего и предстоящего режимов;

- оценивания режима с максимально допустимым перетоком активной мощности в контролируемых линиях по оперативной и оперативно-прогнозной информации с учетом текущих схемно-режимных ограничений и заданного сценария;

- вычисления величины свободной пропускной способности в контролируемых линиях и выработки управляющих воздействий для ее использования в режиме реального времени.

**Для достижения этой цели были поставлены и решены задачи:**

1. Анализ современных методов вычисления максимально допустимого перетока и свободной пропускной способности контролируемых линий при оперативном управлении энергосистемой.

2. Анализ современных методов оценивания состояния и обнаружения ошибок в измерениях.

3. Разработка метода и алгоритма оценивания режима с МДПр в контролируемых линиях по измерительной информации с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), включающего:

- модификацию метода нормальных уравнений и метода контрольных уравнений, используемых для оценивания состояния ЭЭС;

- выбор способа задания псевдоизмерений максимально допустимых перетоков (ПИ МДП);

- разработку алгоритма подбора весовых коэффициентов для ПИ МДП;

- формирование окружения ИНС и обучение ИНС идентифицировать текущие условия функционирования ЭЭС для определения весовых коэффициентов ПИ МДП.

4. Исследование результатов оценивания МДР, полученных с учетом и без учета регулирующего эффекта нагрузки.

5. Модификация алгоритма формирования фильтра Калмана при наличии измерений напряжений не во всех узлах схемы ЭЭС с целью ускорения получения прогнозов напряжения в заданных узлах.

6. Вычисление управляющих воздействий, направленных на использование СПС в контролируемых линиях.

7. Разработка методики оценивания режима с МДПр и СПС на базе измерительной и прогнозной информации.

8. Разработка методики достоверизации измерений по ретроспективной, текущей и прогнозной информации, включающей:

- разработку методов и алгоритмов достоверизации измерительной информации на базе динамического оценивания состояния при интеграции данных SCADA и СМПП;

- разработку методов и алгоритмов достоверизации измерительной информации на базе динамического оценивания состояния в условиях низкой информационной избыточности.

9. Разработка и построение имитационных математических моделей системы сбора данных на основе приближенных к действительности условий функционирования ЭЭС (учет разнообразных режимов, имеющих место в ЭЭС) для создания множества срезов измерений, в том числе срезов, измерения которых содержат ошибки.

**Объектом исследования** является система оперативного управления режимами ЭЭС.

**Предметом исследования** являются методы расчета свободной пропускной способности контролируемых ЛЭП в реальном времени, методы достоверизации измерений, методы оценивания текущих и прогнозных режимов ЭЭС.

#### **Научная новизна:**

1. *Разработана* методология мониторинга текущих и прогнозных режимов ЭЭС, позволяющая выявить по достоверным измерениям наличие свободных пропускных способностей контролируемых линий при текущих схемно-режимных ограничениях по заданным сценариям. В рамках методологии созданы методика мониторинга режимов с МДПр и СПС и методика повышения качества (достоверизации) измерений. Задача вычисления управляющих воздействий, направленных на использование СПС, является частью методологии.

2. *Предложен* новый подход к решению задачи мониторинга режимов ЭЭС, который заключается в модификации традиционных методов статического и динамического ОС и интеграции этих методов для решения поставленной задачи. Для этого в диссертации:

- выполнена интеграция динамического и статического оценивания состояния на основе расширенного разделенного фильтра Калмана, в результате чего часть параметров режима оценивается с учетом динамики во времени и может быть экстраполирована, остальные параметры режима оцениваются без учета их значений в предыдущие моменты времени;

- разработан метод, в результате которого оценивается не только текущее состояние ЭЭС, но и режим с максимально допустимыми перетоками в контролируемых линиях (результатирующий режим) в рассматриваемый момент времени для заданного сценария. Предложенный подход имитирует проведение натурных испытаний по определению режима с МДПр в момент получения нового среза измерений по заданному сценарию.

3. *Предложен* оригинальный метод обнаружения систематических ошибок в измерениях, который основан на анализе векторов статистических критериев для группы измерений вместо анализа критерия для каждого измерения отдельно.

4. *Разработан* метод обнаружения грубых ошибок в измерениях, достоинством которого является *уменьшение* противоречия в процессе

нахождения компромисса между обнаружением ошибок первого и второго рода в измерениях при использовании статистических методов.

### **Практическая значимость**

Идея работы базируется на знании о существующей практике проведения натурных испытаний по определению режимов с МДПр контролируемой линии в реальном времени и переводе этой практики в цифровой формат. В рамках разработанной методологии возможны проведение мониторинга режима с МДПр, СПС в заданные моменты времени по измерительной достоверной информации и выработка управляющих воздействий с целью использования СПС контролируемых линий в реальном времени. Корректные результаты гарантируются при условии тщательной настройки параметров разработанных программ при решении конкретной задачи.

Методики, методы и алгоритмы, разработанные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в службе электрических режимов Системного Оператора любого уровня, где есть необходимость в получении полной и достоверной информации о состоянии ЭЭС, в максимальном использовании пропускных способностей ЛЭП и в мониторинге степени загруженности ЛЭП. Методика оценивания режима с МДПр и СПС, адаптированная к решению конкретной задачи, может быть рекомендована для использования в службе оперативно–диспетчерского управления Системного Оператора.

При использовании методики оценивания режима с МДПр и СПС контролируемых линий для разных сценариев и с учетом параметров режима соседних ЭЭС, диспетчер будет иметь значения МДПр и СПС, адекватные текущему режиму при разных ситуациях в ЭЭС. Знание этих величин способствует повышению эффективности управления режимами ЭЭС.

Возможно применение отдельных методик и отдельных программ методик. Использование методики достоверизации измерений повышает качество исходной информации в условиях низкой информационной избыточности и при интеграции измерений, полученных от регистраторов векторных электрических величин и от системы SCADA. Программа ДиОС позволяет выполнять оперативный прогноз параметров режима.

### **Отдельные результаты исследований вошли в отчеты:**

- интеграционного партнерского проекта президиума сибирского отделения РАН № 95 «Методы оценивания состояния интеллектуальных электроэнергетических систем со сложной иерархической структурой»;
- гранта Минобрнауки РАН – Европейской комиссии «Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of EU and Russia Power Grids», выполненного в ИСЭМ СО РАН совместно с университетами европейских стран;
- ОАО «НТЦ Электроэнергетики» (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»); договор № 36/10у «Разработка методов оценивания состояния ЭЭС, прогнозирования параметров предстоящего режима и выбора управляющих воздействий для целей координированного адаптивного оперативного и противоаварийного управления режимами»;

- ОАО НТЦ «Электроэнергетики» (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»); договор № И-11-42/10 "Разработка разделов теоретических основ управления большими системами энергетики с неоднородными субъектами с учетом скорости протекания процессов в разных режимах, согласование и распределение между уровнями зон, объемов и объектов управления";

- базового проекта III.17.1 «Теоретические основы исследования инновационного развития ИЭС и управление ими», 2014–2017;

- базового проекта III.17.4.2 «Теория и методы обоснования развития и управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем», 2017–2020.

**Личный вклад автора** состоит в том, что:

*Выполнен анализ*

- современных методов вычисления максимально допустимого перетока и свободной пропускной способности контролируемых линий для целей оперативного управления энергосистемой;

- современных методов оценивания состояния и обнаружения ошибок в измерениях;

- способов формирования фильтров Калмана.

*Предложены и реализованы идеи*

- метода оценивания режимов с МДПр в контролируемых линиях (оценивание МДР),

- создания методологии для мониторинга режимов с МДПр, СПС и выработки управляющих воздействий, направленных на использование СПС, по достоверной измерительной информации с использованием ИНС;

- модификации методов нормальных уравнений, контрольных уравнений, модификации алгоритма расширенного фильтра Калмана;

- методов обнаружения грубых и систематических ошибок в измерениях в условиях интеграции данных системы SCADA и СМПП и в условиях низкой информационной избыточности;

- вычисления управляющих воздействий для использования СПС контролируемой линии;

- использования компромиссного подхода к вычислению режимов с МДПр, СПС и управляющих воздействий, с целью использования СПС в нескольких линиях одновременно.

*Разработаны алгоритмы*

- для всех предложенных методов;

- учета СХН при оценивании режимов с МДПр;

- формирования архивов измерений, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

В соавторстве с Е.С. Аксаевой

- разработан и реализован алгоритм подбора весовых коэффициентов ПИ МДП;

- созданы обучающие задачки для обучения ИНС распознавать текущие условия функционирования ЭЭС, выполнено обучение, тестирование ИНС;

- проведены расчеты и выполнены сравнительные анализы результатов вычисления режимов с МДПр, полученных по предложенному методу и по известным методам;

- выполнены расчеты по определению режимов с МДПр на реальной схеме.

В соавторстве с Е.С. Съемщиковым выполнены расчеты по обнаружению грубых ошибок в измерениях на тестовых данных, доказана достоверность полученных результатов.

В соавторстве с Е.С. Аксаевой и с Е.С. Съемщиковым разработан ПВК STATE+.

**Методы исследований.** В работе используются методы теории вероятности, математической статистики, решения систем нелинейных уравнений, оценивания состояния электроэнергетических систем, а также методы обучения нейронных сетей. Для проверки работоспособности разработанных методов и алгоритмов применяются методы имитационного моделирования на тестовых схемах ЭЭС. Предлагаемые подходы, методы и алгоритмы базируются на разработках авторского коллектива (при участии автора данной работы), реализованных в программно-вычислительных комплексах ОЦЕНКА, STATE+. Численные эксперименты проводились в среде Matlab, где были использованы функции из стандартных библиотек и разработанные автором.

#### **На защиту выносятся**

Методология мониторинга текущих параметров режима, режима с МДПр и СПС, в которой реализованы:

1. Метод оценивания режима с МДПр в контролируемых линиях для текущих или прогнозных условий функционирования ЭЭС.

2. Метод формирования расширенного разделенного фильтра Калмана.

3. Метод вычисления управляющих воздействий, направленных на использование СПС контролируемых линий в реальном времени.

4. Методы обработки измерительной информации с учетом ретроспективной информации о поведении ЭЭС – обнаружение ошибочных измерений в условиях:

- низкой информационной избыточности;

- совместного использования данных системы SCADA и СМПП в задачах оценивания состояния и оценивания МДР.

5. Методика определения режима с МДПр и СПС в контролируемых линиях по текущим и прогнозным значениям параметров режима и методика повышения качества измерительной информации.

6. Реализация разработанных методов в виде алгоритмов и программ.

**Достоверность результатов** гарантируется тем, что метод оценивания режима с МДПр базируется на следующем известном факте: при применении метода взвешенных наименьших квадратов за счет подбора соотношения между весовыми коэффициентами измерений можно получить допустимое решение,

максимально приближенное к заданному недопустимому с определенной точностью.

Для сравнительного анализа использованы данные научных статей и расчеты, выполненные по известным программам. Установлено численное тождество значений МДПр, полученных по разработанным в диссертации методикам, с результатами, взятыми из независимых источников, и с результатами, вычисленными по известным программам; показано, что значения МДПр, полученные с помощью разработанного метода оценивания МДР соответствуют значениям МДП, которые используются диспетчерским персоналом.

Достоверность результатов задач прогнозирования и обнаружения грубых ошибок в измерениях подтверждается на тестовых схемах при использовании эталонных срезов измерений.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались на:

Международной конференции Power Tech: Румыния 2009, Норвегия 2011, Франция 2013, Голландия 2015, Великобритания 2017.

Международной конференции EnergyCon: Россия 2010, Хорватия 2014, Бельгия 2016.

Международной конференции PMAPS. Турция 2012.

Международной научно-технической конференции. Электротехника. Болгария 2010.

