

На правах рукописи



Аксаева Елена Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ
ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2018

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

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Колосок Ирина Николаевна

Официальные оппоненты: **Чемборисова Наиля Шавкатовна**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", кафедра «Электрические системы», профессор

Суслов Константин Витальевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Электроснабжения и электротехники», профессор

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

Защита состоится 27 ноября 2018 в 9:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданном на базе Института 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: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2018-1/>

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 _____ 2018 года.

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

А.М. Клер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Управление электрическими режимами работы объектов электроэнергетики осуществляет АО «Системный Оператор» (СО), обеспечивая надежную и эффективную работу Единой энергетической системы (ЕЭС) России. В составе ЕЭС России работают семь Объединённых энергосистем (ОЭС), образованные 49-ю региональными энергосистемами. Все энергосистемы соединены межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 220–500 кВ и выше и работают в синхронном режиме.

Чтобы обеспечить надёжный и эффективный процесс передачи мощности по электрическим сетям, отслеживаются перетоки активной мощности в линиях контролируемых сечений. В сечениях электрической сети определяются величины максимально допустимых перетоков активной мощности (МДП), соблюдение которых должно обеспечиваться на всех этапах планирования и управления электрическим режимом. Расчет максимально допустимых перетоков является трудоемкой задачей, так как необходимо учесть множество факторов (топология прилегающей сети, состав и нагрузка генерирующего оборудования, состояние и настройка устройств противоаварийной автоматики, температура окружающей среды и др.), влияющих на величину допустимых перетоков. Для того, чтобы учесть все факторы, необходимо выполнять расчет максимально допустимых перетоков в режиме реального времени в темпе изменения условий работы энергосистем.

В настоящее время в условиях широкомасштабного внедрения информационных технологий стало возможным определение МДП в цикле обработки телеметрии. Точное и соответствующее текущей режимной ситуации в энергосистеме определение МДП позволит максимально полно использовать пропускную способность существующих линий электропередачи при выполнении требований нормативной документации к надежности электроснабжения потребителей.

В диспетчерских центрах СО ЕЭС в цикле расчета МДП выполняется множество промежуточных расчетов (расчет установившегося режима (УР), утяжеление режима, расчет МДП в соответствии с методическими указаниями по устойчивости ЭЭС). В условиях дефицита времени и требуемой эффективности оперативного управления такой подход к расчету величины МДП является достаточно сложной задачей, требующей разработки нового подхода.

Для уменьшения объемов расчетов в диссертационной работе предлагается выполнять расчет МДП непосредственно по текущей телеметрической информации на основе методов оценивания состояния (ОС).

Актуальность проводимого исследования обусловлена необходимостью разработки нового быстродействующего метода расчета максимально допустимого перетока активной мощности в линиях контролируемых сечений ЭЭС, который позволяет с требуемой точностью в темпе технологического процесса рассчитывать величину МДП для любого существующего электрического режима.

Перетоки, полученные на последнем шаге вычисления при ненарушенных системных ограничениях, являются максимально возможными в заданных условиях работы ЭЭС. В диссертации эти величины называются максимально допустимыми перетоками в рассматриваемом режиме – текущие МДП (ТМДП). ТМДП рассчитывается с учетом статической устойчивости, термической стойкости, устойчивости по напряжению. Разработанный метод применяется для контролируемых линий, в которых МДП определяется статической устойчивостью, поэтому критерий динамической устойчивости не рассматривается.

Степень изученности проблемы. Проблема определения максимально допустимого перетока решается в работах Аюева Б.И., Давыдова В.В., Данилина А.В., Ерохина П.М., Жукова А.В., Закорюкина В.П., Паздерина А.В., Крюкова А.В., Капустина С.Д., Полякова И.А., Тарасова В.И., Фишова А.Г., Чемборисовой Н.Ш., Чугунова С.О., Шабалина Г.С., Юферева С.В. и др.

В ИСЭМ СО РАН этой задачей занимались Войтов О.Н., Крумм Л.А., Охорзин Ю.А, Осак А.Б., Ушаков Е.И.

Большой вклад в развитие методов решения задачи ОС внесли Бартоломей П.И., Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Голуб И.И., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Конторович А.М., Прихно В.Л., Хохлов М.В., Челпанов А.В. Хорошо известны труды таких зарубежных авторов, как А. Abur, К.А. Clements, J.F. Dopazo, R. Larson, А. Monticelli, L. Mili, F.C. Schweppe и др.

Обзор работ, проведенный автором, показывает, что вопросам определения МДП активной мощности уделено большое внимание в работах отечественных и зарубежных ученых. В то же время недостаточно изученной является очень важная проблема, связанная с расчетом МДП в режиме реального времени непосредственно по оперативной информации.

Целью работы является разработка методического подхода к определению ТМДП в линиях контролируемых сечений по информации, поступающей от SCADA системы (сокр. от англ. *Supervisory Control And Data Acquisition* — система диспетчерского контроля и сбора данных реального времени) и СМПП (Система мониторинга переходных режимов).

В соответствии с целью работы **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Выполнен анализ существующих методов вычисления МДП. Дано обоснование необходимости совершенствования традиционных методов определения МДП. Проанализирован зарубежный опыт по структурированию определений пропускной способности линий.

2. Разработан метод оценивания ТМДП в контролируемых линиях электроэнергетической системы на базе методов оценивания состояния для решения следующих задач:

- мониторинга ТМДП;
- определения запасов пропускной способности контролируемых линий (свободной пропускной способности) для возможности передачи дополнительной мощности потребителю;

– формирования управляющих воздействий, направленных на изменение регулируемых параметров для возможности передачи дополнительной мощности.

3. Разработан нейросетевой метод настройки параметров программы оценивания ТМДП для мониторинга пропускной способности линий, включающий выбор типа ИНС, формирование обучающей выборки и обучение искусственных нейронных сетей.

4. Разработан методический подход для определения ТМДП в режиме реального времени, включающий метод оценивания ТМДП по данным телеметрической информации и нейросетевой метод для настройки весовых коэффициентов псевдоизмерений (ПИ) МДП.

Объект исследования. Режимы сложных объединенных ЭЭС с контролируемыми сечениями.

Предмет исследования. Методы расчета установившихся режимов, режимные параметры электроэнергетических систем.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы расчета установившихся режимов и оценивания состояния ЭЭС, методы математической статистики и теории вероятности, методы решения нелинейных систем уравнений. В работе использовались методы математического моделирования и современные пакеты нейронных сетей. Для реализации метода оценивания ТМДП применялся ПВК «State+», разработанный при участии автора. Для оценки эффективности метода оценивания ТМДП применялись программы «Project» и «Mat Power».

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны метод и алгоритм оценивания ТМДП по информации, поступающей от системы SCADA и СМПП.

2. Разработаны нейросетевой метод и алгоритм настройки параметров программы оценивания ТМДП для мониторинга пропускной способности линий.

3. Разработан методический подход к определению ТМДП на базе методов ОС, включающий метод оценивания ТМДП и нейросетевой метод подбора весовых коэффициентов ПИ МДП.

Практическая значимость результатов работы. Использование предложенных методов и алгоритмов повышает качество мониторинга МДП в режиме реального времени, позволяет увеличить степень использования пропускной способности сети, что повысит экономическую эффективность ЭЭС и снизит стоимость электроэнергии. Разработанные программные средства могут быть использованы в качестве компонентов советчика диспетчера при управлении ЭЭС.

Личный вклад автора. Автор участвовал во всех этапах создания разработанного методического подхода. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит формализация поставленных задач, моделирование исходных данных, составление обучающих задачек, обучение нейронных сетей, анализ качества обучения нейронных сетей, интерпретация результатов, настройка и отладка программы, реализующей метод оценивания ТМДП, подготовка основных

публикаций по выполненной работе. Автор лично участвовал в научных экспериментах и апробации результатов исследования.

Автор благодарен Глазуновой Анне Михайловне за идею и консультации по методу оценивания ТМДП.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа существующих методов расчёта МДП в контролируемых сечениях ЭЭС в отечественной и зарубежной практике, определяющие актуальность выполненных в работе исследований.

2. Разработка метода оценивания ТМДП в линиях контролируемых сечений ЭЭС по данным измерений.

3. Нейросетевой подход к определению весовых коэффициентов ПИ МДП.

4. Методический подход для расчета ТМДП на базе методов ОС, включающий метод оценивания ТМДП и нейросетевой метод подбора весовых коэффициентов ПИ МДП.

5. Результаты верификации разработанного метода оценивания ТМДП при расчетах тестовых и реальных схем.

Апробация результатов работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на: 40–42, 44–47 конференциях-конкурсах научной молодежи «Системные исследования в энергетике» (Иркутск, 2010–2012, 2014–2017), Пятой международной конференции "Либерализация и модернизация электроэнергетических систем: Smart-технологии для совместных операций в электрических сетях" (Иркутск, 2012); Десятом научно-практическом семинаре «Современные программные средства для расчетов нормальных и аварийных режимов, надежности, оценивания состояния, проектирования режимов ЭЭС» (Иркутск 2012); 4–8 международных молодежных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодёжи» (Екатеринбург, 2012; Томск, 2014; Иваново, 2015; Казань, 2016, Самара, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 работ, в числе которых 4 статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ; 5 статей в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 Электростанции и электроэнергетические системы:

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

П7. Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка литературы, включающего 135 наименований, 4 приложений, списка используемых обозначений и сокращений. Общий объём работы составляет 153 страницы, включая 17 таблиц и 60 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и научно-практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы расчета максимально допустимого перетока активной мощности в линиях контролируемых сечений ЭЭС.

