

На правах рукописи



ХОХЛОВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**РОБАСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ НЕКВАДРАТИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в лаборатории энергетических систем Отдела энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской АН (ИСЭиЭПС УрО РАН).

Научный руководитель –

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Чукреев Юрий Яковлевич

Официальные оппоненты –

доктор технических наук, профессор
Бартоломей Петр Иванович

кандидат технических наук
Машалов Евгений Владимирович

Ведущая организация –

Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Защита состоится 7 апреля 2010 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-406.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ, 620002, г. Екатеринбург. (Факс (343)359-16-15, e-mail: khmic@yandex.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Автореферат разослан «__» марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.285.03
доктор технических наук



Зюзев А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Решение аналитических задач оперативного контроля и управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) требует использования оперативной модели энергосистемы, формируемой в темпе процесса по данным телеметрической информации о положении коммутационной аппаратуры и значениях параметров режима. Эта модель необходима для оптимизации и коррекции параметров режима ЭЭС, анализа ее надежности, проведения различных имитационных расчетов, связанных с проверкой тех или иных прогнозируемых ситуаций и т.д. Одним из этапов построения оперативной модели ЭЭС является оценивание ее состояния.

Для корректной статистической постановки задачи оценивания и последующего выбора процедуры ее реализации важно иметь представление о вероятностном распределении ошибок телеметрических измерений. Существующая теория оценивания состояния ЭЭС, берущая начало в 70-х годах прошлого века, построена на предположении, что ошибки измерений подчиняются нормальному закону распределения. К этому закону прибегали и прибегают для обоснования применения статистического критерия наименьших квадратов, лежащего в основе методов оценивания состояния ЭЭС. Однако, несмотря на математическую красоту, возможности практического использования такой постановки задачи оказываются чрезвычайно ограниченными. Нормальный закон распределения ошибок измерений на практике никогда не бывает корректным. Большие ошибки измерений, порождаемые более длинными “хвостами” функции плотности распределения, – наиболее очевидное, но не единственное свидетельство его невыполнения. Резкое искажение результатов оценивания состояния ЭЭС, вызываемое такими ошибками, приводит к неверному представлению о режиме функционирования ЭЭС и, следовательно, принятию неверных управляющих решений.

Неустойчивость процедуры наименьших квадратов к грубым ошибкам неверных измерений (НИ) является одной из причин, препятствующих широкому использованию результатов оценивания в практике оперативного управления ЭЭС. Поэтому на протяжении последних 40 лет разрабатываются и совершенствуются методы обнаружения и идентификации неверных измерений. Анализ современных разработок в этой области свидетельствует о тенденции ко все большему увеличению сложности (как алгоритмической, так и временной) процесса анализа достоверности измерений. Это усугубляется ростом размерности расчетных схем ЭЭС и количества обрабатываемых измерений. Растет понимание влияния других начальных допущений. Все это свидетельствует об актуальности вопроса пересмотра традиционной постановки задачи оценивания состояния ЭЭС с целью ее ориентации на получение оценок, устойчивых к нарушениям исходных допущений и оптимальных не только для заданной нормальной модели ошибки измерений, но и в некоторой ее окрестности, отвечающей неполным знаниям и представлениям о вероятностных свойствах телеметрических измерений. Такие оценки называют робастными.

Исследования непосредственно связаны с выполнением научных тем лаборатории энергетических систем Отдела энергетики ИСЭиЭПС КНЦ УрО РАН «Разработка интегрированной системы управления нормальными и аварийными режимами региональной электроэнергетической системы на базе технологий искусственного

интеллекта», гос.рег. №01.960.005932 (1996-2000 гг.), «Разработка методов исследования и обеспечения режимной надежности региональной электроэнергетической системы с применением новых информационных технологий», гос. рег. №01.200.116595 (2001-2005 гг.), «Методы изучения и моделирование надежности функционирования региональных энергетических систем с учетом их производственно-экономической организации», гос.рег. №0120.0603398 (2006-2010 гг.).

Цели и задачи исследования. Целью исследования является разработка научно-методических основ робастного оценивания состояния ЭЭС на основе неквадратичных критериев. Для этого поставлены следующие задачи:

1. Изучение влияния свойств ЭЭС и ее измерительной системы на возможность получения робастных оценок состояния ЭЭС.

2. Разработка теоретических подходов к построению и анализу робастных процедур оценивания состояния ЭЭС, малочувствительных к отклонениям от исходных предположений.

3. Разработка и исследование численных методов и алгоритмов робастного оценивания состояния ЭЭС, обеспечивающих быструю и надежную сходимость вычислительного процесса.

Методология исследований. Разработанные в диссертации научные положения, методы и модели базируются на теории оценивания состояния ЭЭС и теории робастной статистики, использовании прикладной теории множеств и графов, теории вероятностей, теории оптимизации, нелинейного программирования, методов имитационного моделирования, теории искусственных нейронных сетей. Достоверность научных результатов и теоретических выводов подтверждается вычислительными экспериментами для тестовых схем, в том числе путем сопоставления разработанных методов и моделей с широко применяемыми на практике, а так же опытом их использования при оперативном управлении режимами региональной ЭЭС.

Научная новизна. В ходе выполнения исследования в работе получены следующие новые результаты:

1. Разработаны и обоснованы количественные (топологические и алгебраические) показатели, характеризующие локальную избыточность измерений и локальную наблюдаемость параметров режима ЭЭС.

2. Получены необходимые и достаточные условия идентифицируемости НИ, определяемые уровнем локальной избыточности и задающие принципиальные ограничения на возможность идентификации плохих данных в составе измерений.

3. Предложена устойчивая модель ошибки измерения и обосновано применение неквадратичных критериев для робастного оценивания состояния ЭЭС.

4. Разработан математический аппарат анализа и оптимизации пороговых свойств робастных оценок. Получены условия их устойчивости к НИ в ситуации локальной избыточности измерений в ЭЭС.

5. Разработаны численные методы оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям, основанные на модификации метода Ньютона, в том числе с учетом ограничений в форме равенств.

6. Решена задача эффективного расчета оптимального шагового множителя, обеспечивающего высокую надежность и скорость сходимости численных методов при использовании критериев, имеющих кусочно-линейную функцию первой производной.

7. Предложены новые принципы организации вычислений по оцениванию состояния ЭЭС, ориентированные на применение нейроподобных вычислительных устройств параллельной архитектуры.

8. Разработаны вычислительные модели нейросетевых алгоритмов как с непрерывной, так и с дискретной динамикой. Для различных критериев оценивания доказаны их устойчивость и оптимальность решений.

Практическая значимость. Использование предложенной постановки задачи оценивания состояния ЭЭС и методов ее решения приводит к повышению надежности результатов оценивания состояния и, следовательно, качеству оперативной модели ЭЭС в условиях непредсказуемого поведения ошибок телеметрических измерений. При этом исключается необходимость разработки сложных алгоритмов идентификации НИ. Теоретические и методические положения робастного оценивания состояния ЭЭС могут быть использованы при решении других электроэнергетических задач, имеющих дело со случайной исходной информацией.

Использование результатов. Численные методы и алгоритмы робастного оценивания состояния ЭЭС легли в основу создания программы “PSSE”, предназначенной для оперативного расчета установившегося режима ЭЭС по данным телеметрических измерений, которая была внедрена в среду ОИК АСДУ региональной Коми энергосистемы (ныне филиал ОАО «СО ЕЭС» Коми РДУ).

Апробация. Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах, совещаниях и конференциях различного уровня как отечественных, так и зарубежных: межрегиональной с международным участием молодежной научной конференции «Севергеоэкотех» (г.Ухта, 1999, 2000, 2001, 2004, 2006); Коми республиканской молодежной конференции (г.Сыктывкар, 1997, 2000, 2004); Всероссийском научном семинаре с международным участием «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (г. Иркутск, 1998, г.Сыктывкар, 1999, г.Вышний Волочек, 2000, г.Казань, 2001, г.Туапсе, 2002, г.Вологда, 2007); Всероссийской научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность» (г. Екатеринбург, 2001); 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, конкуренция» (г.Екатеринбург, 2004); 3-й Международной научно-технической конференции «Энергосистема: управление, конкуренция, образование» (г. Екатеринбург, 2008); Межрегиональном научно-техническом семинаре «Оперативное управление электроэнергетическими системами – новые технологии» (г. Сыктывкар, 2003); V-й Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика» (г. Москва, 2003); Всероссийской конференции «Математические и информационные технологии в энергетике, экономике, экологии» (г. Иркутск, 2003); Международной конференции «2005 IEEE St.Petersburg Power Tech» (St.Petersburg, 2005).