IFAC CIGRE/CIREN Workshop on control of transmission and distribution smart grid (CTDSG). Чехия 2016.

17th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO). Россия 2018.

Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко “Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики”: Иркутск 2008, Ялта 2010, Иваново 2011, Баку 2012, Иркутск 2013, Санкт-Петербург 2014, Сыктывкар 2016.

Международной конференции «Liberalization and Modernization of Power Systems» (LMPS): Иркутск 2006, 2009, 2012, Санкт-Петербург 2015.

Всероссийской конференции «Энергетика 21 века». Иркутск 2015.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 90 работ, в том числе главы в 5 коллективных монографиях, 14 статей в журналах, включенных в текущий перечень ВАК, и 22 работы в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.

П.5. Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

П.13. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

**Структура и объём работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, семи приложений и заключения. В конце второй, третьей и четвертой глав представлены примеры, подтверждающие корректность применения теории на практике. Диссертация изложена на 324 страницах, включая 7 приложений, 84 рисунка, 36 таблиц, список литературы, состоящий из 242 источников.

#### **Характеристика работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отмечена новизна полученных результатов, представлены структура и краткое содержание диссертации.

**В первой главе** дано определение понятия свободной пропускной способности. Пропускная способность линии электропередачи может быть поделена на две составляющие: зарезервированная и свободная. Зарезервированная часть пропускной способности определяется долгосрочными контрактами на поставку электроэнергии. Свободная составляющая распределяется на краткосрочной основе и называется свободной пропускной способностью (от английского ATC – Available transfer capability). СПС вычисляется как разность между значениями максимально допустимого перетока, вычисленного с учетом критерия по надежности, и перетока в текущем режиме.

Анализ российских и зарубежных методов вычисления МДП контролируемого сечения показал, что в трудах российских ученых не представлены методы вычисления свободной пропускной способности. Для определения МДП российскими учеными разработано большое количество методов, среди них: уравнения предельных режимов, поиск седлоузловой точки обобщенным методом Ньютона, оптимизационный метод, метод непрерывного утяжеления, метод последовательного утяжеления. Методы вычисления МДП и СПС, представленные в иностранной литературе, могут быть поделены на 4 основные группы: метод распределения потоков мощности по коэффициентам; повторяющееся потокораспределение; прогрессивное потокораспределение; оптимальное потокораспределение. Достоинством метода распределения потоков мощности по коэффициентам является достаточно быстрое получение результатов, что очень важно для задач реального времени. Но значения МДП, полученные с помощью метода распределения потоков, оказываются корректными только в случае небольшого изменения режима по сравнению с базовым. При использовании методов повторяющего и прогрессивного потокораспределения вычисляются точные значения МДП, но для их получения требуются промежуточные расчеты установившихся режимов, что является недостатком данных методов. С помощью метода оптимального потокораспределения возможен расчет МДП с учетом наиболее экономичного распределения нагрузки между электростанциями при соблюдении

существующих ограничений. Другие достоинства и возможные недостатки этого метода определяются выбранным методом оптимизации. При использовании уравнений предельных режимов и при поиске седлоузловой точки обобщенным методом Ньютона необходимо хорошее начальное приближение.

При выполнении расчетов по всем перечисленным методам в качестве исходной информации используются параметры установившегося режима, для вычисления которых необходимо определенное время. В данной работе разработан метод, с помощью которого оценивается режим с МДПр в контролируемых линиях по измерительной стохастической информации.

В связи с тем, что в диссертации предлагается метод вычисления режима с МДПр по измерительной информации, даны краткие характеристики систем сбора данных СМПП и SCADA. Главное отличие СМПП от системы SCADA заключается в синхронизации параметров режима с помощью космических спутников (GPS или ГЛОНАСС) и в высокой дискретности регистрации параметров. Приведена система классификации измерительной информации в зависимости от качества измерений, количества и расположения датчиков. Выполнен краткий обзор методов статического и динамического оценивания состояния.

Оценивание состояния – это расчет установившегося режима электроэнергетической системы по данным измерительной информации:

$$\bar{y} = (U_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, \delta_i), \quad (1)$$

где  $U_i$  – модули узловых напряжений;  $P_i, Q_i$  – инъекции активных и реактивных мощностей в узлах;  $P_{ij}, Q_{ij}$  – перетоки мощностей в трансформаторах и линиях,  $\delta_i$  – фазы напряжений в тех узлах схемы, где имеются устройства синхронизированных векторных измерений (PMU).

Все измерения  $\bar{y}$  содержат погрешности, определяемые погрешностью измерительного тракта. В процессе процедуры ОС вычисляются оценки  $\hat{y}$ , значения которых оказываются наиболее близкими к измеренным значениям  $\bar{y}$  в смысле некоторого критерия и удовлетворяют уравнениям электрической цепи. В качестве критерия в задаче ОС обычно используется сумма взвешенных наименьших квадратов отклонений оценок от измерений:

$$J(y) = (\bar{y} - y(x))^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(x)), \quad (2)$$

где  $R_y$  – ковариационная матрица ошибок измерений,  $x = (\delta, U)$  – вектор состояния, по компонентам которого вычисляются все остальные параметры режима. Вектор состояния вычисляется путем минимизации критерия (2).

Вектор измерений  $\bar{y}$  может быть представлен суммой векторов истинных значений измеряемых величин  $y_{ист}$  и случайных ошибок  $\xi_y$ :

$$\bar{y} = y_{ист} + \xi_y.$$

Случайные ошибки измерений распределяются по нормальному закону

$$\xi_y \in N(0, \sigma_y^2),$$

где  $\sigma_y^2$  – дисперсия измерения, которая определяется исходя из характеристики его метрологического тракта. Вектор измерений, поступивших в один момент времени, называется срезом измерений.

**Во второй главе** разработан метод оценивания режима с МДПр, в основе которого лежит идея использования метода взвешенных наименьших квадратов для приведения заведомо недопустимого режима к ближайшему допустимому варьированием соотношений между весовыми коэффициентами измерений. При этом определенное количество оцениваемых параметров режима должно совпадать со значениями измерений с заданной точностью, остальные могут изменяться в пределах регулирования. Весовые коэффициенты выступают в качестве управляемых параметров для достижения желаемого режима. При управлении ЭЭС критерии желаемого режима определяются каждым субъектом в соответствии с их собственными интересами, вследствие чего формируются противоречивые условия для решения задачи оценивания МДР. Согласование интересов всех субъектов происходит за счет выполнения ограничений, о которых заявляет каждый субъект. При оценивании режима с МДПр выполнение ограничений гарантируется подобранными заранее значениями весовых коэффициентов ПИ МДП контролируемых линий. Оценивание МДР выполняется по измерительной информации и по значениям псевдоизмерений МДП с использованием искусственных нейронных сетей.

Каждая линия электропередачи имеет физическое ограничение, которое представляет собой предельную величину мощности, разрешенную для прохождения по рассматриваемой линии в каждый момент времени. Величина ограничения отдельно взятой линии – идеальный предел мощности – отличается от значения МДП линии, которая принадлежит ЭЭС. В работе предлагается метод для вычисления режима с МДПр контролируемых линий, итогом которого является результирующий режим, представляющий собой совокупность скорректированных предельных режимов по условию нагрева или статической устойчивости. Результирующий режим – это установившийся режим (УР) со значениями перетоков активной мощности в контролируемых линиях, которые являются максимально допустимыми в рассматриваемый момент времени функционирования ЭЭС по условию соблюдения пределов, установленных для каждого параметра режима. В диссертации значения идеального предела мощности для линий высокого напряжения и величины термического предела для остальных линий называются псевдоизмерениями максимально допустимых перетоков (ПИ МДП).

Схема получения результирующего установившегося режима показана на рисунке 2. Если представить множество возможных срезов измерений, получаемых по каналам передачи данных системы SCADA и СМПП, в  $n$ -мерном евклидовом пространстве в виде гиперповерхности, то текущий срез измерений может быть определен в любой точке гиперповерхности измерений (например, точка  $Y_0 = \bar{y}$ ,  $n=2$ ). Для вычисления параметров установившегося режима по полученным измерениям решается задача оценивания состояния. С целью регулирования влияния измерения на качество полученного установившегося

режима каждому измерению присваивается вес, значение которого вычисляется в соответствии с определенным правилом. В зависимости от значений весовых коэффициентов измерений определяется множество УР, которое образует

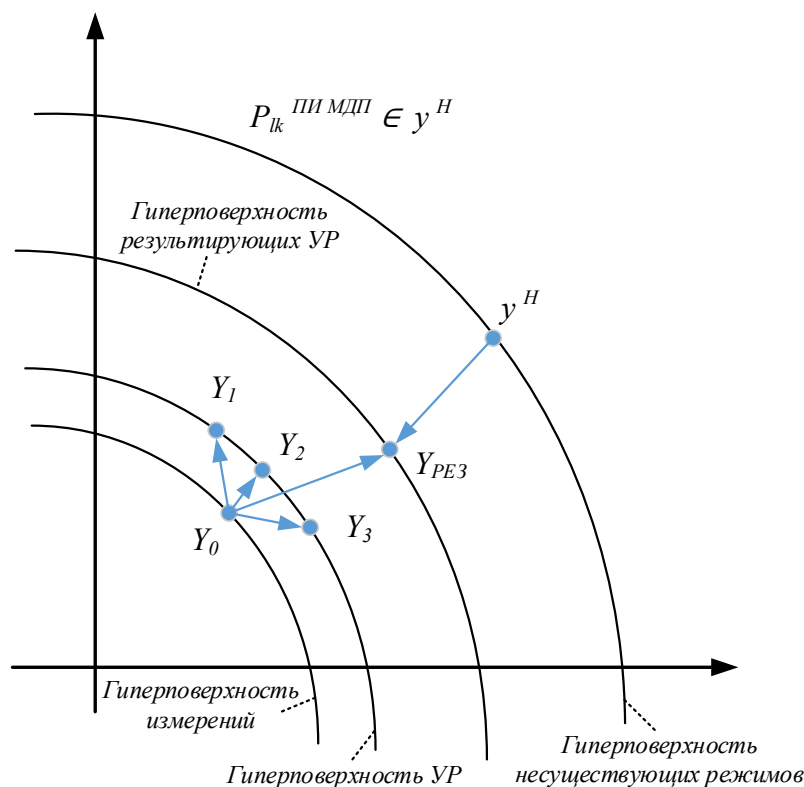


Рис. 2. Схема получения результирующего УР

С помощью предложенного метода текущие значения перетоков в контролируемых линиях подтягиваются к значениям ПИ МДП настолько, насколько это позволяют схемно-режимные ограничения.

Множество точек таких режимов лежат на гиперповерхности результирующих УР (точка  $Y_{PE3}$ ). Определение искомого результирующего режима обеспечивается настройкой весовых коэффициентов ПИ МДП. Задача подбора весовых коэффициентов решается в режиме off-line. При вычислении предельного режима on-line значения весовых коэффициентов измерений ПИ МДП считываются из базы данных. Выбранные весовые коэффициенты, определяемые текущими ограничениями и параметрами режима ЭЭС, смещают результирующий режим в сторону искомого режима, в котором перетоки контролируемых линий оказываются максимально-допустимыми перетоками в данных условиях работы ЭЭС.

При решении задачи оценивания МДР все параметры режима делятся на регулируемые и нерегулируемые. Регулируемыми параметрами являются активные мощности в заданных узлах, модули напряжения и реактивные мощности в узлах, в которых возможно регулирование этих величин. Значения регулируемых параметров режима могут изменяться в определенном диапазоне и их отклонения рассматриваются как управляющие воздействия, применяемые для достижения желаемых результатов. Модули напряжения в узлах считаются

гиперповерхность (точки  $Y_1, Y_2, Y_3$ ). Вычисление УР, соответствующего фактическим эксплуатационным условиям ЭЭС, возможно только при корректной настройке весовых коэффициентов измерений.