В диспетчерских центрах СО ЭЭС в цикле расчета МДП выполняется: расчет параметров установившегося режима; утяжеление полученного установившегося режима для определения предельного перетока по статической устойчивости для заданных контролируемых линий; определение перетоков в контролируемых сечениях, соответствующих нормативным запасам по статической аperiodической устойчивости.

Расчет базового УР может выполняться как с помощью традиционных методов расчета УР для нормальной или ремонтной схемы сети, так и с помощью методов оценивания состояния для текущей расчетной схемы по измерениям, поступающим от SCADA системы и СМПП.

Оценивание состояния является базовой задачей комплекса оперативно-диспетчерского управления. Результатом решения задачи ОС является текущий установившейся режим. Далее на основе этой модели решаются различные технологические задачи, в том числе выполняется расчет МДП.

Граница области допустимых значений определяется пределом по статической устойчивости, пределом по термической стойкости и пределом по напряжению. Значительную роль в безопасном управлении ЭЭС занимают расчеты статической устойчивости.

Вычисление предельного по статической устойчивости перетока $P_{пр}$ в сечении осуществляется утяжелением режима (увеличением перетока). В практике расчетов предельных по статической устойчивости режимов обычно применяют метод последовательного утяжеления. Также известны следующие методы: метод непрерывного утяжеления, метод основанный на использовании уравнений предельных режимов (УПР).

Для обеспечения устойчивости система работает с некоторым запасом, характеризуемым коэффициентом запаса. Сопоставляя параметры существующего устойчивого режима с параметрами нового режима, полученного в результате утяжеления и лежащего на границе между устойчивым и неустойчивым режимами, определяется коэффициент запаса устойчивости и коэффициент запаса по напряжению. Коэффициенты запаса устойчивости по активной мощности в сечении и по напряжению в узлах нагрузки нормируются в соответствии с методическими указаниями по устойчивости энергосистем.

Еще одной задачей, для которой необходимо вычисление МДП, является задача определения запаса пропускной способности линий контролируемого сечения или свободной пропускной способности (СПС). Величина СПС

определяет возможность передавать дополнительную мощность из одной области в другую в течение ограниченного периода времени и при определенных системных ограничениях. Для определения СПС в режиме реального времени необходимо знать величину МДП, определенную для текущих схемно-режимных условий работы ЭЭС.

На рис. 1 представлены графики перетоков активной мощности в текущем и предельном режимах, максимально допустимый переток и показан запас пропускной способности. Мощность, которая остаётся в энергосистеме после передачи мощности основным потребителям, распределяется между участниками рынка.

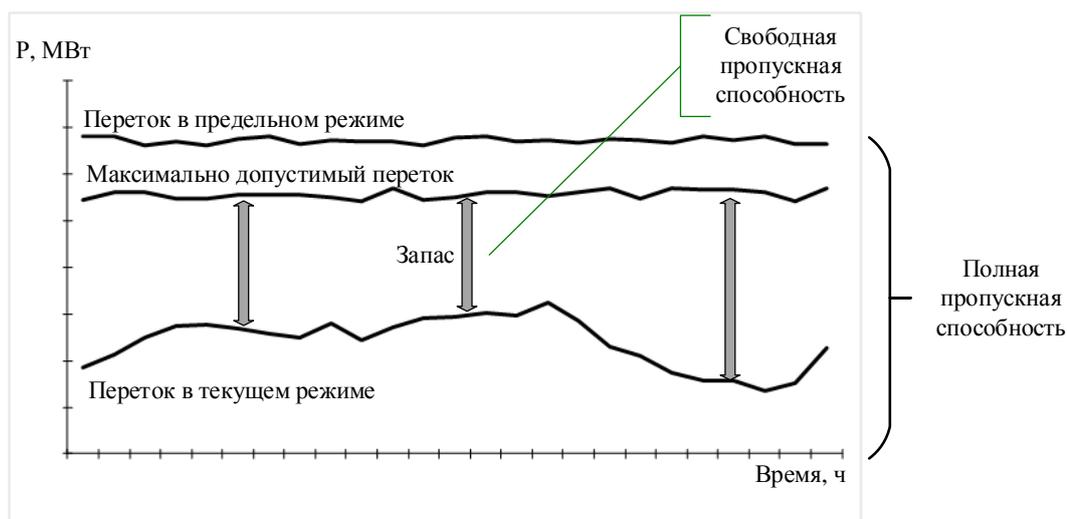


Рис. 1. Перетоки активной мощности в разных режимах

Для передачи дополнительной мощности выполняется расчет МДП контролируемых линий, и формируются адекватные текущему режиму управляющие воздействия, при которых достигается максимальное использование пропускной способности линий контролируемого сечения.

В диссертационной работе были рассмотрены и проанализированы стандарты по надёжности, применяемые при расчете полной пропускной способности (ППС), разработанные Североамериканской электрической корпорацией по надёжности. Зарубежная нормативно-законодательная база и терминология значительно отличается от российской. Запасы по надёжности (Transmission Reliability Margin) и полезный запас пропускной способности (Capacity Benefit Margin) варьируются в зависимости от системных условий и схемно-режимных ограничений и пересчитываются при любом их изменении.

Современные подходы, направленные на повышение эффективности управления режимами ЭЭС, заключаются во внедрении систем, которые позволяют в режиме реального времени осуществлять мониторинг фактического запаса устойчивости, проводить оценку тяжести электрического режима, корректировать МДП. В промышленной эксплуатации мониторинг уровней устойчивости реализован в ОЭС Урала в виде системы мониторинга запасов устойчивости в северных регионах Тюменской области (СМЗУ) по данным векторных измерений, поступающих от СМРП. СМЗУ позволяет определять

опасные сечения в системообразующей сети и их пропускную способность в реальном времени. В настоящий момент, методы, использующие векторные измерения, не могут быть реализованы на территории всей ЕЭС из-за отсутствия в необходимом количестве требуемых измерительных устройств.

В результате анализа современного состояния задачи определения МДП сделан вывод о необходимости разработки метода расчета МДП в линиях контролируемых сечений ЭЭС, который позволяет с требуемой точностью в темпе технологического процесса рассчитывать величину ТМДП для текущего электрического режима.

Во второй главе представлена задача оценивания состояния ЭЭС и дано описание разработанного метода оценивания ТМДП линий контролируемых сечений.

Вектор измерений, используемый при ОС и составленный по информации, полученной от системы SCADA и СМНР, содержит следующие параметры режима:

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

где U_i – модули напряжений в узлах; δ_i – фазовые углы напряжений; Q_i – инъекции реактивной мощности в узлах; P_i – инъекции активной мощности в узлах; Q_{ij} – перетоки реактивной мощности в линиях и трансформаторах; P_{ij} – перетоки активной мощности в линиях и трансформаторах; I_{ij} – модули токов в линиях; φ_{ij} – углы между током и напряжением.

Процедура оценивания состояния ЭЭС заключается в вычислении таких значений параметров режима, которые удовлетворяют уравнениям установившегося режима и наиболее близки (в смысле некоторого критерия) к измеренным значениям. При ОС вводится вектор состояния x , включающий модули U и фазовые углы δ узловых напряжений, для всех узлов ЭЭС, т.е. $x = (\delta, U)$. В качестве критерия чаще всего используется сумма взвешенных наименьших квадратов отклонений оценок от измерений:

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

где R_y^{-1} – диагональная матрица весовых коэффициентов измерений (величин, обратных дисперсиям измерений σ_y^2). Путем минимизации выбранного критерия вычисляются оценки вектора состояния, по которым определяются все параметры режима.

В диссертации разработан метод, с помощью которого рассчитывается режим, в котором по всем контролируемым линиям передается максимально допустимая мощность без нарушения ограничений на параметры режима с учетом возможной корректировки заданных параметров режима в пределах регулирования. Параметры режима, воздействием на которые достигается регулирование режима, являются регулируемыми параметрами, остальные – нерегулируемыми параметрами. Регулируемыми параметрами являются активные мощности в узлах, которые обеспечивают баланс активной мощности в ЭЭС, модули напряжения и реактивные мощности в узлах, в которых возможно регулирование этих величин.

Изменения регулируемых параметров режима рассматриваются как управляющие воздействия. Границы изменения регулируемых параметров режима определяются системными ограничениями. Нерегулируемые параметры режима выдерживаются в пределах заданной точности измерений.

Предложенный метод назван оцениванием ТМДП потому, что, как и в классическом оценивании состояния, в качестве исходной информации используется информация от систем сбора данных. В исходные данные добавляется неоперативная (расчетная) информация, из-за чего полученный режим не соответствует текущему режиму и называется результирующим режимом.

Расчетная информация – это данные, которые вычисляются заранее и хранятся в базе данных. Различают постоянную и переменную части расчетной информации.

Постоянная расчетная информация – значения псевдоизмерений максимально допустимых перетоков (ПИ МДП) контролируемых линий – остается неизменной во всех схемно-режимных ситуациях ЭЭС. Переменная информация – весовые коэффициенты ПИ МДП ($1/\sigma_{МДП}^2$) – может изменяться при изменении режима ЭЭС. Правильный подбор весовых коэффициентов ПИ МДП определяет получение оптимального результата оценивания ТМДП. При вычислении весовых коэффициентов учитываются режимные ограничения, обеспечивающие надежную работу ЭЭС. Вектор измерений выглядит как:

$$\bar{y}^{PE3} = (\bar{y}, P_{lk}^{ПИ МДП}), \quad (3)$$

где $P_{lk}^{ПИ МДП}$ – псевдоизмерения перетоков активной мощности в контролируемых линиях.