Исследования в области анализа локальной избыточности измерений были поддержаны грантом УрО РАН для молодых ученых и аспирантов (2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 30 печатных работ, в том числе отдельные разделы в 3 коллективных монографиях и 3 статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 220 страниц текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня литературы из 204 наименований. Работа иллюстрирована 43 рисунками и 40 таблицами.

1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ РОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС

В первой главе дается развернутая характеристика проблемы обеспечения устойчивости результатов оценивания состояния ЭЭС к НИ. Описываются источники и разновидности НИ и их влияние на оценки наименьших квадратов. Как уже отмечалось, основным путем решения проблемы является в настоящее время идентификация НИ с целью их удаления из состава исходных данных. Поэтому детально рассматриваются свойства задачи идентификации НИ и анализируются существующие методы ее решения.

Пусть S – множество НИ, т.е. измерений, содержащих грубую ошибку, а T – множество остальных измерений:

$$S = \{\bar{v}_i \mid \bar{v}_i = v_i(x) + \xi_i + b_i\}, \quad T = \{\bar{v}_i \mid \bar{v}_i = v_i(x) + \xi_i\}, \quad (1)$$

где x – вектор истинных значений переменных состояния ЭЭС, в качестве которых обычно выступают модули и фазы узловых напряжений (полярная система координат) или их действительные и мнимые составляющие (прямоугольная система координат), v_i – i -е измерение, $v_i(x)$ – нелинейная функция зависимости измеряемого параметра режима от вектора x , ξ_i – нормально распределенная ошибка с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_i^2 , b_i – величина грубой ошибки. Тогда задачу обеспечения устойчивости оценок состояния ЭЭС к НИ можно свести к задаче разделения множества всех измерений на S и T . Существование решения задачи зависит от уровня избыточности измерений и характеризуется понятием идентифицируемость НИ. Под *идентифицируемостью НИ* в работе понимается совокупность условий, определяющих возможность отделения множества неверных измерений S от множества хороших измерений T при любых сочетаниях грубых ошибок b_i .

Локальная избыточность измерений. В силу сетевой специфики ЭЭС избыточность измерений имеет существенно локальный характер. Ключевой характеристикой локальной избыточности измерений является критическая группа. *Критическая группа измерений* определяется в работе как множество измерений, удаление которых из вектора исходных данных приводит к уменьшению ранга матрицы Якоби $H = \partial v(x)/\partial x$ на единицу, при этом ни одно из его подмножеств таким свойством не обладает. В рамках топологического анализа при отсутствии избыточных измерений узловых мощностей критическая группа представляет собой разрез графа измерений, построенного на графе сети (рис.1). В общем случае, с произвольным составом измерений, критической группе отвечает коцикл матроида, моделирующего структуру измерительной системы.

В работе предложены так же количественные показатели, характеризующие избыточность измерений (наблюдаемость системы) на локальном уровне. В связи с различной природой факторов, влияющих на уровень избыточности (наблюдаемости), они разделены на топологические алгебраические.

Уровень Γ_i топологической наблюдаемости параметра режима - наименьшее число измерений, при удалении которых параметр становится топологически ненаблюдаемым. *Уровень γ_i топологической избыточности измерения* - наименьшее число измерений, при удалении которых измерение становится топологически избыточным. Нетрудно убедиться, что для измеряемого параметра выполняются соотношение:

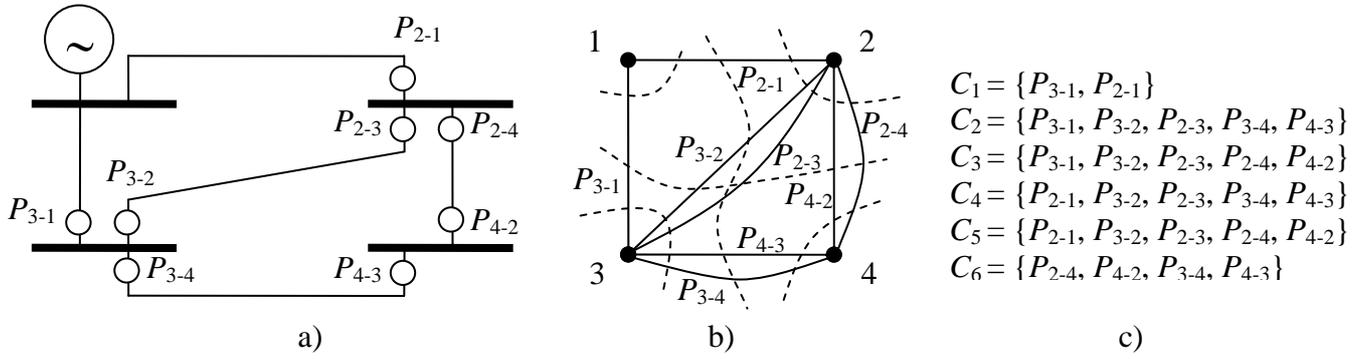


Рис.1. К определению критических групп измерений: а) схема сети с расстановкой измерений, б) разрезы на графе измерений, в) критические группы.

$$\gamma_i = \Gamma_i - 1 = p_i - 1, \quad (2)$$

где p_i - размерность наименьшей критической группы, включающей i -е измерение.

Уровень κ_i алгебраической избыточности i -го измерения характеризует степень участия избыточных измерений в определении оценки i -го измеряемого параметра и, тем самым, может служить оценкой качества топологической избыточности:

$$\kappa_i = K_i - 1 = 1/a_i - 1, \quad (3)$$

где K_i - уровень алгебраической наблюдаемости измеряемого параметра, a_i - диагональный элемент матрицы $A = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$, $R = \text{diag}(\sigma_i^2)$.

Показано, что алгебраические показатели, как и топологические, обладают важным свойством монотонности, т.е. при дублировании i -го измерения $\gamma_i := \gamma_i + 1$ и $\kappa_i := \kappa_i + 1$. Для критического измерения $\gamma_i = 0 \Leftrightarrow \kappa_i = 0$.

Условия идентифицируемости НИ. Уровень локальной избыточности измерений задает принципиальные ограничения на возможность идентификации НИ. Известно (К.Клементс, П.Дэйвис), что НИ неидентифицируемы, если их число в какой-либо критической группе размерности p больше, чем $p - 2$. Данное условие можно рассматривать как необходимое условие идентифицируемости НИ. В работе получено достаточное условие топологической идентифицируемости.

Утверждение 1. НИ топологически идентифицируемы, если ни в одной критической группе их число не превышает половины числа измерений, образующих эту группу, а именно, если выполняется условие

$$f_i \leq [(p_i - 1)/2], \quad (5)$$

где f_i - число НИ в i -й критической группе размерности p_i , $[\cdot]$ - целая часть числа.

Если число f_i в какой-либо i -й критической группе такое, что

$$[(p_i - 1)/2] < f_i \leq p_i - 2, \quad (6)$$

возможность идентификации НИ зависит от сочетания величин грубых ошибок в них. В этом случае следует говорить об *условной идентифицируемости* НИ. В схеме на рис. 1 условию (5) удовлетворяют одиночные НИ $P_{3-2}, P_{2-3}, P_{3-4}, P_{4-3}, P_{2-4}, P_{4-2}$ и комбинация $\{P_{2-3}, P_{3-2}\}$. Условно идентифицируемыми согласно (6) являются комбинации $\{P_{2-4}, P_{4-2}\}$, $\{P_{3-4}, P_{4-3}\}$, $\{P_{2-4}, P_{3-4}, P_{3-2}\}$ и т.д. При возникновении грубой ошибки в измерениях P_{3-1} или P_{2-1} с $\gamma < 2$, идентифицировать НИ не возможно.