ПИ МДП каждой контролируемой линии ( $P_{lk}^{ПИ МДП}$ ) принадлежат несуществующему режиму в реальной ЭЭС. Этот режим представлен точкой  $y^H$  на гиперповерхности несуществующих режимов.

регулируемыми, если возможно их изменение в заданных пределах в процессе оценивания МДР. Нерегулируемые параметры режима должны выдерживаться в пределах точности, с которой измеряется данный параметр. Измерения регулируемых и нерегулируемых параметров режима называются корректируемыми  $\bar{y}^k$  и некорректируемыми  $\bar{y}^n$  измерениями соответственно.

Замена измерений активной мощности в контролируемых линиях на ПИ МДП в исходной информации, рассматривается алгоритмом оценивания МДР как изменение одной или нескольких координат вектора измерений вследствие появления данных с грубой ошибкой. Алгоритм оценивания МДР распределяет эти ошибки на все измерения и ПИ МДП в разных пропорциях, которые определяются весовыми коэффициентами измерений и ПИ МДП. В процессе балансировки результирующего режима происходит поворот векторов напряжений и изменение модулей напряжений в пределах регулировочного диапазона. Значения напряжения и ПИ МДП меняются вследствие приведения в соответствие ПИ МДП в контролируемых линиях с измерениями напряжения в узлах, ограничивающих данную линию, и с измерениями инъекций. При этом допускается изменение инъекции реактивной мощности в регулируемых узлах.

Исходной информацией для формирования данных, по которым вычисляются оценки МДП, является измерительная информация (on-line информация записывается как (1)) и расчетная информация.

Расчетная информация – это ПИ МДП в контролируемых линиях и их весовые коэффициенты. Значения ПИ МДП не зависят от схемно-режимных ситуаций ЭЭС и являются постоянной расчетной информацией. ПИ МДП контролируемых линий вычисляются заранее и хранятся в базе данных. Весовые коэффициенты ПИ МДП могут изменяться при изменении режимной ситуации в ЭЭС и, поэтому определяются как переменная расчетная информация.

Для вычисления ПИ МДП каждая контролируемая линия высокого напряжения представляется простейшей электрической системой, и вычисляется предельно допустимый переток, который может передать данная линия без нарушения статической устойчивости. Также, в качестве ПИ МДП может быть использована величина натуральной мощности. ПИ МДП для коротких линий – это максимально допустимый переток, который может передать линия без нарушения термической стойкости.

Вектор измерений, по которому выполняется оценивание МДР, выглядит следующим образом:

$$\bar{y}^{PEZ} = (\bar{y}^n, \bar{y}^k, P_{lk}^{ПИ\ МДП}) = (\bar{y}, P_{lk}^{ПИ\ МДП}) .$$

В процессе оценивания режима с МДП в контролируемых линиях выполняется поиск допустимых значений перетоков активной мощности, максимально приближенных к заданным недопустимым  $P_{lk}^{ПИ\ МДП}$ .

Для вычисления оценок МДП были выполнены модификации метода нормальных уравнений и метода контрольных уравнений, которые используются при решении задачи оценивания состояния ЭЭС.

Решение поставленной задачи методом нормальных уравнений выполняется путем минимизации целевой функции взвешенных наименьших квадратов отклонений оценок, полученных при использовании всех измерений, от измерений:

$$J(x) = (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x))^T R_{PE3}^{-1} (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x)), \quad (3)$$

где  $R_{PE3}^{-1}$  выглядит следующим образом:

$$R_{PE3}^{-1} = \begin{bmatrix} R_y^{-1} & 0 \\ 0 & R_p^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{МДП}^2 \end{bmatrix},$$

$R_p^{-1}$  – диагональная матрица весовых коэффициентов ПИ МДП,  $\sigma_{МДП}^2$  – дисперсии ПИ МДП в контролируемых линиях.

Для определения оценок результирующего режима решается система нелинейных уравнений, полученная после минимизации (3),

$$H^T R_{PE3}^{-1} (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x)) = 0 \quad (4)$$

итеративным методом. На каждой итерации система линеаризуется в точке решения и решается нормальная система уравнений, в которой вектор поправок вычисляется по формуле

$$\Delta x^l = (H^{T(l)} R_{PE3}^{-1} H^l)^{-1} H^{T(l)} R_{PE3}^{-1} (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x^l)),$$

где  $H^l$  – матрица Якоби, вычисленная на  $l$ -той итерации.

Компоненты вектора состояния вычисляются следующим образом:

$$x^{l+1} = x^l + \Delta x^l.$$

Система уравнений (4) решается до тех пор, пока не будет соблюдаться условие

$$\Delta x^l < \xi_x,$$

или

$$l > l_{\max}, \quad (5)$$

где  $\xi_x$  – заданная точность вычисления компонент вектора состояния,  $l_{\max}$  – максимальное количество итераций. Завершение итерационного процесса по (5) означает, что процесс не сошелся, и должен быть выполнен анализ причины этого. По полученному вектору состояния вычисляются все параметры режима.

Для вычисления оценок результирующего режима методом контрольных уравнений минимизируется критерий отклонений оценок, полученных по базисным измерениям ( $\hat{y}^{PE3}$ ), от измерений

$$J = (\hat{y}^{PE3} - \bar{y}^{PE3})^T R_{PE3}^{-1} (\hat{y}^{PE3} - \bar{y}^{PE3})$$

при ограничениях в виде контрольных уравнений (КУ).

В основу получения системы КУ положена теорема о том, что каждый вектор  $n$ -мерного пространства может быть представлен, и притом единственным образом, в виде линейной комбинации векторов базиса. Любая совокупность  $n$  линейно независимых векторов  $n$ -мерного пространства называется базисом

этого пространства. Линейная комбинация векторов базиса вычисляется методом Краута и имеет вид:

$$\Delta w_k = (\hat{y}_k^{uzb} - y_k^{uzb}(x)) - \sum_{j=1}^{2n-2} d_{kj} (\hat{y}_i^b - y_i^b(x)),$$

где  $y_k^{uzb}$  – избыточное измерение,  $y_i^b$  – базисное измерение; коэффициенты в КУ для базисных измерений ( $d_{kj}$ ) равны коэффициентам, полученным при составлении линейной комбинации, коэффициент для любого избыточного измерения равен единице.

При вычислении режима с МДПР необходимо учитывать, что при изменении напряжения и частоты изменяется мощность нагрузки. Это явление, называемое регулирующим эффектом нагрузки, моделируется с помощью статических характеристик нагрузки (СХН). При решении задачи оценивания МДР нагрузка представляется тремя видами моделей.

Модель измерения. Величины нагрузки и генерации в узлах зависят от напряжения, т.к. вычисляются через перетоки в линиях, отходящих от этих узлов. Перетоки в линиях являются функциями напряжения. Поэтому представление нагрузки моделью измерения в условиях изменения напряжения при решении задачи оценивания МДР не приводит к значительному искажению результатов.

Статические характеристики нагрузки (СХН). Представление нагрузки в виде СХН является лучшим решением в этой ситуации, но получение реальных характеристик не всегда оказывается возможным. Статические характеристики комплексной нагрузки в расчетах установившихся режимов описываются полиномами.

Проводимость. Качественное соответствие с действительной СХН достигается при представлении нагрузки проводимостью.

Для вычисления весовых коэффициентов ПИ МДП решается оптимизационная задача в режиме offline с критерием оптимизации:

$$\Phi_{k(g)} = \sum_1^L (P_{lk}^{ПИ МДП} - P_{lk}(x))^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

с учетом ограничений

$$y_{(i)\min} < y_i(x) < y_{(i)\max}, \quad z_{(i)\min} < z_i(x) < z_{(i)\max}, \quad (7)$$

$$U_r^{\min} \leq U_r \leq U_r^{\max}, \quad (8)$$

$$P_l(x) \leq P_l^{пред}, \quad (9)$$

$$Q_j^{\min} \leq Q_j(x) \leq Q_j^{\max}, \quad (10)$$

где  $lk$  –любая контролируемая линия,  $P_{lk}(x)$  вычисляется в соответствии с (3),  $\Phi_{k(g)}$  – значение критерия на  $k$  –ом срезе с  $g$ –м набором весовых коэффициентов ПИ МДП,  $L$  – количество контролируемых линий;  $i$  – номер некорректируемого измерения,  $z$  – неизменяемые параметры режима,  $U_r$  –модуль напряжения в контрольной точке;  $j, r$ – узлы, в которых регулируется реактивная мощность и напряжение соответственно;  $U_r^{\min}$ ,  $Q_j^{\min}$  и  $U_r^{\max}$ ,  $Q_j^{\max}$  – векторы нижних и верхних

допустимых пределов изменения величин соответственно;  $P_l$  – активная мощность в заданном узле,  $P_l^{пред} = P_l^{раб} + P_l^{рез}$ ;  $P^{раб}$  – располагаемая мощность электростанции за вычетом оборудования, выведенного в ремонт;  $P_l^{рез}$  – оперативный резерв мощности. Смысл критерия (6) заключается в том, чтобы найти значения весовых коэффициентов ПИ МДП ( $R_p^{-1}$  в 3), которые обеспечат минимальную разность между значениями перетоков активной мощности в контролируемых линиях ( $P_{lk}$ ) и  $P_{lk}^{ПИ МДП}$  при соблюдении ограничений (7)–(10) в реальном времени.

Для решения данной задачи сначала разрабатываются  $L$  линеек возможных значений весовых коэффициентов ПИ МДП контролируемых линий. Затем из этих линеек выбираются те значения весовых коэффициентов, которые удовлетворяют критерию оптимизации (6) при выполнении ограничений (7)–(10). Задача решается в два этапа  $N$  раз методом равномерного поиска, где  $N$  – заданное количество наборов весовых коэффициентов.

На первом этапе вычисляется результирующий режим путем минимизации критерия (3) без учета ограничений (7)–(10). На втором этапе проверяются ограничения (7)–(10). В случае выполнения всех ограничений вычисляется критерий (6) и анализируется неравенство:

$$\Phi_{k(g)} < \Phi_{k(g-1)}. \quad (11)$$

Выполнение (11) означает, что при данном наборе весовых коэффициентов результаты оценивания МДР более корректные, чем при использовании предыдущего набора весовых коэффициентов. Поэтому при выполнении (11) весовые коэффициенты сохраняются в базе данных, иначе в базе данных остаются записанные ранее весовые коэффициенты. Если  $g < N$ , то формируется следующий набор весовых коэффициентов и задача решается заново. Если  $g \geq N$ , решение найдено, то есть, найдены весовые коэффициенты ПИ МДП контролируемых линий, которые обеспечат оптимальный результат оценивания МДР в случае функционирования ЭЭС в аналогичных условиях.

Анализ всех условий работы ЭЭС является неподъемной задачей, и для её упрощения предлагается следующий путь. Пространство рассматриваемых состояний ЭЭС разбивается на два множества:  $Y$  – множество срезов измерений,  $Z$  – множество ограничений. Затем размерность каждого множества сокращается за счет выделения похожих векторов в одну группу. Для каждого сочетания уменьшенных множеств  $Y_g$  и  $Z_q$  вычисляются весовые коэффициенты по описанному сценарию. Множества  $Y$  и  $Z$  могут быть сформированы из ретроспективной информации или смоделированы. В данной работе множества  $Y$  и  $Z$  создаются имитационным способом.

Получение корректных величин МДР во всех контролируемых линиях в режиме реального времени возможно только при правильном задании весовых коэффициентов ПИ МДП, значения которых определяются текущими условиями функционирования ЭЭС. Для быстрой идентификации характеристик условий

функционирования ЭЭС используются искусственные нейронные сети (ИНС), обладающие способностью анализировать большой объем информации и выявлять существующие закономерности между данными.