В векторе измерений выделяются корректируемые \bar{y}^k и некорректируемые \bar{y}^h измерения. Вектор измерений, по которому оценивается результирующий режим, выглядит следующим образом:

$$\bar{y}^{PE3} = (\bar{y}^k, \bar{y}^h, P_{lk}^{ПИ МДП}). \quad (4)$$

Корректируемыми \bar{y}^k и некорректируемыми \bar{y}^h измерениями названы измерения регулируемых и нерегулируемых параметров режима соответственно.

Задача оценивания ТМДП заключается в поиске допустимых значений ТМДП, максимально приближенных к заданным ПИ МДП $P_{lk}^{ПИ МДП}$, и сводится к минимизации целевой функции взвешенных наименьших квадратов:

$$J(x) = (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x))^T R_{PE3}^{-1} (\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x)), \quad (5)$$

где $R_{PE3}^{-1} = \begin{bmatrix} R_y^{-1} & 0 \\ 0 & R_p^{-1} \end{bmatrix}$, R_p^{-1} – диагональная матрица весовых коэффициентов ПИ

МДП. Значения весовых коэффициентов ПИ МДП определяют точность оценок

ТМДП $\hat{P}_{lk}^{ТМДП}$. Для определения параметров результирующего режима

вычисляются оценки компонент вектора состояния путем минимизации критерия (5). Итерационным способом решается система нелинейных уравнений

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = H^T R_{PE3}^{-1} [\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x)] = 0. \quad (6)$$

На каждой итерации система (6) линеаризуется и решается нормальная система уравнений относительно вектора поправок

$$\Delta x^i = [H^{T(i)} R_{PE3}^{-1} H^i]^{-1} H^{T(i)} R_{PE3}^{-1} [\bar{y}^{PE3} - y^{PE3}(x)], \quad (7)$$

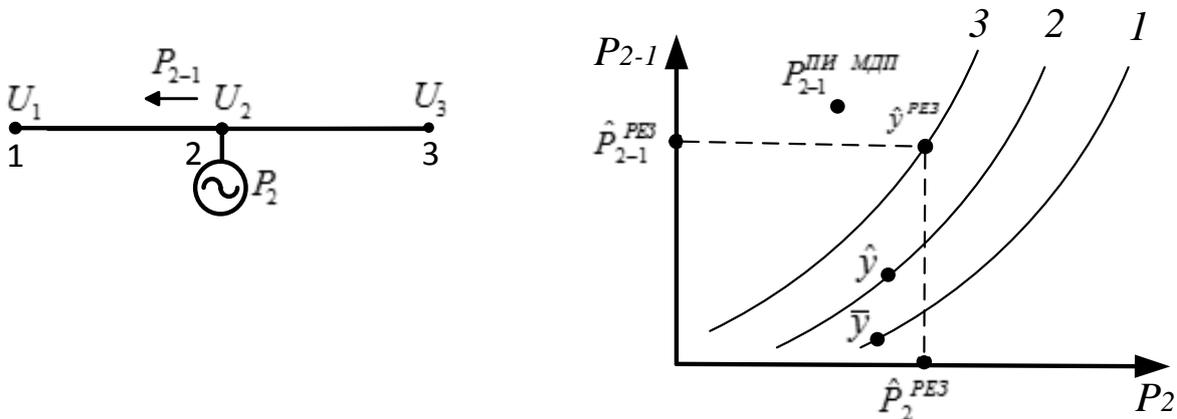
здесь H^i матрица Якоби, вычисленная на i -той итерации. Компоненты вектора состояния определяются по формуле:

$$x^i = x^{i-1} + \Delta x^i. \quad (8)$$

По окончании итерационного процесса по известным формулам вычисляются потоки активной P_{ij} и реактивной мощности Q_{ij} в линиях и инъекции активной и реактивной мощности в узлах P_i и Q_i .

Для иллюстрации метода рассмотрим схему ЭЭС, показанную на рис. 2а. ЭЭС состоит из трех узлов. Линия 2-1 является контролируемой. Вектор измерений, получаемый от систем сбора данных, выглядит следующим образом:

$$\bar{y} = (U_1, U_2, U_3, P_2, P_{2-1}). \quad (9)$$



а) схема ЭЭС

б) расположение гиперповерхностей в двумерном евклидовом пространстве: 1 – измерения; 2 – оценки текущего режима; 3 – оценки результирующего режима

Рис.2. Геометрическая интерпретация метода оценивания ТМДП

Регулируемыми параметрами режима являются U_2, P_2 , остальные параметры режима являются нерегулируемыми.

Для того, чтобы описать состояние исходного вектора измерений (9) в пространстве, обратимся к графику, представленному на рисунке 2б. Вектор измерений состоит из 5 координат, но поскольку сложно представить 5-ти мерное пространство, представим вектор измерений в координатах P_2 и P_{2-1} . Текущей

вектор измерений может быть определен в точке \bar{y} на гиперповерхности измерений (кривая 1).

По измерениям (9) решается задача оценивания состояния ЭЭС. При выполнении оценивания состояния каждому измерению присваивается вес, который регулирует влияние данного измерения на результаты ОС. В зависимости от значений весовых коэффициентов измерений определяется множество УР. При представлении этого множества в двухмерном евклидовом пространстве, найденные оценки измерений одного режима могут оказаться в любой точке гиперповерхности установившихся режимов (кривая 2), например, в точке \hat{y} :

$$\hat{y} = (\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_3, \hat{P}_2, \hat{P}_{2-1}). \quad (10)$$

Для вычисления реального (текущего) установившегося режима необходима корректная настройка весовых коэффициентов измерений.

Точкой $P_{2-1}^{III \text{ МДП}}$ обозначен предел мощности, вычисленный в отдельно взятой линии. Этот предел называется псевдоизмерением МДП (ПИ МДП).

С помощью предложенного метода измеренные значения перетоков в контролируемых линиях, которые находятся в составе вектора \bar{y} на рис 2б, «подтягиваются» к $P_{2-1}^{III \text{ МДП}}$ настолько, насколько это позволяют системные ограничения и текущие значения нерегулируемых параметров режима. Полученный режим является результирующим УР.

Множество точек результирующих режимов лежит на гиперповерхности результирующих УР (кривая 3). Один из возможных результирующих режимов, показан на рис. 2.б, точкой \hat{y}^{PE3} :

$$\hat{y}^{PE3} = (\hat{U}_1, \hat{U}_2^{PE3}, \hat{U}_3, \hat{P}_2^{PE3}, \hat{P}_{2-1}^{PE3}). \quad (11)$$

Задача оценивания ТМДП является задачей реального времени, но требует предварительного этапа. На предварительном этапе подготавливается расчетная информация. На рис. 3 показаны задачи оценивания ТМДП на предварительном этапе (OFFLINE) и в режиме реального времени (ONLINE).

OFFLINE решаются следующие задачи:

1) Определение ПИ МДП. Значения ПИ МДП ($P_{lk}^{III \text{ МДП}}$) задаются для линий различных классов напряжений и остаются неизменными во всех схемно-режимных ситуациях. ПИ МДП определяется величиной натуральной мощности или фактором статической устойчивости для ЛЭП 750-500 кВ, для ЛЭП 220-330 кВ ограничения могут наступать как по условию устойчивости, так и по допустимому нагреву, 110 кВ и ниже — только по нагреву. В таблице 1 показаны значения ПИ МДП для линий различных классов напряжений, ПИ МДП принимаются равными минимальному из двух значений пропускной способности.

Таблица 1. Значения ПИ МДП

$U_{ном}, \text{ кВ}$	По допустимому нагреву			По статической устойчивости			
	110	220	330	220	330	500	750
ПИ МДП, МВт	50	280	760	350	800	1350	2500