Полученное в работе условие алгебраической идентифицируемости НИ определяет предельную вероятность идентификации ошибочных измерений в зависимости от величин их грубых ошибок и алгебраической наблюдаемости.

Утверждение 2. Для заданной вероятности α ошибки I рода вероятность идентификации i -го НИ ($\bar{v}_i \in S$), содержащего ошибку величиной b_i/σ_i , вместе с другими НИ множества S не превышает значения P_i , определяемого согласно выражению:

$$N_{P_i} = \frac{|b_i|}{\sigma_i} \sqrt{\frac{K_i(T)}{K_i(T)+1}} - N_{1-\alpha/2}, \quad (7)$$

где $K_i(T)$ – уровень алгебраической наблюдаемости измеряемого параметра, определяемый на множестве T хороших измерений, $N_{1-\alpha/2}$, N_{P_i} – квантили стандартного нормального распределения $N(0,1)$.

Чем меньше уровень алгебраической избыточности измерений параметров режима, тем меньше вероятность обнаружения и идентификации грубых ошибок в них. Низкая алгебраическая избыточность характерна в первую очередь для измерений перетоков мощности в ветвях сети, имеющих сравнительно малое сопротивление, а так же измерений с относительно высокой точностью.

Анализ существующих методов. Определение условий разрешимости задачи идентификации НИ позволило выполнить анализ и дать критическую оценку идентифицирующих способностей существующих методов ее решения, как уже применяемых, так и разрабатываемых. Согласно предложенной в работе классификации все методы поделены на три группы (рис.2).

Установлено, что возможности идентификации НИ, заложенные в избыточной системе измерений и определяемые условиями идентифицируемости НИ, поисковыми методами достоверизации измерений, основанными на проверке простой статистической гипотезы, в полной мере не реализуются. Разработка более эффективных методов идентификации множественных НИ возможна лишь за счет привлечения комбинаторных методов, реализующих проверку сложных гипотез. Анализ последних выявил несостоятельность осуществляемого некоторыми авторами механического (прямого) переноса методов типа LMS и LTS, разработанных в теории робастной регрессии, на задачу идентификации НИ в ЭЭС. Развиваемый в ряде работ оптимизационный подход на основе критерия максимальной согласованности позволяет достичь наилучших результатов, однако характеризуется высокой вычислительной сложностью, несовместимой с работой в режиме реального времени.

Отмечается общий недостаток всех методов идентификации. По определению они исходят из жесткого деления измерений на множество S плохих и множество T хороших, ошибки которых имеют нормальное распределение. При небольших отклонениях от нормальности (ошибки квантования и др.) истинный уровень значимости статистических критериев может существенно отличаться от предполагаемого, и вместо обычно полагаемого $\alpha = 0.27\%$ достигать десятков процентов, что приводит к существенному увеличению вероятности браковки достоверных измерений. Подтверждением служат приведенные в работе результаты статистических испытаний некоторых методов при моделировании различных отклонений от предположений (наличие ошибок квантования, ошибки в задании дисперсии, ошибки в параметрах схемы замещения ЭЭС).

Обзор работ в области неквадратичного подхода выявил отсутствие содержательной теории, обосновывающей его применение, относительно частный характер проводимых исследований, наличие целого ряда нерешенных проблем вычисли-

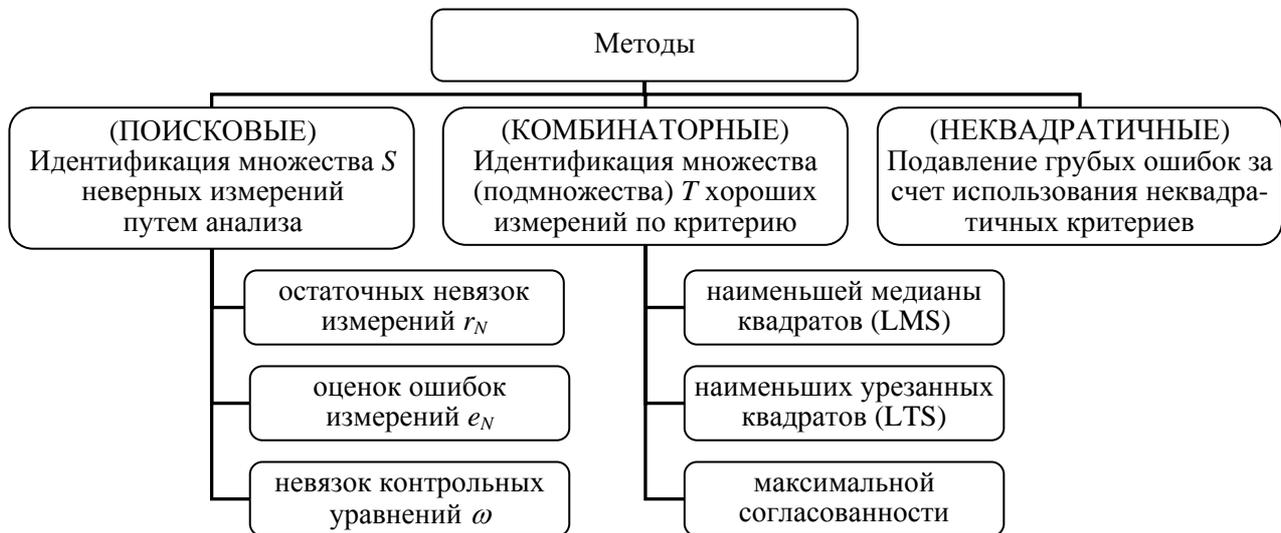


Рис.2. Основные методы обеспечения устойчивости результатов оценивания состояния ЭЭС к НИ.

тельного плана. Предложенный почти 40 лет назад из интуитивных соображений Х.Мерриллом и Ф.Швеппе он не получил своего развития и в свое время был признан малопригодным для оценивания состояния ЭЭС. Между тем идея использования критериальных функций, менее быстро растущих, чем квадратичная, имеет прямую связь с теорией робастной статистики, развитие которой лишь сравнительно недавно достигло уровня практического применения.

2. НЕКВАДРАТИЧНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС

Во второй главе излагается *робастная* постановка задачи оценивания состояния ЭЭС, основой которой является теория робастной статистики, а именно минимаксная теория П.Хьюбера. Используя данную теорию, строятся оценки, устойчивые к нарушениям предполагаемого закона распределения ошибок. Фактически это приводит к задаче оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям, которые таким образом получают свое теоретическое обоснование. Особое внимание уделяется установлению пороговых свойств неквадратичных оценок, а так же приемов их улучшения в условиях неравномерной локальной избыточности измерений в ЭЭС

Устойчивая модель ошибки измерения. Когда известно распределение ошибок измерений, тогда наилучшей в известном смысле оценкой ξ вектора состояния ЭЭС является та, при которой достигается максимум плотности вероятностей вектора $\xi = \bar{v} - v(x)$. Но найти вероятностные распределения ошибок измерений для огромного числа эксплуатируемых в ЭЭС приборов не представляется возможным. Однако можно выделить некоторую окрестность $\mathcal{F} = \{f(\xi)\}$ статистической модели ошибки, которая включает как идеальную модель, так и отклонения от нее.

В работе получено аналитическое выражение для асимптотической ковариационной матрицы ошибок оценки состояния ЭЭС, когда используемый гипотетический закон распределения ошибок измерений $f_T(\xi)$ не совпадает с фактически реализуемым $f_0(\xi)$. В свернутом виде

$$\text{cov}(\delta_x) = V(f_T, f_0) \cdot (H^T R^{-1} H)^{-1} \quad (8)$$

оно представляет собой произведение двух сомножителей, из которых только скаляр

$V(f_\Gamma, f_0)$ зависит от плотностей $f_\Gamma(\xi)$ и $f_0(\xi)$. Это позволяет корректным образом перенести теорию Хьюбера, разработанную для одномерных задач, на оценку вектора состояния ЭЭС, рассматривая лишь величину $V(f_\Gamma, f_0)$. Согласно Хьюберу выбор гипотетической плотности $f_\Gamma(\xi) \in \mathcal{F}$ осуществляется исходя из наилучшего, что может произойти во всей окрестности с $V(f_\Gamma, f_0)$:

$$f_\Gamma(\xi) = \arg \min_{f_\Gamma \in \mathcal{F}} \max_{f_0 \in \mathcal{F}} V(f_\Gamma, f_0). \quad (9)$$

Использование этого распределения обеспечивает минимальную потерю качества оценки состояния ЭЭС при самой неблагоприятной истинной плотности ошибок измерений. В работе плотность (9) называется *устойчивой в семействе \mathcal{F}* .