Свободная пропускная способность контролируемой линии  $P_{lk}^{СПС}$  и управляющие воздействия  $V$ , направленные на использование СПС в реальном времени для сценария  $i$ , вычисляются по формулам:

$$P_{lk(i)}^{СПС} = \hat{P}_{lk(i)}^{МДПр} - \hat{P}_{lk} ,$$

$$V_i = \hat{y}_i^{PEЗ} - \hat{y} ,$$

где  $\hat{P}_{lk(i)}^{МДПр}$  – оценка перетока активной мощности в результирующем режиме для сценария  $i$  (МДПр),  $\hat{P}_{lk}$  – оценка перетока активной мощности в текущем режиме,  $\hat{y}_i^{PEЗ}$  – оценки корректируемых параметров результирующего режима для сценария  $i$ ,  $\hat{y}$  – оценки корректируемых параметров текущего режима.

**Третья глава** посвящена вычислению текущих и прогнозных параметров режима с помощью динамического оценивания состояния.

Динамическое оценивание состояния – это расчет установившегося режима по данным измерительной информации с учетом взаимосвязи между изменяющимися во времени параметрами режима. Главным преимуществом ДиОС является его способность прогнозировать параметры режима на короткий период времени, т.е. способность заранее оценивать режим ЭЭС. Кроме того, при использовании ДиОС повышается устойчивость к сбоям и потерям данных в измерительной информации. В диссертации в основу ДиОС положен фильтр Калмана.

В результате анализа способов формирования фильтра Калмана, представленных в научной литературе, для реализации динамического оценивания состояния выбран способ, формирующий расширенный фильтр Калмана. Произведенный выбор обоснован тем, что при построении расширенного фильтра Калмана используется уже вычисленная в процессе оценивания состояния ковариационная матрица ошибок оценивания компонент вектора состояния.

Математическая модель динамической линейной системы с дискретным временем, в которой учитываются случайные возмущения входного воздействия и случайные ошибки измерений, имеет вид

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \xi_{\phi_k} , \quad (12)$$

$$\bar{y}_k = H_k x_k + \xi_{y_k} . \quad (13)$$

В (12), (13)  $x_k$  – вектор состояния системы в  $k$ -ый момент времени,  $\Phi_k$  – матрица перехода из  $k$ -го состояния в  $k+1$ ,  $H_k$  – матрица Якоби,  $\xi_{\phi_k}$  – шум модели,  $\xi_{y_k}$  – ошибки измерений.

После некоторых преобразований алгоритм рекуррентной гауссовско-марковской фильтрации систем (12), (13) записывается следующим образом:

Фильтр

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{k+1} &= \Phi \hat{x}_k, \\ \hat{x}_{k+1} &= P_{k+1} (M_{k+1}^{-1} \tilde{x}_{k+1} + H_{k+1}^T R_y^{-1} y_{k+1}).\end{aligned}$$

Матрица ковариации ошибок прогноза  $M_{k+1}$  и матрица усиления фильтра  $K_k$

$$\begin{aligned}M_{k+1} &= \Phi_k P_k \Phi_k^T + W_k, \\ K_k &= M_k H_k^T (R_y + H_k M_k H_k^T)^{-1}, \\ P_k &= M_k - K_k H_k M_k,\end{aligned}$$

где  $\tilde{x}_{k+1}$ ,  $\hat{x}_{k+1}$  – прогноз и оценка вектора состояния,  $P_k, W_k$  – ковариационные матрицы ошибок оценивания вектора состояния и ошибок модели динамики.

*Целевая функция динамического ОС* представляет собой критерий взвешенных наименьших квадратов суммы отклонений измерений от оценок и отклонений прогнозов компонент вектора состояния от оценок и записывается следующим образом:

$$J(x) = (\bar{y} - y(x))^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(x)) + (\tilde{x} - x)^T M^{-1} (\tilde{x} - x). \quad (14)$$

В соответствии с критерием (14) определяются оценки компонент вектора состояния по измеренным и прогнозным значениям параметров режима. В целевой функции измеренные и прогнозные значения представлены разными слагаемыми. В качестве весовых коэффициентов для прогнозов компонент вектора состояния используется матрица  $M^{-1}$ , обратная ковариационной матрице ошибок прогноза. Наличие  $M^{-1}$  в целевой функции позволяет учитывать историю процесса, что делает алгоритм инерционным и способствует сглаживанию случайных ошибок.

Для определения оценок, наиболее близких к измеренным и прогнозным параметрам режима, минимизируется критерий (14) по вектору состояния. Производная  $\frac{\partial J(x)}{\partial x}$  приравняется нулю и решается система нелинейных уравнений:

$$H_{f(k)}^T R_f^{-1} (\bar{y}_{f(k)} - y_{f(k)}(x)) = 0, \quad (15)$$

где  $H_{f(k)} = \begin{bmatrix} H_k \\ H_{m(k)} \end{bmatrix}$  размерностью  $[(m+2n-1) \times (2n-1)]$  в отличие от матрицы Якоби  $H$ , сформированной в статическом оценивании состояния размерностью  $[m \times (2n-1)]$ ,  $R_f = \begin{bmatrix} R_y & 0 \\ 0 & M_k \end{bmatrix}$  размерностью  $[(m+2n-1) \times (m+2n-1)]$ ,  $\bar{y}_f = \begin{bmatrix} \bar{y} \\ \tilde{x} \end{bmatrix}$  размерностью  $[(m+2n-1) \times 1]$ ,  $n$  – число узлов в схеме,  $m$  – число измерений в схеме.

Вследствие нелинейной зависимости  $y_f(x)$ , задача решается итеративно методом Ньютона. На каждой итерации система (15) линеаризуется и решается

система линейных уравнений, в которой вектор поправок на  $i$ -ой итерации вычисляется по формуле

$$\Delta x_k^i = P_{f(k)}^i H_{f(k)}^{T(i)} R_f^{-1} (\bar{y}_f - y_f(x_k^i))$$

$$P_{f(k)}^i = (H_{f(k)}^{T(i)} R_f^{-1} H_{f(k)}^i)^{-1}$$

Разделение компонент вектора состояния по признаку измеренных и неизмеренных параметров создает расширенный разделенный фильтр Калмана, в котором вычисление поправок к измеренным и неизмеренным переменным является независимым процессом и, следовательно, может быть организовано параллельно (рисунок 3).

При формировании расширенного разделенного фильтра Калмана (только для измеренных (или указанных) компонент вектора состояния) все компоненты вектора состояния делятся на измеренные  $m1$  и неизмеренные  $[2n - m1]$ . Факт отсутствия измерений всех компонент вектора состояния ( $m1$  вместо  $2n$ ) при использовании фильтра Калмана учитывается введением матриц  $H_n$ ,  $H_{not}$ ,  $P_n$ ,  $P_{not}$ . Матрица  $H_n$  имеет размерность  $[m \times m1]$ ,  $H_{not}$  имеет размерность  $[m \times (2n - 1 - m1)]$ ,  $\Delta y = \bar{y} - y(x)$ ,  $\Delta \tilde{x} = \tilde{x} - x$ . Ковариационные матрицы ошибок оценивания компонент вектора состояния  $P_n$  размерностью  $[m1 \times m1]$  и  $P_{not}$  размерностью  $[(2n - 1 - m1) \times (2n - 1 - m1)]$  вычисляются по формулам

$$P_{not(k)} = (H_{not(k)}^T R_y^{-1} H_{not(k)})^{-1},$$

$$P_{n(k)} = (H_{n(k)}^T R_y^{-1} H_{n(k)})^{-1},$$

или при использовании следующих рекуррентных соотношений:

$$P_{n(k)} = M_k - K_k H_{n(k)} M_k,$$

$$K_k = M_k H_{n(k)}^T (R_y + H_{n(k)} M_k H_{n(k)}^T)^{-1},$$

где  $M_k$  имеет размерность  $[m1 \times m1]$ ,  $K_k$  имеет размерность  $[m1 \times m]$ .

Поправки для измеряемых  $\Delta x^H$  и неизмеряемых  $\Delta x^H$  компонент вектора состояния вычисляются по формулам:

$$\Delta x^H = P_n (H_n^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(x)) + M^{-1} (\tilde{x} - x)) \quad (16)$$

$$\Delta x^H = P_{not} H_{not}^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(x)). \quad (17)$$

Направление развития динамической системы может быть спрогнозировано при наличии математической модели этой системы. В данной работе рассматривается процесс прогнозирования параметров режима, выполненный с помощью расширенного фильтра Калмана и

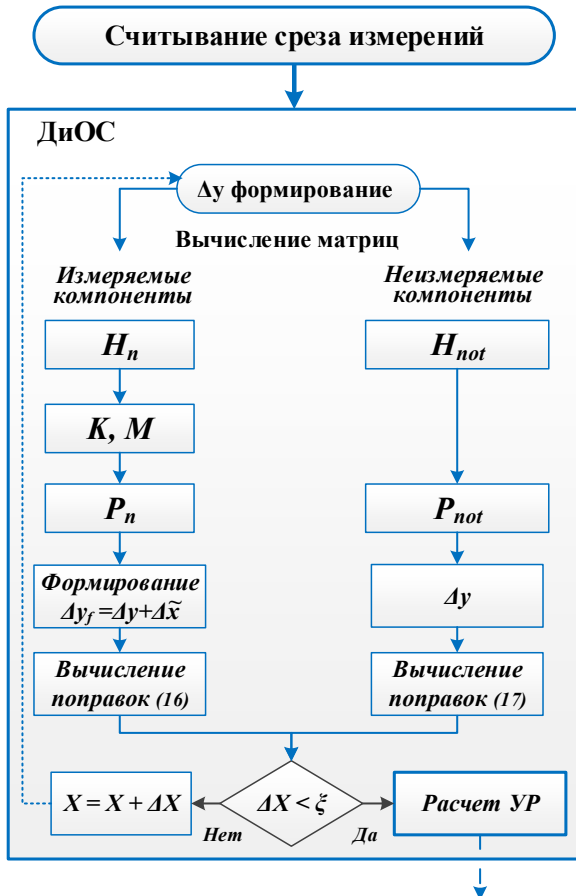


Рис. 3. Укрупненная схема алгоритма ДиОС

расширенного разделенного фильтра Калмана. Расширенный фильтр Калмана используется для прогнозирования  $2n-1$  компонент вектора состояния. При использовании расширенного разделенного фильтра Калмана прогнозируются только измеряемые компоненты вектора состояния, значения неизмеряемых компонент вектора состояния берутся из предыдущего цикла.

Значения поправок измеряемых компонент вектора состояния  $\Delta \tilde{x}_k^H$  вычисляются следующим образом:

$$\Delta \tilde{x}_k^H = P_k M_{k+1}^{-1} (\tilde{x}_k^H - \bar{x}_k^H),$$

где  $\tilde{x}_k^H$  – прогноз измеряемых компонент вектора состояния в срезе  $k$ .

Прогноз измеряемых компонент вектора состояния вычисляется по формуле

$$\tilde{x}_{k+1}^H = \Phi \tilde{x}_k^H + \Delta \tilde{x}_k^H,$$

Прогноз неизмеряемых компонент вектора состояния определяется следующим образом:

$$\tilde{x}_{k+1}^H = \hat{x}_k^H.$$

По прогнозному вектору состояния  $\tilde{x}_{k+1}$  вычисляются все параметры режима.

**В четвертой главе** дана информация об ошибках в измерениях и представлена математическая модель ошибочного измерения. Выполнен обзор современного состояния в области разработки методов обнаружения систематических и грубых ошибок в измерениях и дано обоснование необходимости разработки новых методов в современных условиях функционирования ЭЭС.