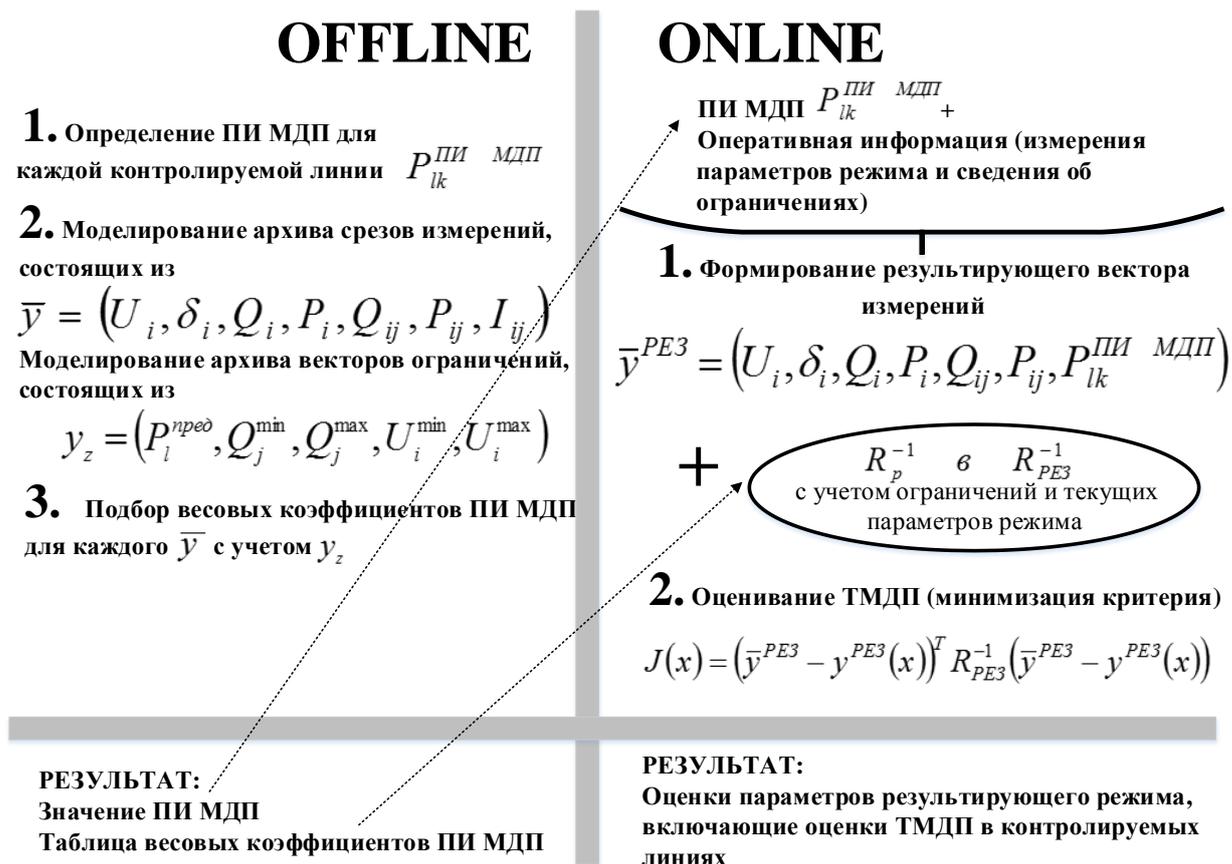


Рис. 3. Решение задачи оценивания ТМДП в два этапа

2) Моделирование архива срезов измерений и архива системных ограничений выполняется для учета всех возможных условий работы ЭЭС (в случае отсутствия архива реальных данных).

Архив срезов измерений моделируется в имитационном эксперименте с использованием типовых или фактических графиков активной и реактивной нагрузки в нагрузочных узлах. Для каждой точки графика нагрузки вычисляется установившийся режим и записывается в базу данных УР. Для создания среза измерений из базы данных УР выбираются измеряемые параметры режима $y_{уст}$ и на них накладываются ошибки $x_{сл}$, сгенерированные датчиком случайных чисел:

$$\bar{y} = y_{уст} + x_{сл} \sigma_y, \quad (17)$$

где $x_{сл} \in N(0,1)$, σ_y^2 – дисперсия измерения.

На рис. 4 показано смоделированное значение нагрузки в одном из узлов в 240 срезах в виде графика. Значения нагрузки в первых 37 срезах показаны в увеличенном виде.

Системные ограничения определяются условиями надежности режима энергосистемы и накладываются на параметры режима работы оборудования ЭЭС. В математическом виде ограничения записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_i^{\min} < U_i < U_i^{\max}, \\ P_l \leq P_l^{пред}, \\ Q_j^{\min} < Q_j < Q_j^{\max}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где U_i – напряжение в контролируемых узлах; U_i^{\min} и U_i^{\max} – соответственно нижние и верхние допустимые пределы изменения напряжения, l – узлы, в которых регулируется активная мощность, $P_i^{nped} = P^{pab} + P^{pez}$; P^{pab} – располагаемая мощность электростанции, за вычетом оборудования, выведенного в ремонт; P^{pez} – оперативный резерв мощности, Q_j – реактивная мощность в узлах, в которых возможно регулирование; Q_j^{\min} и Q_j^{\max} – соответственно нижние и верхние допустимые пределы изменения реактивной мощности. Архив ограничений создается за счет изменения пределов регулирования заданных параметров режима.

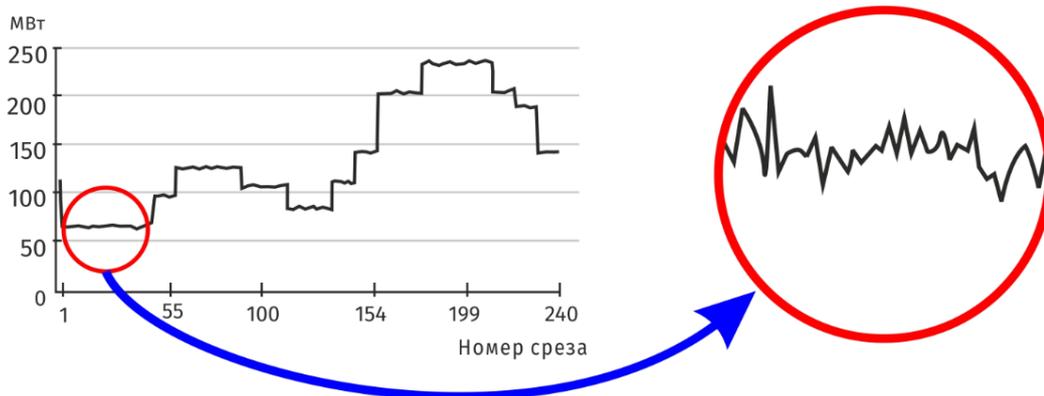


Рис. 4. Моделирование срезов измерений на примере графика нагрузки в одном из узлов

3) Подбор весовых коэффициентов (в.к.) ПИ МДП. Задача подбора в.к. ПИ МДП решается заранее методом перебора в.к. с учетом системных ограничений. В процессе подбора в.к. ПИ МДП ищется минимальное значение критерия:

$$\varphi_k = \sum_1^{k_0} (P_{lk}^{ПИ\ МДП} - P_{lk}^{ТМДП}(x))^2, \quad (13)$$

где, k – номер набора в.к. ПИ МДП; k_0 – количество контролируемых линий.

На рис. 5 представлена блок - схема алгоритма подбора значений в.к. ПИ МДП для одного среза. Задача решается в два этапа N раз, где N – заданное количество наборов весовых коэффициентов.

На первом этапе выполняется оценивание ТМДП без учета ограничений, заданных для корректируемых измерений. В процессе оценивания ТМДП вычисляются все параметры УР, в том числе перетоки в контролируемых линиях P_{lk} . Погрешности измерений распределяются между оценками измерений и ТМДП в зависимости от весовых коэффициентов измерений и ПИ МДП.

На втором этапе проверяются ограничения (12). При соблюдении всех ограничений вычисляется критерий (13) и анализируется условие

$$\varphi_k < \varphi_{k-1}. \quad (14)$$

При выполнении (14) значения в.к. записываются в базу данных. Если $k < N$, то задаются новые весовые коэффициенты ПИ МДП и задача решается заново.

Если $k \geq N$, то обрабатывается следующее состояние ЭЭС. После обработки всех состояний ЭЭС каждому из них соответствует определенный набор весовых

коэффициентов ПИ МДП, который обеспечит корректные результаты разработанного метода оценивания ТМДП.