Анализ нескольких семейств \mathcal{F} , для которых известны устойчивые плотности, показал, что условиям образования ошибок, характерных для измерительных систем в ЭЭС, хорошо отвечает семейство ε -загрязненных плотностей:

$$\mathcal{F} = \{f : f(\xi) = (1 - \varepsilon)g(\xi) + \varepsilon h(\xi)\}, \quad (10)$$

где $g(\xi)$ – предполагаемая идеальная плотность распределения ошибок, ε - доля данных, содержащих ошибки, которые имеют произвольное распределение $h(\xi)$. Если в качестве идеального предполагать нормальный закон распределения, тогда оптимальная в минимаксном смысле плотность:

$$f_\Gamma(\xi) = \begin{cases} \frac{1 - \varepsilon}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{a^2 - a}{\sigma}|\xi|}, & \text{при } |\xi| \geq a\sigma, \\ \frac{1 - \varepsilon}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}}, & \text{при } |\xi| < a\sigma, \end{cases} \quad (11)$$

где величина a зависит от ε .

На рис.3 на вероятностной бумаге для нормального распределения изображено эмпирическое распределение небаланса активной мощности в одном из узлов расчетной схемы Коми ЭЭС, который имеет измерения \bar{P}_i мощности по всем присоединениям I :

$$\Delta P = \sum_{i \in I} \bar{P}_i = \sum_{i \in I} P_i + \sum_{i \in I} \xi_i = \sum_{i \in I} \xi_i. \quad (12)$$

По характеру распределения небаланса можно косвенно судить о распределении ошибок измерений, входящих в уравнение (12). Выборка объема 17280 (суточные данные измерений с интервалом в 5 сек) дает картину, крайне похожую на ту, которая получается для распределения (11) с 1% загрязнением. Заметим, что в рассматриваемый период времени измерения не содержали грубых ошибок. Таким образом, даже при отсутствии сбояв в измерениях модель ошибки (10) оказывается лучше, чем традиционная нормальная модель.

Робастные M-оценки. Оценка вектора состояния ЭЭС, вычисляемая методом максимума правдоподобия, находится путем минимизации выражения:

$$-\sum_{i=1}^m \ln f_\Gamma(\bar{v}_i - v_i(x)) = \sum_{i=1}^m \rho\left(\frac{\bar{v}_i - v_i(x)}{\sigma_i}\right), \quad (13)$$

где $\rho(\cdot) = -\ln f_\Gamma(\cdot)$, m – число измерений. Оценки такого типа называются *M-оценками* (оценками максимального правдоподобия при нестандартных условиях).

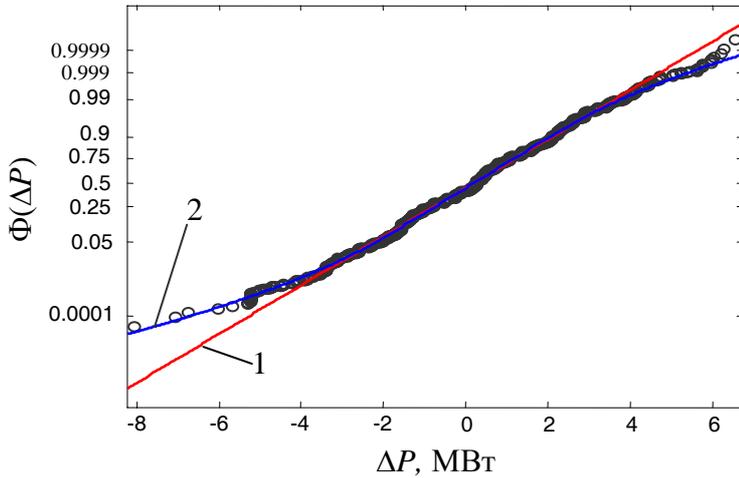


Рис.3. Функция распределения небаланса активной мощности в узле, обусловленного ошибками измерений, на нормальной вероятностной бумаге. Кружки – эмпирические данные, 1 – нормальное распределение, 2 – устойчивое распределение (11) при $\varepsilon = 0.01$.

Подстановка распределения (11) приводит к неквадратичной критериальной функции (рис.4):

$$\rho(r) = \begin{cases} r^2/2, & \text{при } |r| \leq a, \\ |r| \cdot a - a^2/2, & \text{при } |r| > a, \end{cases} \quad (14)$$

которая имеет ограниченную функцию производной $\psi = \rho'$ и определяет M -оценку Хьюбера. Регулируя значение a , можно влиять на фильтрующую способность метода, выбирая между эффективностью оценок и их чувствительностью к большой ошибке. Предельным случаем оценки (14) является традиционная оценка наименьших квадратов, $\rho(r) = r^2/2$, при $a \rightarrow \infty$. Она имеет неограниченную ψ -функцию и является абсолютно неробастной. Наиболее ограниченным вариантом является оценка наименьших модулей, $\rho(r) = |r|$, при $a \rightarrow 0$.

Поскольку любая M -оценка с ограниченной ψ -функцией является робастной, в работе рассмотрены так же другие неквадратичные функции. Особый интерес представляют две из них (рис.4): функция Меррилла-Швеппе

$$\rho(r) = \begin{cases} r^2/2, & \text{при } |r| \leq a, \\ 2a^{3/2} \sqrt{|r|} - 3a^2/2, & \text{при } |r| > a \end{cases} \quad (15)$$

и предложенная в работе функция Стьюдента

$$\rho(r) = \frac{a}{2} \ln \left(\frac{a + r^2}{a} \right). \quad (16)$$

Их применение находит свое теоретическое обоснование в том факте, что ψ -функция оценки максимального правдоподобия для распределений ошибок с более толстыми, чем у (11), “хвостами” убывает к нулю. В условиях локальной избыточности измерений в ЭЭС, уже небольшое количество НИ может расцениваться как следствие тяжелых “хвостов” распределений, порождающих их.

В табл.1 вычислены значения настроечных параметров, обеспечивающие оценкам при нормально распределенных ошибках асимптотическую эффективность 95%.

Таблица 1. Параметры настройки M -оценок

Хьюбер (14)	Меррилл-Швеппе (15)	Стьюдент (16)
$a = 1.345$	$a = 1.637$	$a = 5.69$

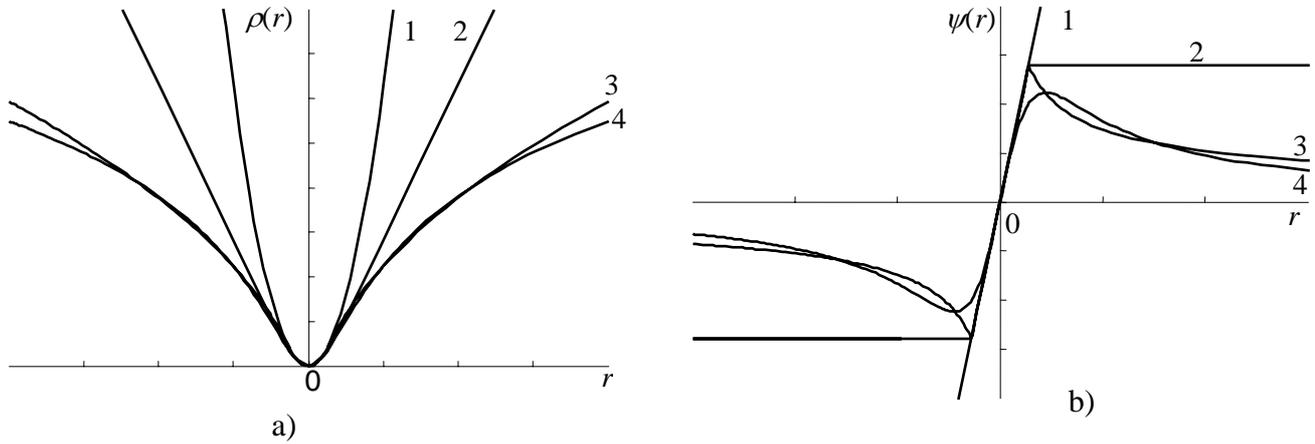


Рис.4 M -оценки: 1 – наименьших квадратов, 2 – Хьюбера, 3 – Меррилла-Швеппе, 4 – Стьюдента.