Измерительные системы SCADA и СМПР оснащены измерительными приборами разной точности. Характеристика метрологического тракта, по которому измерение поступает в диспетчерский пункт, в задачах ОС и оценивания МДР учитывается дисперсией этого измерения. Корректность результатов указанных задач определяется не самими значениями дисперсий, а соотношением между ними. При одновременном использовании данных системы SCADA и СМПР усложняется задача достоверизации измерений, т.к. методы обнаружения плохих данных к ошибкам в более точных измерениях становятся нечувствительными. В условиях низкой информационной избыточности неправильное или отсутствующее решение задачи достоверизации измерений уменьшает количество достоверной информации, что является недопустимым.

В главе 4 разработан метод достоверизации измерений при наличии данных от обеих измерительных систем. Предложенный метод основан на анализе ретроспективной и прогнозной информации о параметрах режима.

В качестве ретроспективной информации используются измерения или оценки, полученные на предыдущем срезе. Значения прогнозов вычисляются с помощью ДиОС.

Проверка ретроспективной информации осуществляется в соответствии с условиями:

$$|\bar{y}_{i(k)} - \bar{y}_{i(k-1)}| \neq 0, \quad (18)$$

$$|\bar{y}_{i(k)} - \bar{y}_{i(k-1)}| < d_i, \quad (19)$$

$$|\bar{y}_{i(k)} - \hat{y}_{i(k-1)}| < \hat{d}_i. \quad (20)$$

Результаты анализа (19) и (20) в случае изменения режима будут интерпретироваться как наличие ошибки в измерении. Для устранения этого недостатка формируется дополнительное условие, включающее инновацию, которое учитывает прогнозную информацию и дает корректный ответ при изменении режима:

$$|\bar{y}_{i(k)} - \tilde{y}_{i(k)}| < \tilde{d}_i. \quad (21)$$

В (18) – (21)  $\bar{y}_{i(k)}, \bar{y}_{i(k-1)}$  –  $i$ -е измерение на срезах  $k$  и  $k-1$  соответственно,  $\tilde{y}_{i(k)}$  – прогноз  $i$ -го измерения на срезе  $k$ ;  $\hat{y}_{i(k-1)}$  – оценка  $i$ -го измерения на срезе  $k-1$ ;  $d_i, \tilde{d}_i, \hat{d}_i$  – пороги, вычисляемые по формулам:

$d_i = \gamma \sqrt{2\sigma_{yi}^2}$ ,  $\hat{d}_i = \gamma \sqrt{\sigma_{yi}^2 + \sigma_{Yi}^2}$ ,  $\tilde{d}_i = \gamma \sqrt{\sigma_{yi}^2 + \sigma_{Ni}^2}$ ,  $\gamma$  – квантиль распределения  $N(0,1)$  определяется заданной вероятностью ошибки первого рода  $\alpha$ . При  $\gamma = 3$  измерение с вероятностью 0.997 считается ошибочным в случае нарушения порога;  $\sigma_{Ni}^2$  – диагональный элемент ковариационной матрицы  $N = H M H^T$ ,  $\sigma_{Yi}^2$  – диагональный элемент ковариационной матрицы  $Y = H P H^T$ .

Условия (18) – (21) могут обрабатываться параллельно. В результате анализа неравенств формируется трехзначный код ошибки – XYZ, где первый элемент (X) сигнализирует о выполнении – 1 или невыполнении – 0 равенства (18), Y и Z соответственно (19) или (20) и (21). В зависимости от значения трехзначного кода все измерения делятся на достоверные (XYZ==111), ошибочные (XYZ==000) и сомнительные. Для сомнительных измерений код ошибки принимает значение, равное любому сочетанию, когда хотя бы одно из условий (18) – (21) не выполняется (XYZ==110 или 101 или 011 и т.д.).

При решении задачи достоверизации измерений статистическими методами возможны ошибки первого рода – браковка достоверных измерений и ошибки второго рода – пропуск ошибочного измерения. Наиболее неблагоприятная ситуация, с точки зрения качества результатов оценивания состояния, складывается при наличии ошибок второго рода. По ошибочным измерениям вычисляются параметры режима, не соответствующие текущему состоянию ЭЭС, что может быть причиной некорректных действий диспетчеров при управлении режимом. Ошибку первого рода также следует избегать, т.к. исключение достоверного измерения ведет к ухудшению наблюдаемости, а в случае критического измерения – к потере наблюдаемости. В главе проведены исследования, направленные на минимизацию ошибок первого и второго рода. Использование выражения (20) вместо (19) уменьшает количество ошибок первого рода (в случае неизменения режима) и не увеличивает число ошибок второго рода.

*Метод идентификации систематической ошибки* в измерении основан на утверждении, что при отсутствии ошибки в  $j$ -ом измерении значения математических ожиданий измерения  $M(\bar{y}_j)$  и оценки  $M(\hat{y}_j)$  равны друг другу.

Обе выборки имеют нормальное распределение, длина выборки не меньше 30. Для проверки, значимо ли отличаются друг от друга средние значения двух выборок, используется критерий Стьюдента. Уровень значимости t-критерия равен вероятности ошибочно отвергнуть гипотезу о равенстве выборочных средних двух выборок, когда в действительности эта гипотеза имеет место. Формируется нулевая гипотеза о равенстве математических ожиданий двух статистик

$$H_0 : M(\bar{y}_j) = M(\hat{y}_j).$$

В качестве статистического критерия выбирается величина

$$Z_{y(j)} = \frac{\bar{y}_{cp(j)} - \hat{y}_{cp(j)}}{\sqrt{\sigma_{\bar{y}(j)}^2 / (k2 - 1) + \sigma_{\hat{y}(j)}^2 / (k2 - 1)}}, \quad (22)$$

где  $\bar{y}_{cp(j)}$ ,  $\hat{y}_{cp(j)}$  – средние значения измерений и оценок за  $k2$  срезов,  $\sigma_{\bar{y}}^2$ ,  $\sigma_{\hat{y}}^2$  – дисперсии измерений и оценок.

Для проверки гипотезы определяется правая граница двусторонней критической области из таблицы значений функции Лапласа по условию  $\Phi(z_{кр}) = (1 - \alpha)/2$ , где  $\alpha$  – уровень значимости гипотезы.

При

$$Z_{y(j)} < z_{кр}$$

гипотеза не отклоняется, и измерение  $\bar{y}_j$  рассматривается достоверным. В действительности, часто встречается ситуация, когда из-за наличия ошибки в одном измерении отклоняются гипотезы для нескольких достоверных измерений или, наоборот, нулевая гипотеза с заданным уровнем значимости не отклоняется для ошибочного измерения. В главе 4 с целью повышения вероятности идентификации ошибочного измерения вычисляются критерии для всех исследуемых измерений и анализируется вектор статистических критериев, а не каждый критерий отдельно. Под анализом вектора критериев понимается сравнение полученного вектора с эталонными векторами критериев. Эти векторы формируются заранее и записываются в базу данных.

Сходство или различие между векторами устанавливается в зависимости от выбранного метрического расстояния между ними. В диссертации в качестве меры расстояния используется евклидово расстояние – ошибочное измерение идентифицируется в результате вычисления и анализа евклидова расстояния между векторами критериев. Этот подход требует предварительного формирования срезов с ошибочными и достоверными измерениями (создания базы данных эталонных критериев).

**В пятой главе** описана методология мониторинга текущих и прогнозных режимов ЭЭС, режимов с МДПр и СПС, позволяющая рассчитать и, при необходимости, использовать свободную пропускную способность контролируемых линий. Методология представляет собой совокупность мер, которые необходимо предпринять для мониторинга текущих режимов, режимов с МДПр, СПС и использования СПС в реальном времени. Разработанная

методология включает две методики и задачу вычисления управляющих воздействий, направленных на использование СПС в реальном времени.

Под методикой понимается подробное и последовательное описание процедур, которые необходимо выполнить при решении указанной задачи с применением разработанных методов и алгоритмов. Апробация предложенных методик была выполнена с помощью ПВК State+ и ИНС в среде Матлаб.

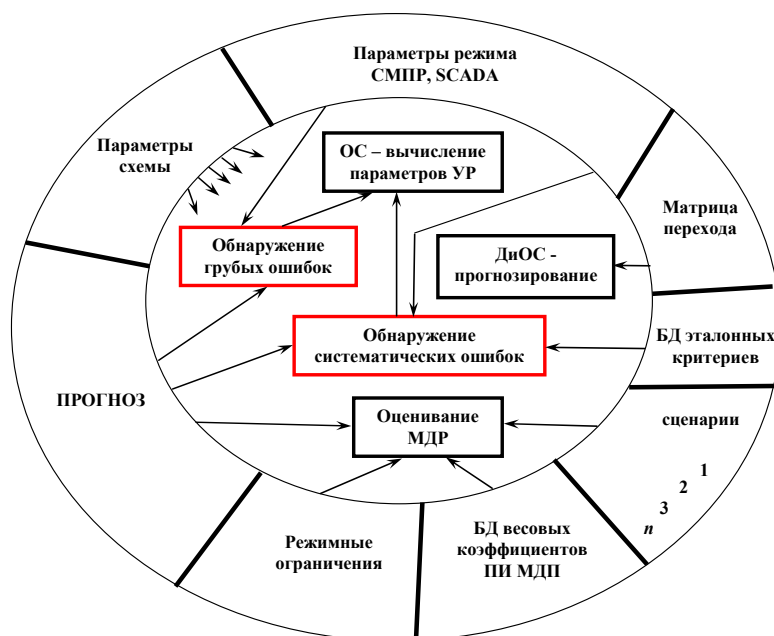


Рис. 4. Исходная информация об ЭЭС и решаемые задачи

ЭЭС является сложным объектом, для управления которым необходимо в режиме реального времени собирать и обрабатывать разнообразную информацию об объекте управления. Для наглядного представления о взаимосвязях между существующей информацией об ЭЭС и задачами мониторинга, эти взаимосвязи показаны в схематичном виде на рисунке 4. Во внутреннем круге записаны задачи.

Укрупненная схема мониторинга режимов ЭЭС, выполняемого в рамках разработанной методологии, показана на рисунке 5. Процесс мониторинга представляет собой выполнение следующих процедур и задач:

1. Считывание измерительной информации.
2. Достоверизация данных.
3. Оценивание состояния.
4. Динамическое оценивание состояния.
5. Оценивание режима с МДПр.
6. Выработка управляющих воздействий.

В разработанной в диссертации методологии не упоминается о процедурах составления расчетной схемы по телесигналам и анализа наблюдаемости. Предполагается, что они выполняются перед процедурой «Достоверизация измерений».

На рисунке 5 слева показана шкала времени, началом которой является время поступления среза номер  $k$  в диспетчерский пункт. Шкала времени помогает представить ориентацию каждой задачи относительно друг друга во времени. Мониторинг режима с МДПр и СПС выполняется по текущим или прогнозным данным. При использовании прогнозных данных проверка качества измерений может быть опущена.