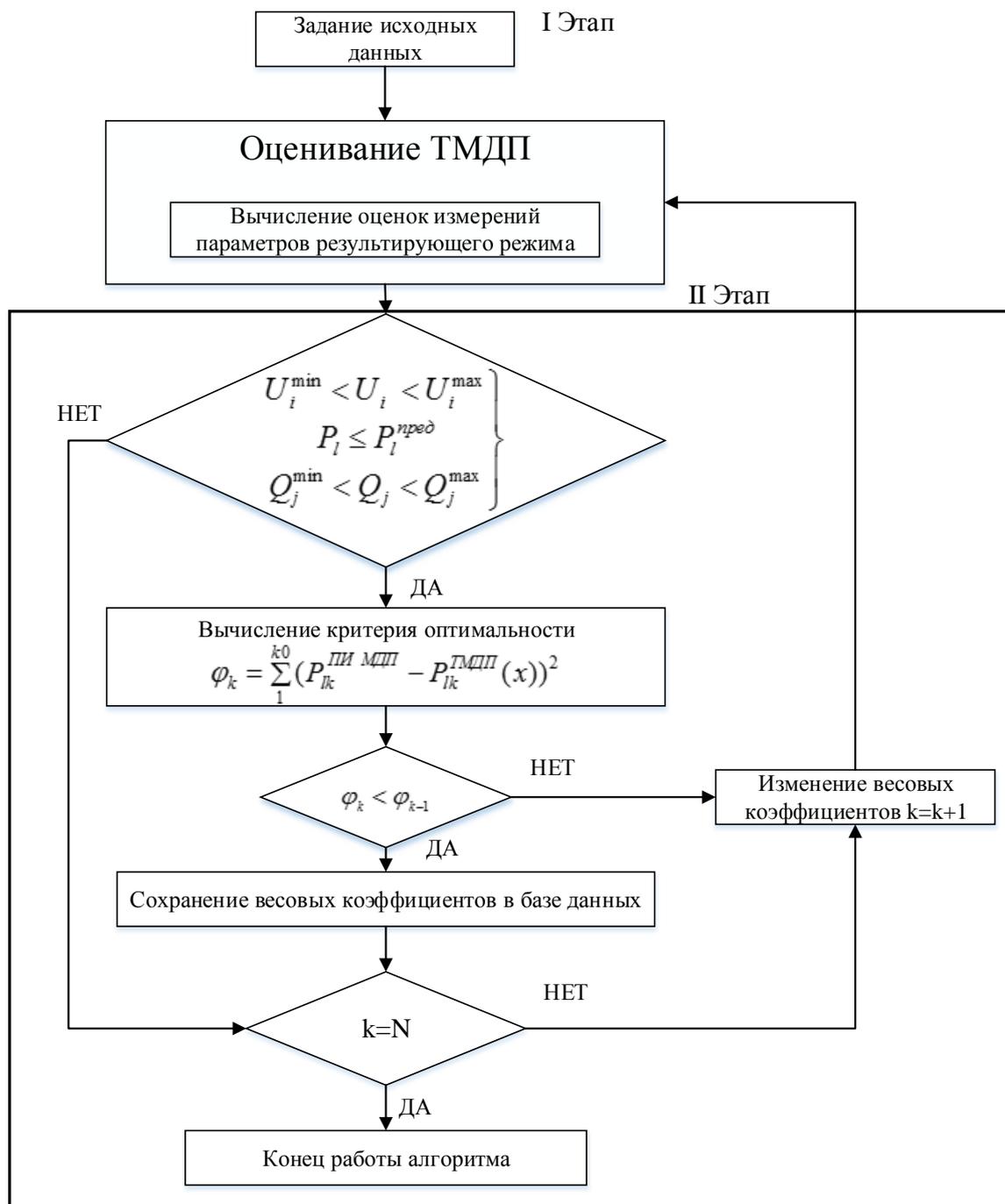


Рис.5. Блок-схема алгоритма заполнения базы данных весовых коэффициентов ПИ МДП

ONLINE выполняется формирование результирующего вектора измерений из оперативной информации и заранее подготовленной расчетной, затем вычисляется результирующий режим по критерию (5).

Параллельно с оцениванием ТМДП выполняется ОС текущего режима. (рис.6).

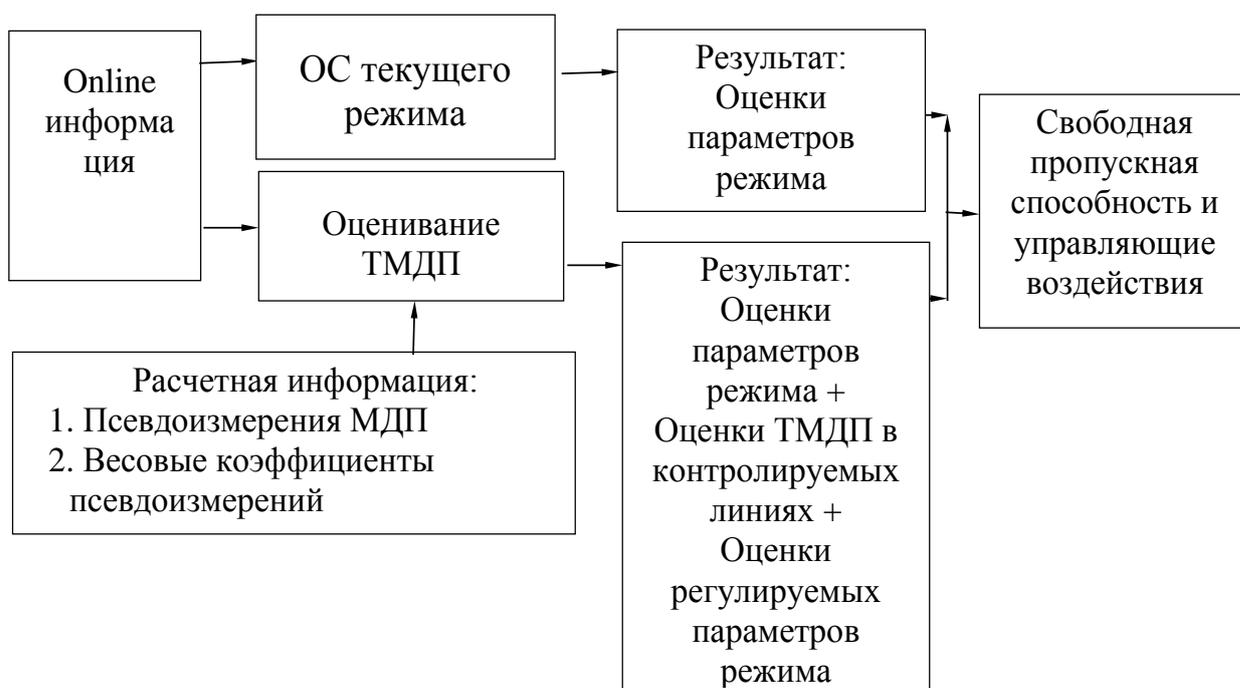


Рис.6. Блок–схема алгоритма расчета ТМДП и свободной пропускной способности в режиме реального времени

Свободная пропускная способность $P_{своб}$ и управляющие воздействия S рассчитываются как разность параметров текущего и результирующего режимов и вычисляются по формулам:

$$P_{своб} = \hat{P}_{lk}^{ТМДП} - \hat{P}_{lk}, \quad (15)$$

$$S = \hat{y}^{рез-рез} - \hat{y}^{рез}. \quad (16)$$

Вычисленные значения свободной пропускной способности и управляющие воздействия поступают к специалистам системного оператора или в диспетчерский центр, где, в случае необходимости, принимается решение об их использовании.

В табл. 2 показаны основные отличия метода оценивания ТМДП от оценивания состояния ЭЭС.

Таблица 2. Сравнение методов оценивания ТМДП и ОС ЭЭС

	Оценивание состояния	Оценивание ТМДП
	1	2
Определение	Вычисление параметров текущего установившегося режима по измерениям.	Вычисление установившегося режима с максимально допустимыми перетоками в контролируемых линиях и с параметрами текущего режима в остальной части ЭЭС. Значения перетоков в контролируемых линиях изменяются вследствие корректировки определенных заранее параметров режима ЭЭС.

	1	2
Исходные данные	Вектор измерений, дисперсии измерений, определяемые метрологическими характеристиками измерительного тракта, псевдоизмерения нулевых инъекций в транзитных узлах и нагрузок в ненаблюдаемых узлах.	
		Состав регулируемых и нерегулируемых параметров режима, псевдоизмерения максимально допустимых перетоков (ПИ МДП), весовые коэффициенты ПИ МДП соответствующие текущим ограничениям, которые определяют желаемый результирующий режим.
Результат	Установившийся режим. Оценки параметров установившегося режима.	Результирующий установившийся режим. Оценки параметров результирующего установившегося режима, включающие оценки ТМДП.

В связи с частым изменением условий работы ЭЭС (текущей конфигурации схемы, текущих параметров режима, системных ограничений на параметры установившегося режима, скорректированных для текущей схемы) в реальном времени возникают трудности, связанные с перерасчетом весовых коэффициентов ПИ МДП в темпе процесса, поскольку условия работы ЭЭС иногда меняются быстрее, чем может быть выполнен этот расчет. Для решения этой проблемы в диссертационной работе предложено использовать ИНС.

В третьей главе решается проблема подбора в.к. ПИ МДП в режиме реального времени с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС). Обученные ИНС анализируют текущие условия работы ЭЭС и, тем самым, способствуют автоматизации процесса настройки в.к. ПИ МДП в режиме реального времени.

В диссертации для этой цели применяются две ИНС Кохонена, которые относятся к самоорганизующимся нейронным сетям, способным выявлять общие характеристики во входных векторах и объединять похожие векторы в группы (классы). ИНС1 обучается определять текущие параметры режима и конфигурацию электрической сети, ИНС2 обучается распознавать текущие ограничения.

Обучающий и тестовый наборы данных – наборы входных векторов – состоят из всех доступных измерений параметров режима, данных о диапазоне ограничений на регулируемые параметры режима с учетом текущей конфигурации схемы. Входными данными (входной вектор) для ИНС1 служат срезы измерений $\bar{y} = (U_i, \delta_i, Q_i, P_i, Q_{ij}, P_{ij}, I_{ij})$. Входными данными для ИНС2 являются ограничения $y_z = (P_l^{пред}, Q_j^{\min}, Q_j^{\max}, U_i^{\min}, U_i^{\max})$.

Обучающие и тестовые задачки для ИНС1 формируются из архива срезов измерений, для ИНС 2 из архива ограничений.

Перед процессом обучения производится инициализация нейронных сетей, то есть задаются первоначальные значения векторов весов синапсов ИНС, количество классов, на которые должна быть классифицирована обучающая выборка, и количество циклов (эпох) обучения.

Начальные значения весов выбираются случайным образом. Количество циклов обучения влияет на скорость и точность обучения. Чем больше циклов, тем лучше выявляются различия между классами, что приводит к лучшей настройке каждого нейрона. В диссертации для обучения нейронных сетей было выбрано 1000 эпох. Количество классов определяется экспериментально путем подбора оптимального числа классов с точки зрения следующих условий: отсутствие пустых классов и непопадание режимов с различными свойствами в один класс.

На созданных обучающей и тестовой выборках ИНС обучаются и тестируются. На рис. 7 представлены векторы срезов измерений в трех координатах для одной из тестовых схем, рассмотренных в работе. Из рис. 7 видно, что векторы поделены на 6 классов. Ответом обученной нейронной сети является номер класса, к которому принадлежит каждый вектор.