Пороговые свойства M -оценок. Для любой оценки существует предел отклонений от предполагаемого распределения ошибок, при достижении которого, она становится неустойчивой. В теории робастной статистики количественной характеристикой предела является *пороговая точка*, определяемая как наименьшая доля недостоверных данных, которая может вызвать произвольно большое смещение оценки. В работе обоснована несостоятельность использования этого показателя в условиях оценивания состояния ЭЭС, где избыточность измерений имеет существенно локальный характер. Путем раскрытия понятия пороговой точки и ее разглобализации было получено условие локальной устойчивости робастных M -оценок.

Утверждение 3. M -оценка, определяемая функцией (14), (15) или (16), устойчива к множеству E неверных измерений при любых сочетаниях грубых ошибок в них, если для любой j -й критической группы C_j выполняется условие:

$$\frac{\sum_{i \in C_j \cap E} |h_i \beta_j|^k}{\sum_{i \in C_j} |h_i \beta_j|^k} < \frac{1}{2}, \quad (17)$$

Здесь h_i – i -я строка матрицы $R^{-1/2} H$; β_j – ненулевой вектор, такой, что $h_i \beta_j \neq 0$ для всех $i \in C_j$ и $h_i \beta_j = 0$ для всех $i \notin C_j$; k – коэффициент вариации ρ -функции, значение которого для (14), (15) и (16) соответственно равно 1, $1/2$ и 0.

При $k = 0$ условие (17) в точности совпадает с условием (5) идентифицируемости НИ. Отсюда следует, что процедура оценивания состояния ЭЭС с использованием невыпуклой неквадратичной функции, подобной функции Стьюдента (16), обладает максимальными идентифицирующими способностями. При использовании функций (14) или (15) предел по устойчивости определяется алгебраическими свойствами матрицы $R^{-1/2} H$, следовательно, зависит не только от структуры измерительной системы, но и параметров схемы замещения ЭЭС и точности измерений.

Для наглядного представления соотношения робастных свойств M -оценок в работе предложена *диаграмма устойчивости* (рис.5). На ней выделяются области содержащие комбинации НИ, удовлетворяющие необходимому условию идентифицируемости (6), и комбинации, удовлетворяющие достаточному условию (5). Если на диаграмме очертить комбинации НИ, к которым устойчива оценка Хьюбера, то получаемая область оказывается смещенной относительно центра, т.е. оценка может

быть неустойчива к некоторым идентифицируемым НИ (даже одиночным), но является устойчивой к другим комбинациям НИ. Чем больше неоднородность параметров схемы замещения ЭЭС и неравноточность измерений, тем больше смещение. Оценка Меррилла-Швеппе менее подвержена влиянию свойств расчетной модели ЭЭС.

Исследование нескольких схем с различными моделируемыми составами измерений, их точностью и избыточностью показали, что площади областей устойчивости M -оценок Стьюдента и Меррилла-Швеппе мало различаются между собой. Меньшую область имеет оценка Хьюбера. Сильной зависимости площади областей от режима функционирования ЭЭС не обнаружено.

Улучшение пороговых свойств оценки Хьюбера. Вероятность появления в составе измерительной информации одиночных НИ выше, чем двойных и т.д. Поэтому при оценивании состояния ЭЭС целесообразнее ориентироваться на применение невыпуклых функций типа Стьюдента, область устойчивости которой совпадает с областью идентифицируемости НИ, расположенной в центре диаграммы устойчивости. В тоже время, с вычислительной точки зрения, предпочтительнее использовать выпуклую функцию, определяющую оценку Хьюбера. Вскрытие ее пороговых свойств в виде условия (17) открывает возможности по ее улучшению. Один из вариантов, представленный в работе, – масштабирования строк h_i матрицы $R^{-1/2} H$ с помощью положительных весов w_i так, что условие устойчивости (17) принимает вид:

$$\sum_{i \in C_j \cap E} w_i |h_i \beta_j| < \sum_{i \in C_j \setminus E} w_i |h_i \beta_j|. \quad (18)$$

Это соответствует замене функции оптимальности оценки (13) на функцию вида:

$$\sum_{i=1}^m w_i^{1+\alpha} \rho \left(\frac{\bar{v}_i - v_i(x)}{\sigma_i w_i^\alpha} \right), \quad (19)$$

где параметр α рекомендуется брать равным 0 или 1.

В работе поставлена задача нахождения весов w_i , минимизирующих смещение области устойчивости оценки Хьюбера и максимизирующих область покрытия вероятных комбинаций НИ. Результатом ее решения явились веса:

$$w_j = 1 - \max_k \frac{|h_j \beta_k|}{\sum_{i=1, i \neq j}^s |h_{(i)} \beta_k| + |h_j \beta_k|}, \quad (20)$$

где $|h_{(1)} \beta_k| \leq \dots \leq |h_{(j-1)} \beta_k| \leq |h_{(j+1)} \beta_k| \leq \dots \leq |h_{(p_k)} \beta_k|$, $s = [p_k/2] + 1$, p_k – размерность



Рис.5. Диаграмма устойчивости

k -й критической группы. Рассмотрены так же другие способы определения весов. Исследования показали, что использование весов (20) позволяет достичь значительного улучшения пороговых свойств оценки Хьюбера. Область ее устойчивости превышает таковую для оценки Стьюдента, а при отсутствии избыточных измерений инъекций оценка (19) устойчива к любым идентифицируемым НИ. Вместе с тем отмечается трудоемкость расчета весов по формуле (20) и обосновывается применение менее робастных, но более пригодных для вычисления весов:

$$w_j = \sqrt{1 - a_j} \quad (21)$$

где a_i – диагональный элемент матрицы $A = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$.

Представлены многочисленные результаты оценивания состояния ЭЭС, полученные как для тестовых примеров, приводимых в литературе, так и путем статистических испытаний, демонстрирующие высокое качество оценки вида (19) с выпуклой ρ -функцией Хьюбера и весами (21) при различных нарушениях исходных предположений, в том числе грубых ошибках измерений. (Для повышения точности, получаемое решение уточнялось оцениванием с невыпуклой ρ -функцией). Традиционный подход, комбинирующий оценивание состояния ЭЭС по критерию наименьших квадратов с различными методами идентификации НИ (см. рис.2), показывал часто худшие результаты.

3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС ПО НЕКВАДРАТИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

В третьей главе исследуются вычислительные свойства задачи робастного оценивания состояния ЭЭС:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \rho\left(\frac{\bar{v}_i - v_i(x)}{\sigma_i}\right) \rightarrow \min \quad (22)$$

(для простоты полагаем, что $w_i = 1$) и разрабатываются численные методы и алгоритмы ее решения. Отмечается, что при замене сильно выпуклой квадратичной функции оптимальности оценок на неквадратичную на первый план выступают вопросы обеспечения надежной и быстрой сходимости вычислительного процесса. Показано, что широко применяемый для оценивания состояния ЭЭС метод Ньютона (Гаусса-Ньютона) не может использоваться для минимизации целевой функции в новой постановке. В работе представлена модификация метода Ньютона, а так же выполнено его развитие с точки зрения повышения численной устойчивости, в частности, при наличии в сети транзитных узлов. Приводятся результаты численного исследования сходимости и вычислительной эффективности разработанных методов.

Модифицированный метод Ньютона. Разработанный численный метод решения задачи оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям, представляет собой модификацию метода Гаусса-Ньютона в комбинации с расчетом оптимального шагового множителя. Итерационный процесс следующий (k – номер итерации):

$$G_k = p_k \nabla F(x_k), \quad (23)$$

$$x_{k+1} = x_k + t_k p_k, \quad (24)$$

где $\nabla F(x_k) = -H_k^T R^{-1/2} \psi(r_k)$ – градиент функции (22), $r_k = R^{-1/2}(\bar{v} - v(x_k))$ – вектор невязок измерений, $H_k = \partial v(x_k) / \partial x_k$ – матрица Якоби для $v(x)$, p_k – вектор направления спуска, t_k – длина шага, G_k – положительно определенная матрица.