*Мониторинг режима с МДПр и СПС по текущей достоверной информации.*

I. Проверяется качество измерительной информации (достоверизация измерений) в соответствии с методикой 1, которая представляет собой выполнение следующих процедур и задач:

1. Срез измерений поступает в диспетчерский пункт.
2. Проверяется

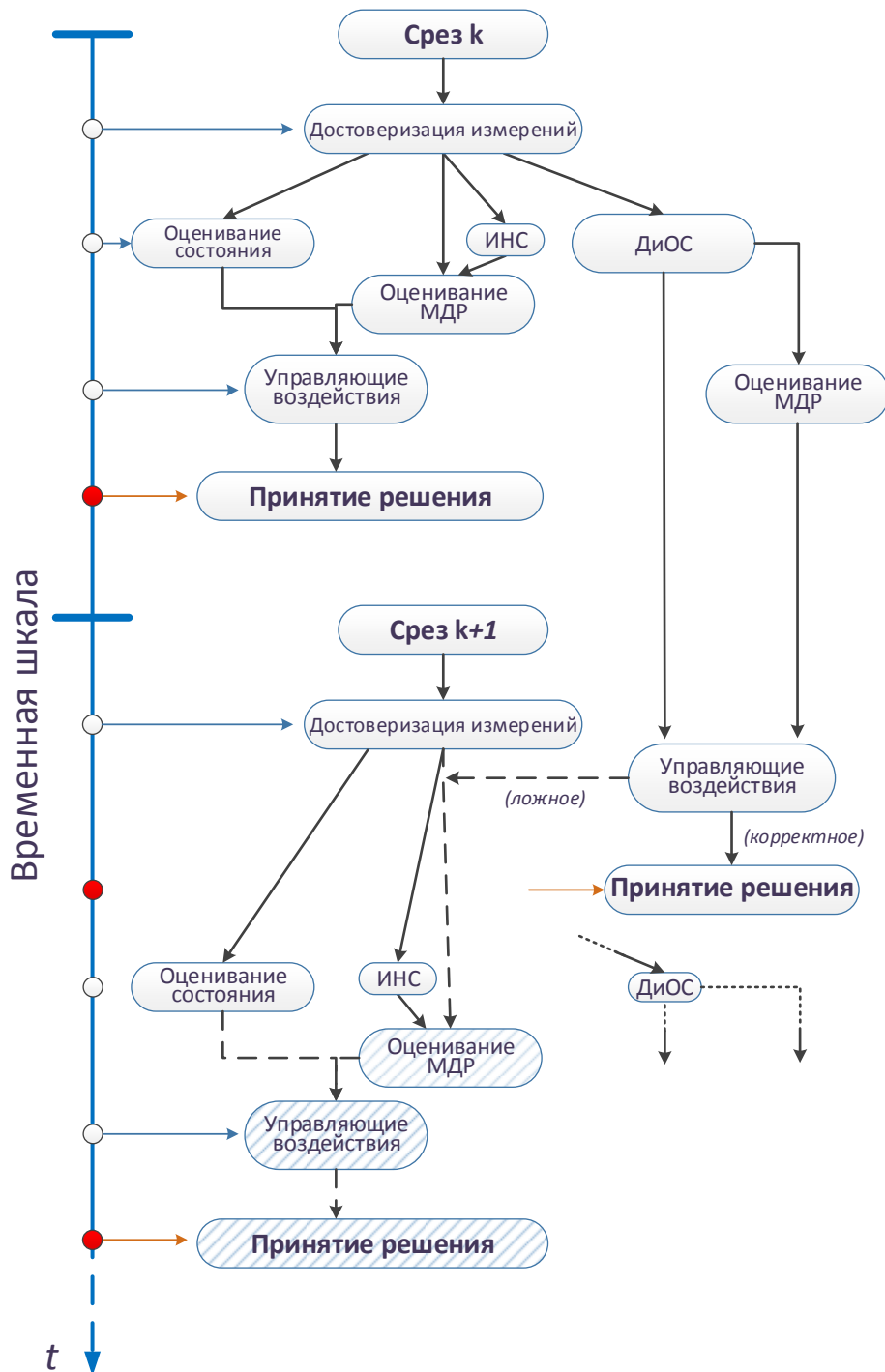


Рис. 5. Укрупненная схема мониторинга режимов ЭЭС, в схематичном виде показывающая ориентацию задач относительно друг друга во времени

качество избыточных измерений (данная задача в работе не описана).

3. Загружается база данных эталонных критериев.

4. Вычисляются векторы критериев для групп измерений с низкой информационной избыточностью (по 22).

5. Решается задача обнаружения и подавления грубых и систематических ошибок в измерениях (достоверизация) для групп с низкой избыточностью и при интеграции данных системы SCADA и СМРР.

После процедуры «Достоверизация измерений» принимается, что исходные данные подготовлены для решения задач:

- оценивание состояния;
- динамическое оценивание состояния;
- определение настроечных параметров с помощью

ИНС (определение весовых коэффициентов ПИ МДП);

•оценивание МДР.

II. Выполняется оценивание режима с МДПр и СПС в соответствии с методикой 2:

1. Загружаются базы данных режимов, ограничений и весовых коэффициентов ПИ МДП.

2. Решаются задачи ОС, ДиОС и распознавания текущего режима на предмет принадлежности его к одному из известных классов с помощью ИНС. Данные задачи могут быть решены параллельно.

3. Выполняется оценивание МДР по измерительной (текущей) информации. Начало решения данной задачи отстаёт от ОС и ДиОС на время отклика обученной ИНС.

III. По результатам ОС и оценивания МДР вычисляются управляющие воздействия, направленные на использование СПС.

*Мониторинг режима с МДПр и СПС по прогнозной информации.*

1. При наличии прогноза (правая линия, рисунок 5) по полученным прогнозным данным решается задача распознавания прогнозного режима с помощью ИНС и затем выполняется оценивание МДР.

2. По результатам ДиОС и оценивания МДР вычисляются управляющие воздействия.

3. Выполняется проверка корректности прогноза. Корректность прогноза устанавливается после решения задачи достоверизации измерений  $k+1$  среза путем сравнительного анализа прогнозных параметров режима с измерениями. Точность прогнозирования вычисляется следующим образом:

$$|\tilde{x} - \bar{x}| < \tilde{d} . \quad (23)$$

При соблюдении условия (23) точность прогноза считается приемлемой для решения поставленной задачи.

4. В случае корректного прогноза могут быть приняты решения, направленные на использование СПС.

Из рисунка 5 видно, что в рамках разработанной методологии управляющие воздействия, направленные на использование СПС, вырабатываются по итогам задач оценивания состояния и оценивания МДР. При наличии прогнозных данных управляющие воздействия могут быть выработаны до решения задачи оценивания состояния.

В диссертационной работе были вычислены оценки МДПр контролируемых линий на нескольких схемах, в том числе в двух контролируемых сечениях одной из реальных ЭЭС (рисунок 6) и на 30-ти узловой тестовой схеме IEEE (рисунок 7). Для расчета на реальной схеме разработано 3 сценария. Сценарий 1: вычисляется режим с МДПр и СПС в сечении 1 (линии 1–5 и 2–3); сценарий 2: вычисляется режим с МДПр и СПС в сечении 2 (линии 11–15 и 12–15); сценарий 3: вычисляется режим с МДПр и СПС в сечениях 1 и 2 при одновременной их загрузке.

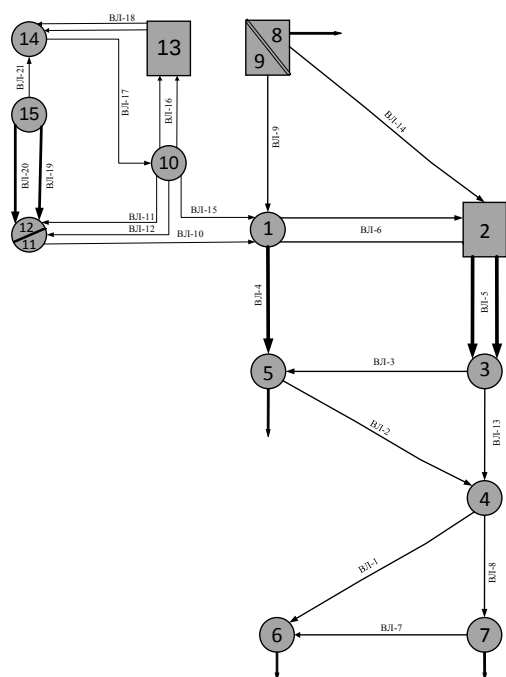


Рис.6. Схема реальной ЭЭС

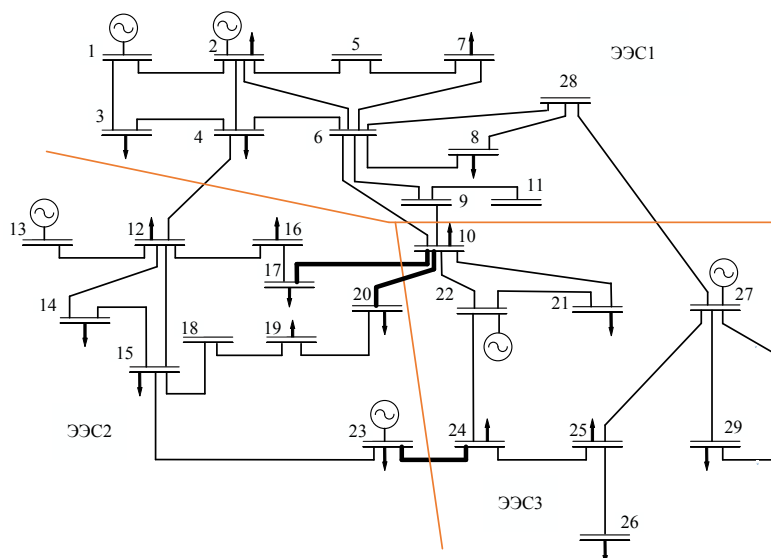


Рис.7. Тестовая 30-ти узловая схема IEEE

В табл.1 сведены результаты расчетов, полученные по трем сценариям. В первой строке показан номер сценария, во второй – номер сечения, которое загружается в соответствии с данным сценарием. В третьей строке представлена величина перетока по контролируемому сечению (текущее значение активной мощности, оценка МДПр, заданное значение МДП). В четвертую строку записаны значения СПС контролируемых сечений. В пятой и шестой строках помещены управляющие воздействия (необходимо выработать указанное количество мощности).

Таблица 1. Результаты расчета по трем сценариям

| Номер сценария                 |            | 1                        | 2                                 | 3                           |                              |
|--------------------------------|------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Номер сечения                  |            | 1                        | 2                                 | одновременно 1 и 2          |                              |
| Переток (МВт)                  | текущий    | 1633                     | 494                               | 1633                        | 494                          |
|                                | результир. | 2092                     | 1488                              | 2073                        | 887                          |
|                                | заданный   | 2040                     | 1400                              | –                           | –                            |
| СПС (МВт)                      |            | 459                      | 994                               | 440                         | 393                          |
| Дополнительная генерация (МВт) |            | $P_2 = 434$              | $P_{15} = 1241$                   | $P_2 = 418$                 | $P_{15} = 483$               |
| УВ (МВАр)                      |            | $Q_2 = 44$<br>$Q_4 = 92$ | $Q_{11} = 103,$<br>$Q_{12} = 115$ | $Q_2 = 57$<br>$Q_{12} = 44$ | $Q_4 = 106$<br>$Q_{11} = 46$ |

Анализ результатов таблицы 1 показывает, что

- значения МДПр, полученные с помощью разработанного метода оценивания МДР, не меньше значений МДП, используемых диспетчерским персоналом.

- МДПр в сечении 1 на 2,6%, в сечении 2 на 6% больше для рассматриваемого момента времени по сравнению с МДП, заданными в методических указаниях. В сценарии 2 было передано 247 МВт из узла 15 в узлы 11, 12 по следующему пути: линии 21, 17, 11, 12.

- при передаче дополнительной активной мощности по сечениям в разные периоды времени, значения МДПр и СПС оказываются больше, чем при передаче мощности по тем же сечениям, но в один и тот же период времени. Это означает, что для корректного определения значений МДПр и СПС информация, касающаяся дополнительной загрузки соседних линий, является обязательной. Данная информация включается в критерий (6), в ограничения (7)–(10) и учитывается при вычислении весовых коэффициентов ПИ МДП.