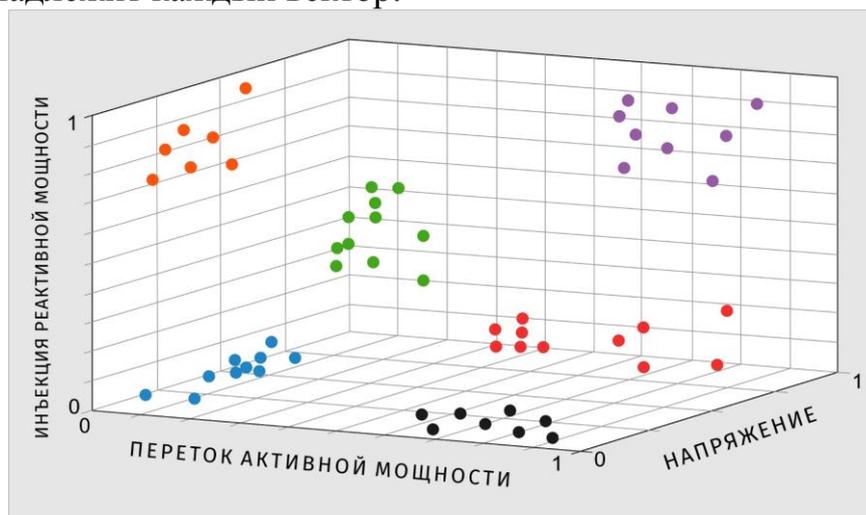


Рис. 7. Представление входных векторов в виде точек в пространстве признаков

Для интерпретации ответов ИНС формируются M таблиц, с M_a строками и M_b столбцами, где M – количество классов, на которые поделены ограничения, M_a – количество строк в таблице, равное количеству классов, на которые поделены срезы измерений, M_b – количество столбцов в таблице, равное количеству контролируемых линий (рис.8, $M = 5$, $M_a = 6$, $M_b = 3$). Для заполнения таблиц решается задача подбора весовых коэффициентов ПИ МДП по алгоритму, показанному на рис.4, $M \times M_a$ раз.

Ограничения	Номер Класса	Линия Братск-Иркутск 1	Линия Братск-Иркутск 2	Линия БПП-ПСНЗ
Ограничения 5го класса	1	1/95	1/105	1/150
Ограничения 4го класса	1	1/95	1/105	1/140
Ограничения 3го класса	1	1/95	1/105	1/130
Ограничения 2го класса	1	1/99	1/110	1/120
Ограничения 1го класса	Номер Класса	Линия Братск-Иркутск 1	Линия Братск-Иркутск 2	Линия БПП-ПСНЗ
	1	1/96	1/105	1/100
	2	1/86	1/102	1/105
	3	1/76	1/98	1/109
	4	1/69	1/84	1/115
	5	1/60	1/75	1/126
	6	1/54	1/69	1/139
				Режимы
				1го класса
				2го класса
				3го класса
				4го класса
				5го класса
				6го класса

Рис. 8. Таблицы базы данных в.к. ПИ МДП

ИНС создаются с помощью функции пакета Neural Networks Toolbox в оболочке MatLab. На рис. 9 схематично показано место ИНС в процессе оценивания ТМДП в режиме реального времени. Обученные ИНС1 и ИНС2 распознают входные векторы как векторы, принадлежащие к известным классам, тем самым, распознают текущие условия работы ЭЭС. По номерам классов определяются весовые коэффициенты ПИ МДП и выполняется оценивание ТМДП.

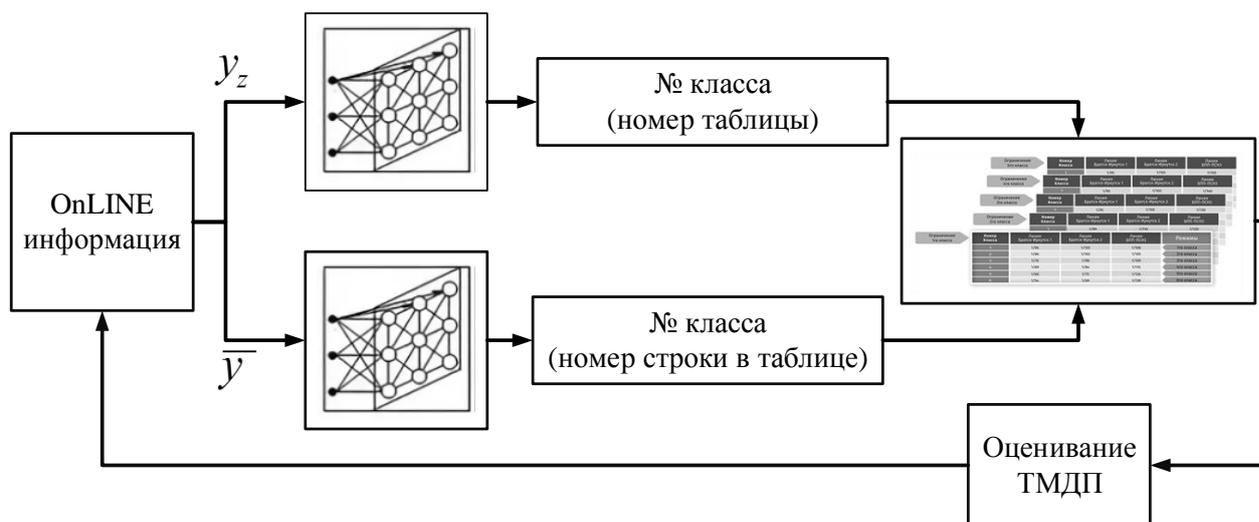


Рис. 9. Схема работы алгоритма вычисления ТМДП с помощью ИНС в реальном времени

В четвертой главе выполняется сравнительный анализ результатов, полученных по разработанному методу и по методам известных из литературы на тестовых схемах. Описывается методический подход определения ТМДП на примере реальной схемы по архиву срезов измерений, созданного на базе зимнего контрольного замера.

На рис. 10 показана схема, где представлены основные этапы разработанного методического подхода (блоки 1,2,3) и вычисления СПС (блоки 4,5) в виде блок – схемы.

Значение ТМДП и СПС вычисляются следующим образом:

1. Из блока «Система сбора данных» (блок 1) измерения загружаются одновременно в три блока: блок ОС (2), блок ИНС (3), блок оценивания ТМДП (4).

2. В блоке «Оценивание состояния» выполняется ОС текущего режима. Результатом расчета являются оценки параметров текущего режима.

3. В блоке «Искусственная нейронная сеть» две ИНС распознают текущие условия работы ЭЭС. По ответам ИНС определяются весовые коэффициенты ПИ МДП и передаются в блок 4.

4. В блоке «Оценивание ТМДП» выполняется расчет результирующего установившегося режима.

5. В блоке 5 по полученным значениям результирующего и текущего режимов вычисляется свободная пропускная способность и определяются управляющие воздействия на регулируемые параметры, направленные на достижение требуемого значения ТМДП.



Рис.10. Блок-схема методического подхода определения МДП и вычисления СПС

Верификация результатов оценивания ТМДП выполнялась по следующему сценарию: требуется вычислить МДП контролируемых линий в 7–ми узловой тестовой схеме, 14–ти узловой схеме IEEE, 30–ти узловой схеме IEEE. Расчет МДП выполнялся различными традиционными методами расчёта предельных режимов. Для реализации метода оценивания ТМДП использовался ПМК «State+», разработанный в ИСЭМ СО РАН Глазуновой А.М., Съемщиковым Е.С., Аксаевой Е.С. Результаты расчетов показаны в табл.3.

Таблица 3. Результаты сравнительных расчетов

Схема (количество узлов)	Вычислительный метод			Оценивание ТМДП
	название	реализация	МДП, МВт	ТМДП, МВт
7	Непрерывное утяжеление	ПК Project	901	896,64
14	Последовательное утяжеление	MatPower	141,87	140
30	Оптимальное потокораспределение	Литературный источник	65	69

Оценки ТМДП, полученные по разработанному автором методу, совпадают с результатами расчетов по методу непрерывного утяжеления с точностью до 5 МВт, по методу последовательного утяжеления с точностью 1,87 МВт, по методу оптимального потокораспределения с точностью 4 МВт, что не выходит за границы точности измерений перетоков активной мощности по межсистемным связям.

Методический подход оценивания ТМДП был апробирован на фрагменте схемы Иркутской энергосистемы. С целью ускорения расчетов нормальная (полная) схема была укрупнена до схемы, показанной на рис.11. Укрупненная схема состоит из 17 линий напряжением 500 кВ. Мощности, приходящие (или отходящие) в граничные узлы по связям 110 кВ и 220 кВ, представлены в виде инъекций.

Основным контролируемым сечением является сечение «Братск-Иркутск». Сечение состоит из трех сетевых элементов:

- ВЛ 500 кВ Братский ПП – Ново-Зиминская (ВЛ–4)
- ВЛ 500 кВ Братская ГЭС – Тулун №1, ВЛ 500 кВ Братская ГЭС – Тулун №2 (ВЛ–5).

Постановка задачи: требуется оценить величину ТМДП линий контролируемого сечения для выявления возможности передачи дополнительной мощности в узел ПС Ново-Зиминская (узел 5) и ПС Тулун (узел 3) при различных схемно-режимных условиях.

Условия расчетов: узлы Братская ГЭС (2), ПС Тулун (3), ПС Ново-Зиминская (5) считаются узлами с регулируемыми параметрами. В этих узлах допускается изменение напряжения на 5%, повышение реактивной мощности на Братской ГЭС до 1312 МВар, выработка активной мощности на Братской ГЭС не должна превышать 3360 МВт.