Модификация заключается в замене функции второй производной $d(r) = \rho''(r)$ неквадратичного критерия ее положительной аппроксимацией $\tilde{d}(r)$ и интерпретируется как один из способов регуляризации. Тогда как в методе Ньютона в качестве G_k используется матрица Гессе $\nabla^2 F(x_k) = H_k^T R^{-1} D_k H_k - \partial^2 v(x_k) / \partial x_k^2 R^{-1/2} \psi(r_k)$, где $D_k = \text{diag}(d(r_k))$, а в методе Гаусса-Ньютона – матрица $H_k^T R^{-1} D_k H_k$, в модифицированном методе применяется матрица $H_k^T R^{-1} \tilde{D}_k H_k$. Для функции Хьюбера (14) диагональные элементы матрицы \tilde{D}_k вычисляются по формуле:

$$\tilde{d}(r) = \begin{cases} 1, & \text{при } |r| \leq a, \\ \alpha \cdot a/r, & \text{при } |r| > a, \end{cases} \quad (25)$$

Выбор $0 < \alpha \leq 1$ обеспечивает положительную определенность матрицы G_k , которая в методе Ньютона (Гаусса-Ньютона) вне малой области окрестности решения x^* сингулярная, или имеет отрицательные собственные числа. В работе обосновывается целесообразность пересчета коэффициента α так, чтобы $\alpha \rightarrow 0$ при $x_k \rightarrow x^*$:

$$\alpha_k = \alpha_0 e^{-k/T}, \quad (26)$$

Значения для постоянных α_0 и T рекомендуется брать равными $\alpha_0 = 0.5$, $T = 2 \div 5$.

Определение оптимального шага t_k , т.е. такого шага, при котором на каждой итерации достигается максимальное убывание целевой функции вдоль p_k , требует решения задачи минимизации одномерной функции:

$$\varphi(t) = F(x_k + t p_k) = \sum_{i=1}^m \rho(r_i(x_k + t p_k)). \quad (27)$$

Разработанная процедура основана на том, что функция невязок $r_i(t) = r_i(x_k + t p_k)$ достаточно хорошо описывается полиномом второй степени (при оценивании состояния ЭЭС в прямоугольной системе координат для измерений мощности это описание точное), а функция Хьюбера $\rho(r_i)$ является кусочной, меняющая вид зависимости в точках $r_i(t) = \pm a$ с квадратичной на линейную, и наоборот. Таким образом, одномерная функция представляется на каждом шаге итерационного процесса полиномом четвертой степени с кусочно-постоянными коэффициентами $K = K(t)$. Определение t_k осуществляется путем решения уравнения:

$$\varphi'(t) = K_1 t^3 + K_2 t^2 + K_3 t + K_4 = 0. \quad (28)$$

Гиперповерхности $r_i(t) = \pm a$ делят пространство состояний на области, в каждой из которых значения коэффициентов постоянные. Обозначим множество из N точек пересечения траектории спуска с границами этих областей как

$$\Gamma = \{\tau_j \mid r_i(x_k + \tau_j p_k) = \pm a, i = 1, \dots, m\}, \quad j = 1, \dots, N. \quad (29)$$

и будем считать, что оно упорядочено: $0 \leq \tau_1 \leq \tau_2, \dots, \leq \tau_N$. Нахождение корня уравнения (28) состоит из двух этапов. На первом этапе локализуется область, в которой лежит минимум функции (27). Начиная с первой точки τ_1 , обновляются коэффициенты K , и проверяется знак производной $\varphi'(\tau_j)$. Если для некоторого τ_l производная сменила знак $\varphi'(\tau_l) > 0$, то минимум функции лежит в интервале $[\tau_{l-1}, \tau_l]$. Приравняв производную $\varphi'(t)$ к нулю, на втором этапе находятся корни кубического уравнения (28). Наименьший действительный, положительный корень принимается за искомый t_k .

В работе дается обобщение метода на оценивание состояния ЭЭС с невыпук-

лыми ρ -функциями. Для этого предложена *обобщенная неквадратичная функция*, имеющая кусочно-линейную функцию производной $\psi(r) = \rho'(r)$. Увеличение количества точек (29), приводит к некоторому возрастанию трудоемкости расчета t_k , однако, оно практически не сказывается на общих затратах выполнения одной итерации. Следует подчеркнуть, что при использовании невыпуклых ρ -функций метод сходится к ближайшей точке минимума, а потому не гарантирует оптимум целевой функции. В локальных минимумах робастность M -оценок не обеспечивается. Рассмотрено несколько вариантов решения проблемы глобального минимума. Наиболее практичный основан на использовании инерционности процесса изменения режима ЭЭС. При высоком темпе поступления телеметрической информации вектор x состояния ЭЭС за период опроса датчиков не успевает сильно измениться. Если оценка состояния, полученная на данных предыдущего среза, робастная, то она будет хорошим начальным приближением для оптимума целевой функции на порции новых данных.

Сравнение с другими методами. В работе реализованы и исследованы альтернативные методы решения задачи оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям. Первые три из них это применяемые в теории робастной регрессии метод с модифицированными весами (wGN) и метод с модифицированными невязками (rGN), а так же предложенный для оценивания состояния ЭЭС в 1971 г. метод Меррилла-Швейппе (71GN). Анализ показал, что все они являются модификациями метода Гаусса-Ньютона, но в отличие от метода (α GN), представленного выше, используют более грубую аппроксимацию функции $d(r) = \rho''(r)$ и единичный шаг ($t_k = 1$), который может приводить к расходимости итерационного процесса. Сравнительные исследования показали, что предложенная модификация обеспечивает существенно более (в 5-10 раз) высокую скорость сходимости, а регулировка шага – надежность сходимости в широкой области определения переменных состояния.

Так же исследованы модификации метода Ньютона, предлагаемые современной теорией оптимизации, в которых положительная определенность итерационной матрицы G_k достигается за счет ее диагонального усиления (метод GN/e) или применения модифицированного разложения Холесского (методы N/m и GN/m). Они значительно уступают по скорости сходимости предложенному методу, между тем, выявлены ситуации, когда имеет смысл переключаться с модифицированного метода α GN на метод Ньютона с модифицированным разложением Холесского (N/m).

В качестве иллюстрации в табл.2 приведено число итераций сходимости рассмотренных методов при оценивании состоянии четырех тестовых схем ЭЭС по критерию Хьюбера. Размерность схем составляет от 30 до 444 узлов при числе измерений, соответственно, от 109 до 1891, из которых около 5% содержат грубые ошибки. Методы wGN/t, rGN/t и 71GN/t отличаются от своих оригинальных версий регулировкой длины шага по методике, изложенной выше. Расчет шага выполнялся так же в методах N/m, GN/m и GN/e.

Улучшение обусловленности метода. Плохая обусловленность итерационной матрицы G_k может приводить к ошибкам в определении направления спуска и, следовательно, к замедлению сходимости метода или даже к его отказу. Последнюю ситуацию можно всегда избежать, используя численно устойчивую процедуру факторизации, генерирующую положительно определенную матрицу $LDL^T = G_k + E$, где E – неотрицательная диагональная матрица. Тем не менее, устранение причин плохой

Таблица 2 – Соотношение сходимости различных методов (число итераций)

Метод	Схема ЭЭС			
	IEEE-30	IEEE-118	IEEE-300	TVA-444
α GN	8	12	14	16
N/m	49	96	465	1055
GN/m	47	94	468	604
GN/e	44	101	424*	252
71GN	495	3154	Расходится	Расходится
wGN	196	52	Не сходится	Не сходится
rGN	902*	>5000	>5000	>5000
71GN/t	57	19	58*	34*
wGN/t	30	29	73	60*
rGN/t	966	>5000	3525*	>5000

* условия критериев останова выполнены, но минимум не достигнут.