В одном из приложений описан процесс подбора весовых коэффициентов, обеспечивающих оптимальный результат задачи оценивания МДР в режиме реального времени, на примере одного сценария: увеличение передачи мощности из одной ЭЭС в другую. Оценивание режима с МДПр в двух контролируемых линиях выполнено на 30-ти узловой тестовой схеме IEEE, представляющей собой объединение трех ЭЭС (рисунок 7).

Расчеты режимов выполнялись при увеличении передачи мощности из ЭЭС3 в ЭЭС2 по одному срезу измерений при трех видах ограничений (три случая).

Подбор весовых коэффициентов ПИ МДП осуществляется вручную для трех случаев. Сечение между ЭЭС3 и ЭЭС2 состоит из трех линий 10–17, 10–20, 23–24. При поиске оптимального решения методом последовательного математического программирования, представленного в литературе, было получено, что величина МДП в этом сечении равна 109.5 МВт. В диссертации срез измерений смоделирован на базе данных, используемых при вычислении МДП указанным методом. Каждому измерению задается дисперсия. По полученному срезу измерений с заданными дисперсиями выполняется ОС, результатом которого является текущий УР.

При вычислении режима с максимальным значением мощности в сечении между ЭЭС3 и ЭЭС2 соблюдается условие: обеспечить обязательства перед всеми потребителями, что в задаче оценивания МДР означает следующее:

- разница оценок и измерений параметров режима в нерегулируемых узлах не должна превышать точности, с которой измеряется рассматриваемый параметр режима;

- значения регулируемых параметров режима должны оставаться в пределах регулирования.

Для получения желаемого режима методом оценивания МДР необходимо задать значения ПИ МДП и правильно подобрать весовые коэффициенты. Данная задача решается на предварительном этапе разработанного метода. Контролируемыми линиями назначаются линии контролируемого сечения 10–17, 10–20. В качестве ПИ МДП для коротких линий были использованы значения активной мощности, превышающие предельные по термической стойкости. Регулируемые параметры режима – это генерация в узлах 22, 27, нагрузка в узлах 17, 20, 15, инъекция реактивной мощности в узлах 10, 12.

Весовые коэффициенты вычисляются в соответствии с алгоритмом, описанным в гл.2, где правило (6) записывается следующим образом:

$$(P_{10-20}^{ПМДП} - \hat{P}_{10-20}) + (P_{10-17}^{ПМДП} - \hat{P}_{10-17}) \rightarrow \min$$

с учетом ограничений для случая 1 (первый вид ограничений):

$$\hat{P}_{22} < 200 \text{ MBm} , \quad (24)$$

$$\hat{P}_{27} < 200 \text{ MBm} , \quad (25)$$

$$-22 \text{ MВАp} < \hat{Q}_{10} < 22 \text{ MВАp} , \quad (26)$$

$$-30 \text{ MВАp} < \hat{Q}_{12} < 30 \text{ MВАp} , \quad (27)$$

$$|\hat{P}_{i-j}| < 55 \text{ MBm} . \quad (28)$$

Условие (28) учитывает ограничение передачи по термической стойкости по всем линиям. В процессе оценивания МДР контролируются ограничения, обеспечивающие корректный результат оценивания:

$$\sum P_{\Gamma(\partial on)} = \sum P_{H(\partial on)} , \quad (29)$$

$$|\hat{P}_{i(VP)} - \hat{P}_{i(МДР)}| < 6 \text{ MBm} , \quad (30)$$

$$|\hat{Q}_{i(VP)} - \hat{Q}_{i(МДР)}| < 10 \text{ MВАp} , \quad (31)$$

где  $\sum P_{\Gamma(\partial on)}$  – дополнительная мощность генерации в регулируемых узлах в результирующем режиме,  $\sum P_{H(\partial on)}$  – дополнительная мощность нагрузки в регулируемых узлах в результирующем режиме. Условие (30) означает, что отклонение инъекций активной мощности во всех узлах, кроме регулируемых, в двух режимах не должно превышать 6 МВт. Условие (31) означает, что отклонение инъекций реактивной мощности во всех узлах, кроме регулируемых, в двух режимах не должно превышать 10 МВАp.

Весовые коэффициенты подбирались эмпирическим путем в следующем порядке:

1. Увеличиваются дисперсии контролируемых измерений.
2. Задаются большие дисперсии ПИ МДП.
3. Выполняется оценивание МДР.
4. Поверяются ограничения (24) – (31). Если все ограничения выполняются, то уменьшаются дисперсии ПИ МДП. Переход на 3. При нарушении хотя бы одного условия (24)– (31) активные перетоки в контролируемых линиях, полученные с предыдущим набором весовых коэффициентов, принимаются максимально допустимыми в рассматриваемом режиме с заданными интервалами изменения регулируемых параметров режима.

В процессе подбора дисперсий допускается изменение дисперсий некоторых измерений с целью выдерживания их равными измерениям с заданной точностью.

Случай 2. Ограничения (24)–(27) и (29)–(31) такие же, как в сценарии 1, а ограничения передачи мощности по термической стойкости изменены следующим образом:

$$|\hat{P}_{i-j}| < 85 \text{ MBm} .$$

Данное ограничение изменено для наглядной демонстрации процесса подбора весовых коэффициентов в зависимости от заданных ограничений. С учетом заданных для случая 2 ограничений подбираются весовые коэффициенты.

Случай 3. Ограничения (24) – (26) и (28), (29) такие же, как для случая 1, ограничения (27), (30), (31) изменены следующим образом.

$$\begin{aligned} -16\text{МВАр} < \hat{Q}_{12} < 16\text{МВАр}, \\ |\hat{P}_{i(YP)} - \hat{P}_{i(МДР)}| < 3.5\text{МВт}, \\ |\hat{Q}_{i(YP)} - \hat{Q}_{i(МДР)}| < 8\text{МВАр}. \end{aligned}$$

Выполнение всех условий означает, что в рассматриваемых режимах при заданных ограничениях максимально допустимый переток в контролируемых линиях равен 98.39 МВт (случай 1), 127 МВт (случай 2), 85.88 МВт (случай 3). Весовые коэффициенты, обеспечивающие полученные результаты, записываются в базу данных.

В табл. 2 представлены результаты оценивания МДР, полученные по одному срезу измерений с разными весовыми коэффициентами ПИ МДП. В первом столбце показан номер случая. Во втором столбце записана суммарная мощности передачи в двух линиях (в скобках указана мощность передачи в сечении). В третьем и четвертом столбцах представлены оценки двух регулируемых параметров режима, в пятом столбце записана величина предельной мощности передачи по всем линиям, в последнем столбце дана причина наступления предельно допустимого режима.

Таблица 2. Результаты оценивания МДР для трех случаев

| Номер случая | Оценка перетока (МВт)                                                                      | Оценки реактивной мощности в регулируемых узлах (МВАр) |                | Ограничение                               | Параметр режима, оценка которого имеет предельное значение |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|              | $\hat{P}_{10-20} + \hat{P}_{10-17}$<br>( $\hat{P}_{10-20} + \hat{P}_{10-17} + P_{23-24}$ ) | $\hat{Q}_{10}$                                         | $\hat{Q}_{12}$ | $P_{\max}$ по термической стойкости (МВт) |                                                            |
| 1            | 98.39 (106)                                                                                | -5.8                                                   | -22            | 55                                        | $\hat{P}_{21-22}$                                          |
| 2            | 127 (133)                                                                                  | 0.39                                                   | -29.39         | 85                                        | $\hat{Q}_{12}$                                             |
| 3            | 85.88 (91.88)                                                                              | -3                                                     | -15            | 55                                        | $\hat{Q}_{12}$                                             |
| [литер]      | 109                                                                                        |                                                        |                |                                           | линия 25-27, $U_1$                                         |

Анализ результатов табл. 2 показывает, что в одном и том же режиме, но при разных ограничениях значения максимального допустимого перетока разные. Сравнение полученных результатов с литературными данными показывает, что наибольшая разница оказывается со случаем номер 2, в котором был увеличен предел по термической стойкости.

### Заключение

1. Проанализированы российские и зарубежные методы вычисления максимально допустимых перетоков контролируемых линий. Методы

определения МДП в контролируемых сечениях, разработанные российскими учеными, в основном посвящены вычислению предельных по статической устойчивости режимов. Методы определения свободной пропускной способности линий в российской научной литературе не представлены. В методах вычисления МДП, полной пропускной способности и свободной пропускной способности линий, разработанных зарубежными и российскими учеными, в качестве исходной информации используется детерминистическая информация (параметры установившегося режима). В диссертации дано обоснование необходимости разработки метода вычисления режима с МДПр, который использует в качестве исходной информации стохастическую информацию.

Проанализированы различные способы формирования фильтра Калмана. Выполнен обзор современного состояния в области разработки методов обнаружения систематических и грубых ошибок в измерениях. Дано обоснование необходимости разработки новых методов.

2. Разработан метод вычисления режима с МДПр контролируемых линий по измерительной информации и по значениям ПИ МДП. Задача вычисления режима с МДПр ставится как задача оценивания МДР и решается по измерительной стохастической информации и по значениям ПИ МДП, которые определяются заранее. Такая постановка дает возможность учитывать неопределенности условий функционирования ЭЭС и нестационарное поведение субъектов ЭЭС. Оценивание МДР выполняется одновременно с оцениванием состояния ЭЭС. Корректность результатов оценивания МДР подтверждается результатами вычисления режима с МДПр на тестовых схемах в разных условиях работы ЭЭС. Разность между вычисленными и заданными значениями МДП находится в пределах точности измерений активной мощности.

3. Модифицированы два метода, используемые для решения задачи оценивания состояния ЭЭС: метод нормальных уравнений и метод контрольных уравнений. Модификация заключается в обработке не только измерительной, но и рассчитанной заранее информации. Вследствие добавления расчетной информации, результирующий режим, полученный при решении задачи оценивания МДР, отличается от текущего. Точность расчета режима с МДПр оказывается одинаковой при использовании обоих методов. Алгоритм формирования контрольных уравнений и алгоритм оценивания МДР представлены подробно.

4. Исследованы результаты оценивания МДР, полученные при вычислении результирующего режима с учетом и без учета регулирующего эффекта нагрузки. Регулирующий эффект моделировался представлением нагрузки в виде проводимости и СХН. Значение проводимости нагрузки вычисляется по измеренным параметрам режима, а статические характеристики описываются полиномами. При оценивании МДР допускается представление нагрузки моделью измерения, т.к. величина потребляемой мощности в узле является функцией напряжения. Наиболее точные результаты получаются при моделировании нагрузки статическими характеристиками в случае наличия необходимых СХН.

5. Разработан метод вычисления весовых коэффициентов ПИ МДП, в основе которого лежит метод равномерного поиска. Системные ограничения, которые учитываются при вычислении весовых коэффициентов ПИ МДП, представлены в виде неравенств.

6. Дано описание ИНС Кохонена, используемой в диссертации для распознавания характеристик условий работы ЭЭС. С этой целью создано окружение двух ИНС и выполнено их обучение классификации измерений и ограничений. Ошибка обучения не превышает 1.6%. Результатом обучения ИНС является уменьшение размерности множеств измерений и ограничений. В режиме реального времени распознавание характеристик условий работы ЭЭС выполняется с помощью двух обученных ИНС, ответы которых используются для быстрой настройки параметров программы оценивания МДР.

7. Оперативное прогнозирование параметров режима выполняется с помощью динамического оценивания состояния, в основу которого положен фильтр Калмана. Из множества вариантов реализации фильтров в диссертации выбран расширенный фильтр Калмана. Произведенный выбор обоснован тем, что при построении указанного фильтра используется уже вычисленная в процессе оценивания состояния ковариационная матрица ошибок оценивания компонент вектора состояния. Предложен новый подход к формированию фильтра Калмана в условиях наличия измерений модуля и фазы напряжения не во всех узлах текущей расчетной схемы. При использовании данного подхода процесс вычисления компонент вектора состояния может быть организован параллельно. С практической точки зрения применение ДиОС, в основу которого положен расширенный разделенный фильтр Калмана, наиболее рационально в тех случаях, когда отсутствует необходимость учитывать историю процесса всех параметров режима расчетной схемы. В этом случае предложенный алгоритм представляет собой выполнение динамического оценивания состояния в заранее определенной части расчетной схемы и статического оценивания состояния в оставшейся части схемы. В качестве исходных приближений неизмеряемых компонент вектора состояния могут быть использованы значения оценок, вычисленные по предыдущему срезу.