В узлах с нерегулируемыми параметрами значения измерений (инъекции активной и реактивной мощности, напряжения) должны оставаться в диапазоне допустимой погрешности измерений.

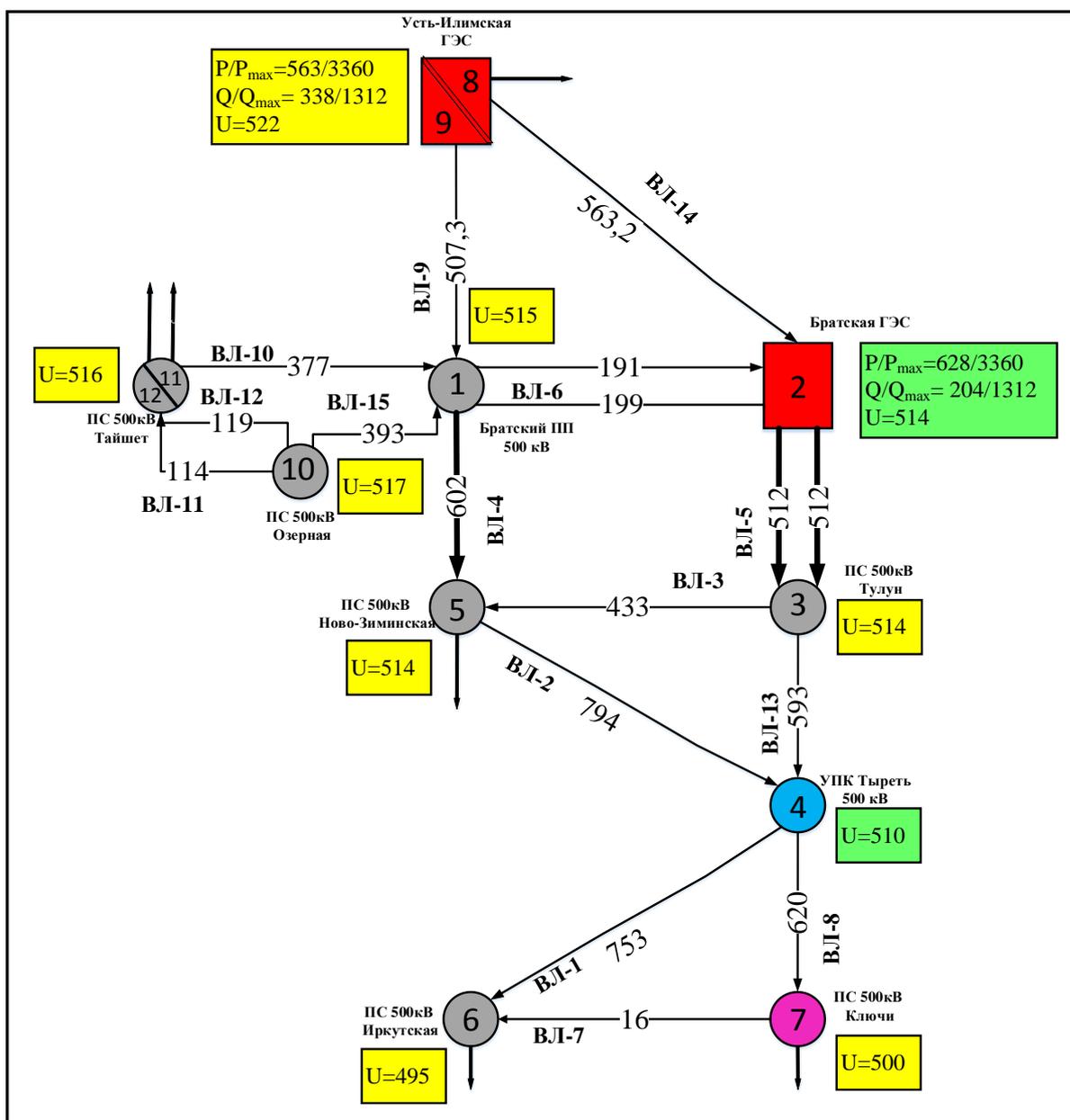


Рис.11. Фрагмент схемы Иркутской энергосистемы

Описание исходной информации: общая информация – данные о параметрах схемы замещения рассчитываемой сети, дисперсии поступающих измерений, список узлов с регулируемыми параметрами, данные о составе измерений в узлах, в которых возможна регулировка, технологические пределы, не зависящие от текущего режима, в том числе предельные токи, уровни напряжений и др.– хранятся в базе данных в диспетчерском центре.

Оперативная информация – данные о конфигурации схемы, данные о составе и значениях имеющих в схеме измерений и телесигналов – поступает от системы сбора данных.

Подготовительный этап (режим offline)

На подготовительном этапе задаются ПИ МДП линий контролируемого сечения, создаются архивы срезов измерений для ИНС, обучаются ИНС распознавать условия работы ЭЭС, определяются весовые коэффициенты ПИ

МДП. Для составления архива срезов измерений и подбора весовых коэффициентов ПИ МДП используется ПВК «State+». Данный расчет выполнялся при одном наборе ограничений.

– **Задание ПИ МДП.** Напряжение линий 2-3 (ВЛ–5) и 1-5 (ВЛ–4) равно 500 кВ, следовательно, ПИ МДП линии 1-5 принимается равным 900 МВт, двухцепной линии 2-3 – равным 1800 МВт.

– **Создание архива срезов измерений.** Архив срезов измерений создается имитационным путем в следующем порядке:

1. Загрузка данных. Загружается файл с параметрами схемы в формате ЦДУ *.dat (контрольный замер, зимний максимум 2016). Выбираются балансирующие узлы по активной (узел 2) и реактивной мощности (узлы 2 и 4).
2. Выбор данных из архива. Для каждого нагрузочного узла выбираются типовые графики активной нагрузки из предложенных вариантов. Для каждой точки графика нагрузки выполняется расчет УР и записывается в базу данных УР.
3. Создание архива срезов. Из базы данных УР выбираются измеряемые параметры режима и на них накладываются погрешности измерений, сгенерированные датчиком случайных чисел. Архив срезов измерений записывается в файл *.mat.

– **Обучение ИНС.** Для обучения ИНС классифицировать срезы измерений на 6 классов используется архив срезов измерений из файла *.mat. Количество примеров в обучающей выборке 240. Каждый пример состоит из 89 признаков, что соответствует количеству измерений в одном срезе. Количество эпох обучения 1000. Время обучения составляет 2 мин 57 сек.

– **Определение в.к. ПИ МДП.** Выполняется подбор в.к ПИ МДП для эталонного вектора каждого класса. Подбор выполняется при учете информации от Системного Оператора, которая записывается следующим образом:

1. Напряжение в узлах i ($i = 2, 3, 5$): $475\text{кВ} < U_i < 525\text{кВ}$.
2. Располагаемая мощность в узле 2: $P_{Г2} \leq 3360\text{МВт}$.
3. Реактивная мощность в узле 2 $0 < Q_2 < 1312\text{МВАр}$.

Основной этап

В режиме реального времени алгоритм вычисления ТМДП и СПС следующий:

1. В рассматриваемый момент времени в диспетчерский центр от систем сбора данных поступает срез измерений и ограничения. Поступающие измерения загружаются одновременно в три блока: блок оценивания ТМДП, блок оценивания состояния, блок ИНС (рис.10).
2. ИНС определяет, что рассматриваемый срез измерений обладает свойствами векторов, принадлежащих к классу 3. Интерпретация ответов ИНС (определение значения весовых коэффициентов ПИ МДП) выполняется с помощью таблицы (рис.8).
3. Выполняется оценивание ТМДП по текущему срезу измерений с полученным в п.2 набором весовых коэффициентов ПИ МДП. Результатом расчета являются оценки ТМДП $P_{2-3}^{\text{МДП}} = 1327$ МВт, $P_{1-5}^{\text{МДП}} = 710$ МВт, $P_2^{\text{PE3}} = 458,2$ МВт.

4. В блоке ОС выполняется оценивание состояния текущего режима. В этом режиме $P_{2-3} = 1028$ МВт, $P_{1-5} = 608$ МВт, $P_2 = 73,2$ МВт.
5. Вычисляются управляющие воздействия $P_2 = 385$ МВт и значения СПС $P_{2-3}^{СПС} = 299$ МВт, $P_{1-5}^{СПС} = 102$ МВт.

На рис. 12 показаны значения перетоков активной мощности в линиях. Суммарный переток в контролируемом сечении равен 2037 МВт (в сумме по ВЛ–4 и ВЛ–5), что соответствует значению МДП, используемому диспетчерским персоналом в настоящее время (2040 МВт).