обусловленности всегда положительно сказывается на скорости сходимости итерационного процесса. Одна из распространенных причин плохой обусловленности матрицы G_k – представление детерминированных компонент исходной информации (нулевых инъекций транзитных узлов) как псевдоизмерений, и введение их в целевую функцию (22) с большим весом. Более естественным является обработка их в виде ограничения в форме равенств:

$$c(x) = 0. \quad (30)$$

Отмечается, что при расчете в прямоугольных координатах уравнения (30) эффективнее задавать в форме баланса активных и реактивных токов: $I_a(U', U'') = 0$, $I_r(U', U'') = 0$. В этом случае минимизация (22) выполняется при линейных ограничениях.

В работе представлено четыре метода решения задачи с ограничениями (30). Все они различаются видом системы линейных уравнений, решаемой на каждом шаге итерационного процесса:

(метод функции Лагранжа)

$$\begin{bmatrix} H_k^T R^{-1} \tilde{D}_k H_k & C_k^T \\ C_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ -\lambda_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_k^T R^{-1/2} \psi(r(x_k)) \\ -c(x_k) \end{bmatrix}, \quad (32)$$

(метод модифицированной функции Лагранжа)

$$\begin{bmatrix} H_k^T R^{-1} \tilde{D}_k H_k + C_k^T R_c^{-1} C_k & C_k^T \\ C_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ -\lambda_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_k^T R^{-1/2} \psi(r(x_k)) - C_k^T R_c^{-1} c(x_k) \\ -c(x_k) \end{bmatrix}, \quad (33)$$

(метод расширенной системы Хачтела)

$$\begin{bmatrix} \tilde{D}_k^{-1} & R^{-1/2} H_k & 0 \\ H_k^T R^{-1/2} & 0 & C_k^T \\ 0 & C_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{k+1} \\ p_k \\ \lambda_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{D}_k^{-1} \psi(r_k) \\ 0 \\ -c(x_k) \end{bmatrix}, \quad (34)$$

(блочный метод расширенной системы)

$$\begin{bmatrix} H_a^T R_a^{-1} \tilde{D}_a H_a & H_b^T R_b^{-1/2} & C^T \\ R_b^{-1/2} H_b & -\tilde{D}_b^{-1} & 0 \\ C & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ -\mu_b \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_a^T R_a^{-1/2} \psi(r_a) \\ \tilde{D}_b^{-1} \psi(r_b) \\ -c(x) \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где λ и μ – вектора неопределенных множителей Лагранжа, R_c^{-1} – диагональная мат-

рица штрафных коэффициентов, $C = \partial c(x)/\partial x$ – матрица Якоби ограничений. В последнем методе предварительно выполняется разбиение вектора измерений на v_a и v_b . В состав вектора v_a включаются все измерения перетоков мощности и напряжений, а так же те ограничения (в виде квадратичного штрафа) и измерения инъекций, которые обеспечивают полный ранг матрицы $H_a^T R_a^{-1} \tilde{D}_a H_a$.

Для расчета оптимального шага t_k используется функция выигрыша:

$$\phi = \sum_{i=1}^m \rho(r_i) + \eta \sum_{i=1}^s |c_i(x)|. \quad (36)$$

где параметр штрафа $\eta = q \|\lambda_{k+1}\|_\infty$, $q > 1$, s – число ограничений. Ее одномерная оптимизация выполняется аналогично поиску минимума функции (27).

В работе исследуются особенности систем линейных уравнений (32)-(35), а так же приводятся алгоритмы их решения. Результаты экспериментальных расчетов с использованием различных тестовых схем ЭЭС показали, что обработка нулевых инъекций транзитных узлов в виде ограничений обеспечивает точное выдерживание их значений без ухудшения обусловленности задачи. Несколько лучшей численной устойчивостью обладает метод расширенной системы Хачтела. С точки зрения затрат машинного времени наиболее эффективным является метод функции Лагранжа, трудоемкость решения системы (32) в 2-3 раза ниже, чем системы (34). Оценивание состояния ЭЭС на основе модифицированной функции Лагранжа или блочного метода расширенной системы хотя и позволяет в полной мере использовать процедуры положительно определенной факторизации с предварительным символьным упорядочиванием, но, тем не менее, требует большего числа арифметических операций.

4. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТЫ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЭС В НЕЙРОСЕТЕВОМ БАЗИСЕ

В четвертой главе разрабатываются параллельно-структурированные алгоритмы оценивания состояния ЭЭС, реализуемые на нейросетевых вычислительных устройствах. Принципы организации таких устройств фундаментально отличаются от основных принципов парадигмы фон Неймана, заложенных в основу архитектуры современных вычислительных машин. Прежде всего, это высокий параллелизм, многократно повышающий производительность системы обработки информации.

При построении нейросетевых алгоритмов для оптимизационных задач исходят из того, что переходные процессы, происходящие в определенных нейронных структурах и затухающие во времени, сопровождаются минимизацией энергии нейронной сети. Динамика таких сетей обеспечивается введением обратных связей и описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$dy(t)/dt = -\nabla_y E(y(t)) \quad (37)$$

где y – вектор состояния нейронной сети (НС), $E(y)$ – функция ее энергии. Будучи выведена из равновесия, НС стремится к устойчивому состоянию, отвечающему минимуму энергии. Исходя из этого, отображение задачи на НС заключается в нахождении такой нейронной структуры, минимум энергии $E(y)$ которой соответствует оптимальному решению исходной задачи. Эти принципы положены в основу синтеза рекуррентных нейронных сетей для оценивания состояния ЭЭС.

Отображение задачи на нейронную сеть. Пусть зависимость $v(x)$ линеаризуется в точке x_k разложением в ряд Тейлора: $v(x) = v(x_k) + H(x - x_k)$. Оценке состояния

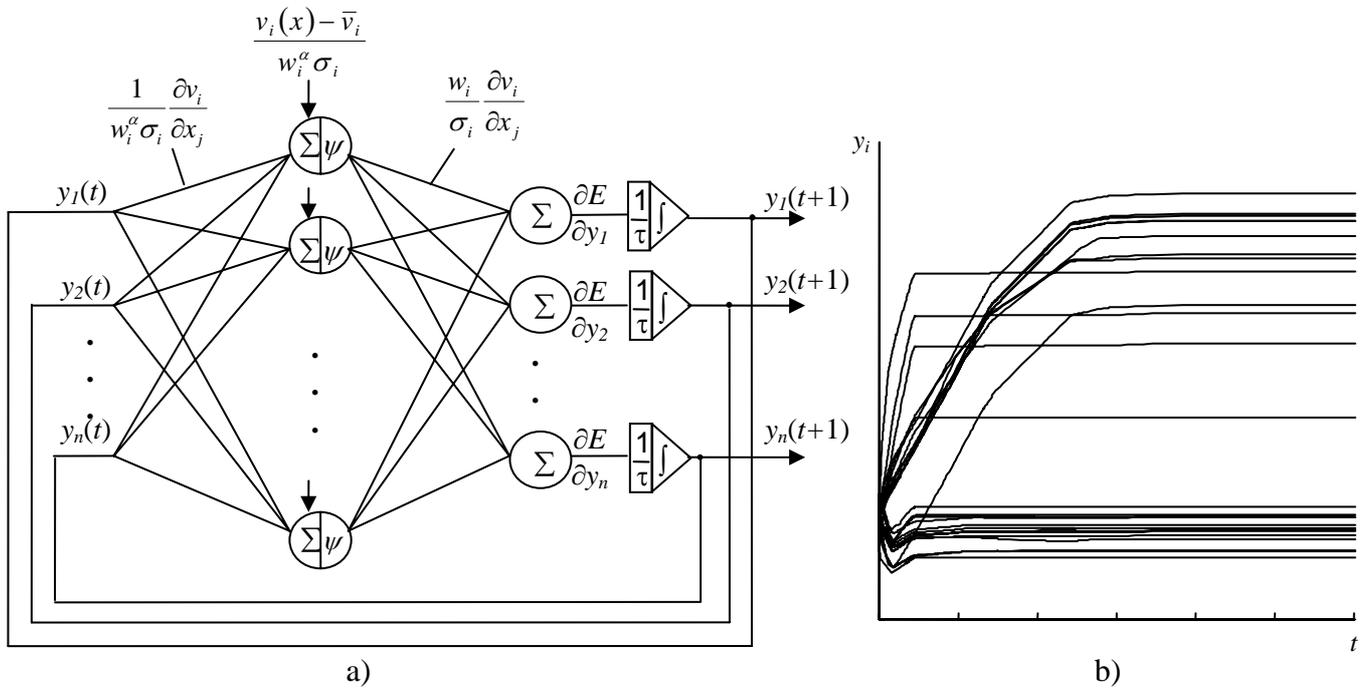


Рис. 6. Структура рекуррентной нейронной сети (а) и график переходного процесса в ней (б) при оценивании состояния 14-узловой тестовой схемы ЭЭС