8. С целью улучшения результатов оценивания состояния и оценивания МДР, разработаны методы обнаружения грубых и систематических ошибок в измерениях в условиях низкой информационной избыточности и в измерениях PMU при интеграции данных системы SCADA и СМПП в указанных задачах.

Использование предложенного метода для обнаружения грубых ошибок позволило уменьшить количество ошибок I-го рода, в том числе и для критических измерений компонент вектора состояния, что является особенно важным для обеспечения наблюдаемости. Число ошибок I-го рода сокращается при применении ДиОС, обладающего свойством максимально отфильтровывать случайные ошибки в измерениях компонент вектора состояния. На примере 7-ми и 33-х узловых схемах было установлено, что метод работает с точностью 100% при ошибках с кратностью ( $n$ ) больше 6. При  $n < 6$  обнаружение ошибок выполняется с вероятностью около 70%. Анализ результатов обнаружения

систематических ошибок показал, что предложенный метод распознает ошибку в измерении PMU, во всех режимах с вероятностью 97 %.

9. Разработан программно-вычислительный комплекс State+, позволяющий формировать приближенные к условиям эксплуатации срезы измерений, необходимые для отладки новых методов и алгоритмов, повышающих эффективность управления ЭЭС. Возможность создания псевдо реальных срезов измерений является важной функцией ПВК по причине недоступности реальной информации о параметрах режима. Все разработанные в диссертации методы и алгоритмы реализованы в ПВК State+.

10. Разработана методология мониторинга текущих параметров режима, режима с МДПр и СПС, в рамках которой представлены две методики и задача вычисления СПС. Методика 1 предназначена для повышения качества измерительной информации. Методика 2 предназначена для оценивания текущего режима, оценивания режима с МДПр и СПС. В соответствии с методологией вычисляются управляющие воздействия, направленные на использование СПС в контролируемых линиях по данным, полученным при решении задач оценивания состояния ЭЭС и оценивания МДР. Наличие прогнозных параметров режима позволяет вычислить величины СПС в контролируемых линиях и выработать решение по управлению режимами сложных электроэнергетических систем до выполнения задачи оценивания состояния.

Методология объединяет все этапы вычисления режима с МДПр и СПС, начиная с получения и обработки информации об ЭЭС и заканчивая вычислением УВ, которые необходимо предпринять для максимального использования пропускной способности заданных линий конкретной ЭЭС.

Постоянное отслеживание значений СПС помогает при принятии решений о дальнейшем развитии ЭЭС. Малые значения СПС в течение длительного времени означают, что сеть работает на пределе своих возможностей. Большие значения СПС в течение длительного времени дают информацию о недоиспользовании ресурсов ЭЭС.

#### **Публикации по диссертации**

#### **Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК**

1. Глазунова А.М., Колосок И.Н. Организация обучающего задачника для нейросетевого прогнозирования электрической нагрузки // Вестник ИрГТУ, №4, 2003. С. 28-32.
2. Глазунова А.М., Колосок И. Н. , Коркина Е. С. Исследование возможности применения дополнительных уравнений при использовании PMU для достоверизации измерительной информации ЭЭС // Вестник ИрГТУ, №4, 2007. С. 89–93.
3. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы. //Электричество, №6, 2009, С. 2–10.
4. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Курбацкий В.Г., Сидоров Д.Н., Спиряев В.А., Томин Н.В. Методы прогнозирования параметров режима

электроэнергетических систем для целей мониторинга и управления // *Электричество*, №5, 2011. С.17-26.

5. Глазунова А.М., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Критерии и методы расстановки РМУ при оценивании состояния электроэнергетической системы и расчете установившегося режима // *Электричество*, №9, 2010. С.16–24.

6. Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Экспресс-оценка загруженности линий электропередачи в режиме реального времени // *Вестник ИрГТУ*, №8, 2012. С. 136–143.

7. Глазунова А.М. Применение метода оценивания состояния для вычисления предельных режимов электроэнергетической системы // *Электричество*, №10, 2013. С. 23–29.

8. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Мониторинг фактической пропускной способности контролируемых линий ЭЭС // *Электричество*, №12, 2013. С. 21–29.

9. Глазунова А.М. Метод обнаружения систематических ошибок в измерениях электроэнергетической системы // *Электричество*, №5, 2015. С.15–22.

10. Глазунова А.М., Съёмщиков Е.С. Метод достоверизации синхронизированных векторных измерений при оценивании состояния электроэнергетических систем // *Вестник ИрГТУ*, №.11, 2015. С.153–158.

11. Глазунова А.М. Ускорение решения задачи динамического оценивания состояния на базе фильтра Калмана // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*, № 75(2), 2016. С.15–26.

12. Глазунова А.М., Колосок И.Н., Съёмщиков Е.С. Обнаружение ошибочных данных в измерительной информации методами динамического оценивания состояния при управлении интеллектуальной энергосистемой // *Электричество*, №2, 2017. С.18–27.

13. Колосок И.Н., Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния // *Вестник ИрГТУ*, №3, 2018. С.145–153.

14. Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Оценивание максимально допустимого перетока контролируемого сечения электроэнергетической системы // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*, № 1 (78) 2018. С. 23–34.

#### **Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus**

1. Gamm A.Z., Glazunova A.M., Kolosok I.N. Test Equations For Validation Of Critical Measurements And Critical Sets At Power System State Estimation // *The International Conference "PowerTech"*. S.Petersburg, Russia. 2005, 27–30 June.

2. Gamm A.Z., Grishin Yr.A., Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina E.C. New EPS state estimation algorithms based on the technique of test equations and PMU measurements // *The International Conference "PowerTech"*. Lausanne, Switzerland. 2007, 1–5 July.

3. Gamm A.Z., Kolosok I.N., Glazunova A.M. An Influence of a Set of Basic Measurements on the Quality of EPS State Estimation // *The International Conference DRPT*. Nanjing, China. 2008, 6-9 April.

4. Gamm A.Z., Kolosok I.N., Glazunova A.M., Korkina E.S. PMU placement criteria for EPS state estimation // The International Conference DRPT. Nanjing, China. 2008, 6-9 April.
5. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina E.C. PMU placement on the basis of SCADA measurements for fast load flow calculation in electric power systems // The International Conference "PowerTech". Bucuresti, Romania. 2009, 28 June – 2 July.
6. Voropai N.I., Glazunova A.M., Kurbatsky V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V. Operating Conditions Forecasting for Monitoring and Control of Electric Power Systems // The IEEE ISGT Europe 2010 Conference. Gothenburg, Sweden. 2010, 11–13 October.
7. Glazunova A.M. Forecasting Power System State Variables on the Basis of Dynamic State Estimation and Artificial Neural Networks // IEEE region 8. International conference on computational technologies in electrical and electronics engineering / SIBIRCON-2010. Irkutsk, Russia. 2010, 11–15 July. Vol. 2. pp. 470-475.
8. Glazunova A.M., Kolosok I.N. Analysis of the results of on-line electric power system state estimation // The International Conference "PowerTech". Trondheim, Norway. 2011, 19–23 June.
9. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina E.S. Monitoring of EPS Operation by the State Estimation Methods // The International Conference “Innovative Smart Grid Technologies” (ISGT Europe-2011). Manchester, UK. 2011, 5-7 December.
10. Voropai N., Kolosok I., Korkina E., Glazunova A., Rehtanz C., Häger U. Coordinated intelligent operation and emergency control of electric power systems // In: Innovation in Power, Control, and Optimization: Emerging Energy Technologies. Springer, 2011. pp. 1–56.
11. Voropai N.I., Gamm A.Z., Glazunova A.M., Etingov P.V., Kolosok I.N., Korkina E. S., Kurbatsky V. G., Sidorov D. N., Spiryaev V. A., Tomin N. V., Zaika R.A., Bat-Undraal B. Application of meta-heuristic optimization algorithms in electric power systems // In: Meta-Heuristics Optimization Algorithms in Engineering, Business, Economics, and Finance. 2012. pp. 564–615.
12. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Results of Modified State Estimation for Improvement of Interconnected Power System Control Efficiency // The International Conference “PowerTech”. Grenoble, France. 2013, 16–20 June.
13. Görner K., Rehtanz C., Kolosok I.N., Glazunova A.M., Brinkis K., Kochukov O. Coordinated monitoring of large scale interconnected power systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Vancouver, Canada. 2013, 21–25 July.
14. Voropai N.I., Efimov D.N., Kolosok I.N., Glazunova A.M., Tomin N.V., Panasetsky D.A., Korkina E.C., Osak A.B. Smart technologies in emergency control of Russia's unified energy system // IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, 2013. pp. 1732–1740.
15. Kolosok I.N., Korkina E.S., Glazunova A.M. PMU Placement Based on Heuristic Methods, when Solving the Problem of EPS State Estimation // International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJE OE), No. 3, 2014. pp. 28–64.

16. Glazunova A.M., Kolosok I.N. Bad Data Detection by Dynamic State Estimation for the Case of Low Redundancy of Measurements // The International Conference "EnergyCon". Dubrovnik, Croatia. 2014, 12-16 May.
17. Glazunova A., Aksaeva E. Actions Generation for Online Power System Control // The International Conference "PowerTech". Eindhoven, Holland. 2015, 27 June– 3 July.
18. Glazunova A.M., Aksaeva E.C., Semshchikov E.C. Forecasting of Available Transfer Capability in Intersystem Transmission Lines // The International Conference "EnergyCon". Leuven, Belgium. 2016, 4–8 April.
19. Glazunova A.M., Aksaeva E.C., Semshchikov E.C. Forecasting the Total Transfer Capability of Intersystem Lines for On-line Control of Electric Power System Operation // Workshop on control of transmission and distribution smart grid – GTDSG. Prague, Czech Republic. 2016, 11–14 October. pp. 455–460.
20. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Available transfer capability determination on the basis of a trade-off approach // The International Conference "PowerTech". Manchester, UK. 2017, 18–22 June.
21. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Semshchikov S.E. Bad data detection by the dynamic EPS state estimation methods // The 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA. Stara Lesna, Slovakia. 2017, 12–14 September. pp. 534–538.
22. Nikolai Voropai, Dmitry Efimov, Irina Kolosok, Victor Kurbatsky, Anna Glazunova, Elena Korkina, Nikita Tomin, Daniil Panasetsky. Intelligent control and protection in the Russian electric power system // In: Application of smart grid technologies. Case studies in saving electricity in different parts of the world. Elsevier, 2018. pp. 60–140.

#### **В прочих изданиях**

1. Glazunova A.M., Kolosok I.N., Korkina. The methods of distributed and dynamic state estimation for monitoring of power system operating conditions // Electro energetics technics mechanics+control, No. 2, 2011 Baki. pp. 45–54.
2. Под редакцией Воропая Н. И. Теоретические основы, методы и модели управления большими электроэнергетическими системами. Москва: ПАО "ФСК ЕЭС", 2015. С. 188.
3. Глазунова А.М., Аксаева Е.С., Съёмщиков Е.С. Мониторинг максисмально допустимых перетоков заданных сечений для целей оперативного управления электроэнергетической системой // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы надежности систем энергетики. Сыктывкар. 2016. №. 65. С. 301–310.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130  
Заказ № 31, тираж 140 экз.