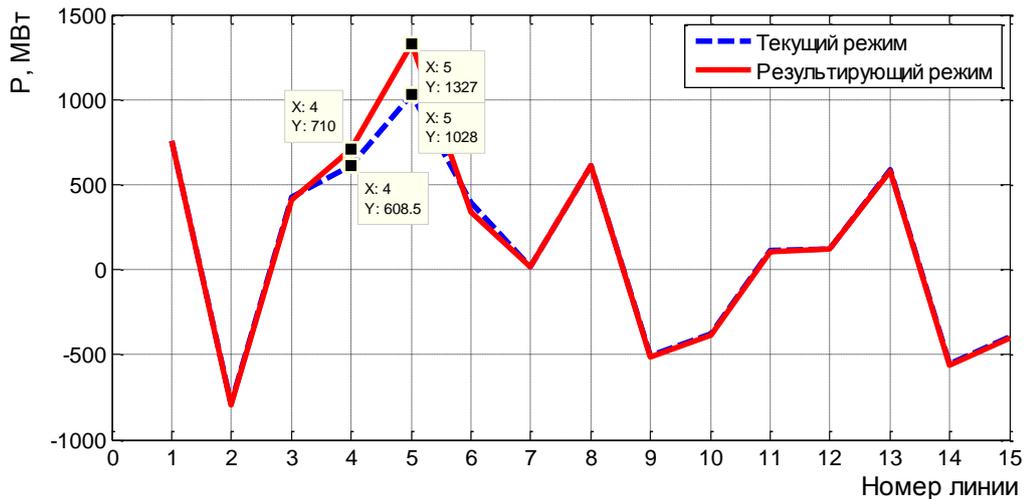


Рис.12. Значения перетоков активной мощности

На рис. 13 показаны отклонения активной мощности, реактивной мощности, напряжения в узлах. Из рис. 13 видно, что все ограничения соблюдены и все обязательства перед потребителями выполнены.

По полученным результатам специалист СО может судить об имеющемся запасе пропускной способности контролируемого сечения и принимать решения о дополнительной загрузке сечения в случае спроса на дополнительную мощность.

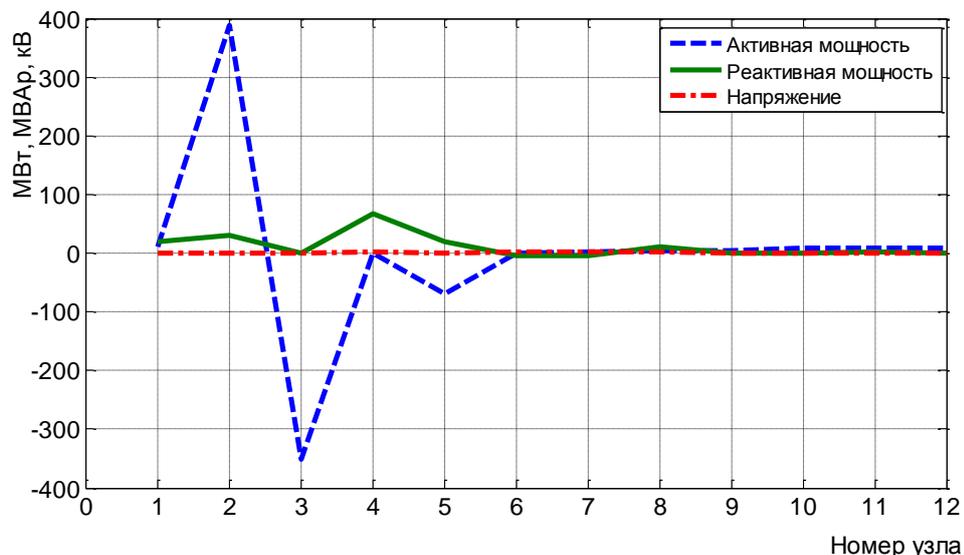


Рис.13. Отклонения инъеции активной мощности, инъеции реактивной мощности, напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе исследованы разработанные в России и за рубежом методы определения максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях ЭЭС и возможность их использования в режиме реального времени. Общей чертой всех методов является то, что для расчета МДП требуется получить режим, который является результатом расчета УР или оценивания состояния, и на основе полученного установившегося режима выполнять расчет МДП. К недостаткам методов можно отнести значительную трудоемкость, связанную с необходимостью большого количества промежуточных расчетов, которые, как правило, не интересуют расчетчика. Другим недостатком методов является то, что исходный утяжеляемый режим, в большинстве случаев, отличается от текущего режима, для которого определяется МДП, в связи с тем, что в энергосистеме происходят различные изменения.

В результате анализа российских методов определения МДП сделан вывод о необходимости разработки метода расчета МДП в контролируемых линиях ЭЭС, который позволит с требуемой точностью в темпе технологического процесса рассчитывать величину МДП для текущего режима ЭЭС.

Разработан метод оценивания ТМДП в контролируемых линиях по информации, поступающей от SCADA системы и СМПП, результатом которого является результирующий установившийся режим. Полученный режим дает оценки максимально допустимых перетоков в контролируемых линиях, оценки регулируемых параметров режима, оценки нерегулируемых параметров текущего режима. Выполнение необходимых условий: сходимость итерационного процесса; соблюдение заданных схемно-режимных ограничений; перерасчет значений перетоков активной мощности в контролируемых линиях не реже одного раза в минуту гарантирует, что вычисленные перетоки являются допустимыми. Нарушение ограничений в случае увеличения значений перетоков говорит о том, что полученные перетоки являются максимально возможными для рассматриваемых условий работы ЭЭС.

Разработан алгоритм подбора весовых коэффициентов ПИ МДП в режиме offline, обеспечивающий получение желаемого результирующего установившегося режима. При подборе весовых коэффициентов ПИ МДП используются ограничения в виде неравенств, позволяющие учесть технологические и режимные характеристики работающего оборудования.

Разработан методический подход для оценивания ТМДП в режиме реального времени, включающий метод оценивания ТМДП и нейросетевой метод подбора весовых коэффициентов ПИ МДП. Обученные ИНС идентифицируют условия, в которых работает ЭЭС, с целью корректной настройки весовых коэффициентов ПИ МДП.

Разработанный методический подход расчета ТМДП в контролируемых линиях позволяет:

– сократить время расчета ТМДП за счет того, что расчеты выполняются непосредственно по оперативной информации;

- определить ТМДП с необходимой точностью для любого режима за счет корректного задания весовых коэффициентов псевдоизмерений МДП;
- повысить эффективность расчетов ТМДП путем автоматизации проводимых расчетов; получать величину ТМДП, которая максимально приближена к реальным условиям работы сети, что обеспечит наиболее полное использование пропускной способности контролируемых линий.

Проведена верификация разработанного метода путем сравнения с результатами, полученными при использовании современных методов определения МДП. Доказана работоспособность разработанного метода. Результаты, полученные по предложенному методу, совпадают с результатами расчетов по методу утяжеления с заданной точностью.

Проведены расчеты для схемы Иркутской энергосистемы по определению ТМДП контролируемого сечения «Братск – Иркутск» по множеству срезов измерений. Результаты расчёта ТМДП активной мощности в сечении «Братск-Иркутск» Иркутской ЭС с использованием разработанного метода показали, что отклонение результатов расчёта для МДП составляет 0,1 % по сравнению со значениями, используемыми в РДУ Иркутской ЭС. Разработанный метод оценивания МДП может быть использован для расчета максимально допустимых перетоков активной мощности в контролируемых линиях реальных ЭЭС.

Практическая ценность полученных научных результатов состоит в решении актуальной задачи, связанной с оцениванием ТМДП в реальном времени и созданием программного комплекса для оценки ТМДП. Результаты позволят повысить скорость принятия решений, эффективность оперативного управления, полнее использовать резервы энергосистем по пропускной способности.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК:

1. Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Экспресс-оценка загруженности линий электропередачи в режиме реального времени // Вестник ИрГТУ. – 2012. – №8. – С.136–143.
2. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Искусственные нейронные сети для настройки параметров оценивания состояния предельного режима электроэнергетической системы. // Открытое образование. Научно-практический журнал. Информационные технологии в образовании и научных исследованиях. 2012. – № 2. – С.29–32.
3. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Мониторинг фактической пропускной способности контролируемых линий ЭЭС // Электричество. – 2013. – №12. – С.21–29.
4. Колосок И.Н., Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния // Вестник ИрГТУ. – 2018.– №3.– С. 145–153.

Статьи в зарубежных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus:

1. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Results of Modified State Estimation for Improvement of Interconnected Power System Control Efficiency // Proceedings of the International Conference PowerTech'2013. – Grenoble, France: June 16-20, 2013. USB #A5428AG
2. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Available transfer capability determination on the basis of a trade-off approach // Proceedings of the International Conference PowerTech'2017. – Manchester, UK: June 18-22, 2017.
3. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Actions Generation for Online Power System Control // Proceedings of the International Conference PowerTech'2015. – Eindhoven, Holland: June 27 – 3, 2015. USB #459689
4. Glazunova A.M., Aksaeva E.S., Semshchikov E.S. Forecasting of Available Transfer Capability in Intersystem Transmission Lines // Proceedings of the International Conference EnergyCon 2016. – Belgium: April 4-8, 2016.
5. Glazunova A.M., Aksaeva E.S., Semshchikov E.S. Forecasting the Total Transfer Capability of Intersystem Lines for On-line Control of Electric Power System Operation // Proceedings of Workshop on control of transmission and distribution smart grid – GTDSG 16. – Прага: Октябрь 11-14, 2016. – P.455–460.

В прочих изданиях:

1. Аксаева Е.С. Вычисление свободной пропускной способности линии электропередачи в режиме реального времени // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9 – 13 ноября 2015, Иваново. Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – 2015. –Т1. – С. 27–32.
2. Аксаева Е.С., Глазунова А.М., Съемщиков Е.С. Мониторинг максимально допустимых перетоков заданных сечений для целей оперативного управления электроэнергетической системой // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы надежности систем энергетики. Сыктывкар, 2016. – Выпуск 67. – С.301–310.
3. Аксаева Е.С. Методика оценивания МДП контролируемого сечения ЭЭС // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02 – 06 октября 2017, Самара. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017.– Т2. – С.227–231.
4. 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.