линеаризованной системы соответствует минимум функции:

$$E(y) = \sum_{i=1}^m w_i^{1+\alpha} \rho \left(\frac{h_i y - b_i}{w_i^\alpha \sigma_i} \right), \quad (38)$$

где в новых обозначениях $y = \Delta x_{k+1}$ – искомый вектор поправок; $h_i = \partial v_i(x_k) / \partial x$ – вектор-строка матрицы Якоби; $b_i = \bar{v}_i - v_i(x_k)$ – приближение для i -го измерения, полученное на предыдущем шаге. Решение y , минимизирующее (38), принимается за новую точку линеаризации, т.е. $x_{k+1} = x_k + t_k y$, и процесс расчета повторяется.

Если функцию (38) рассматривать как энергетическую функцию НС, то задача оценивания состояния линеаризованной модели ЭЭС отображается на систему нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\tau \frac{\partial y_j}{\partial t} = - \sum_{i=1}^m \frac{w_i}{\sigma_i} h_{ij} \left[\psi \left(\frac{1}{w_i^\alpha \sigma_i} \left(\sum_{l=1}^n h_{il} y_l - b_i \right) \right) \right], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (39)$$

где $\tau > 0$ – постоянная времени интегрирования. Структура двухслойной НС, реализующая динамику (39) показана на рис.6а. Матрицы весовых коэффициентов НС являются взвешенными матрицами производных $R^{-1/2} H$. Функция активации нейронов первого слоя, будучи первой производной функции оптимальности оценки $\psi = \rho'$, определяет робастные свойства оценок. Задавая активационную функцию в соответствии с желаемыми характеристиками ψ -функции можно получить широкий класс робастных оценок с различными статистическими свойствами.

Устойчивость непрерывной модели НС. Устойчивость рекуррентной НС, как замкнутой динамической системы, является важнейшим условием ее работоспособности. В устойчивой НС переходной процесс, вызванный подачей на вход взвешенных невязок измерений $(\bar{v}_i - v_i(x_k)) / w_i^\alpha \sigma_i$, со временем затухает (рис.6б). Поэтому большое внимание в работе уделяется исследованию устойчивости нейросетевых моделей и их сходимости к оптимальному решению задачи. Доказано, что при использовании неквадратичных функций (14)-(16) НС с непрерывной динамикой (39)

устойчива и траектория $y(t)$ каково бы ни было исходное состояние $y(0) = y_0$ сходится к ближайшей точке равновесия y^* , удовлетворяющей необходимому условию оптимальности функции (38). Это свойство глобальной сходимости выражает надежность алгоритма и имеет первостепенное значение при решении любых задач реального времени на основе автоматизированных и, тем более, автоматических систем управления. Теоретически установлено, что время t_{Π} затухания переходного процесса

$$t_{\Pi} \sim \frac{\tau}{a\lambda_{\min}} \quad (40)$$

зависит от настроечного параметра a ρ -функции и минимального собственного значения λ_{\min} матрицы $H^T R^{-1} H$, которое зависит от свойств расчетной схемы ЭЭС и ее измерительного обеспечения, но не зависит от ее размерности. Таким образом, *время расчета на НС с непрерывной динамикой от числа узлов схемы ЭЭС не зависит.*

Дискретная модель НС. В работе отмечается, что, несмотря на успехи, полученные к настоящему времени в области создания аналоговых (электронных, оптических и т.д.) нейровычислителей, практическое распространение получили устройства, ориентированные на цифровую элементную базу. Функционирование НС с дискретной динамикой представляется системой нелинейных разностных уравнений, аппроксимирующих (39):

$$y_j^{(k+1)} = y_j^{(k)} - \eta_j \sum_{i=1}^m \frac{w_i}{\sigma_i} h_{ij} \left[\psi \left(\frac{1}{w_i^\alpha \sigma_i} \left(\sum_{l=1}^n h_{il} y_l^{(k)} - b_i \right) \right) \right], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (41)$$

где $\eta_j > 0$ – шаговый множитель.

В работе доказано, что *НС с дискретной динамикой (41) устойчива и последовательность $\{y^{(k)}\}$ сходится к стационарной точке функции $E(y)$ какова бы ни была начальная точка $y^{(0)}$, если шаг выбирается из условия $\lambda_{\max}(\eta H^T R^{-1} W^{1-\alpha} H) < 2$, где $\eta = \text{diag}(\eta_j)$, λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы $\eta H^T R^{-1} W^{1-\alpha} H$. Этому условию удовлетворяет выбор*

$$\eta_j = \tilde{\eta} < \frac{2}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^n (a_{ij})^2}} \quad \text{или} \quad \eta_j < \frac{2}{\sum_{i=1}^n |a_{ij}|}, \quad (42)$$

где a_{ij} – элемент матрицы $H^T R^{-1} W^{1-\alpha} H$.

В связи с параллельной структурой нейросетевой вычислительной модели, время получения решения в процессе (42) определяется только числом тактов N функционирования НС. Теоретически установлено, что

$$N \sim \frac{1}{a} \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}, \quad (43)$$

где λ_{\min} , λ_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение матрицы $H^T R^{-1} W^{1-\alpha} H$. Т.е. быстродействие дискретной НС, в отличие от ее непрерывного аналога, зависит от числа обусловленности матрицы $H^T R^{-1} W^{1-\alpha} H$, которое напрямую связано с размерностью расчетной схемы ЭЭС. В результате, *время расчета на НС с дискретной динамикой с увеличением числа узлов схемы ЭЭС возрастает.* Преодоление этой зависимости возможно за счет разработки моделей алгоритмов, аппроксимирующих динамику НС (39) уравнениями более высокого порядка.

Модели НС, использующие множители Лагранжа. В работе отмечается, что зачастую неидентифицируемые грубые ошибки измерений приводят к получению оценок параметров режима, выходящих за рамки очевидных физических ограничений. Это могут быть диапазоны производительности электростанций, диапазоны регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов, пределы на значения нагрузок как измеряемых, так и неизмеряемых и т.д. Использование этой информации при оценивании состояния ЭЭС позволяет ограничить область решений, а, следовательно, и смещение в оценках параметров режима, вызываемого НИ. В таком случае задача формулируется при ограничениях в форме неравенств:

$$g(x) \leq 0. \quad (45)$$

Рекуррентная НС, синтезированная в работе и реализующая расчет поправок у на каждом шаге метода линеаризации, осуществляет поиск седловой точки модифицированной функции Лагранжа:

$$L(y, \lambda) = \sum_{i=1}^m w_i^{1+\alpha} \rho\left(\frac{h_i y - b_i}{w_i^\alpha \sigma_i}\right) + \sum_{s=1}^q \lambda_s \left(\frac{\partial g_s}{\partial x} y + g_s\right) + \frac{\beta}{2} \sum_{s=1}^q \max\left(0, \frac{\partial g_s}{\partial x} y + g_s\right)^2, \quad (46)$$

где $\lambda_s \geq 0$ – множитель Лагранжа для s -го ограничения, $\beta > 0$ – коэффициент штрафа, q – число ограничений. Динамика нейронной сети описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \tau \frac{dy_l}{dt} &= - \sum_{i=1}^m \frac{w_i}{\sigma_i} h_i \psi\left(\frac{h_i y - b_i}{w_i^\alpha \sigma_i}\right) - \sum_{s=1}^q \lambda_s \frac{\partial g_s}{\partial x_l} - \beta \sum_{s=1}^q \max\left(0, \frac{\partial g_s}{\partial x_l} \left(\frac{\partial g_s}{\partial x} y + g_s\right)\right), \\ \mu \frac{d\lambda_s}{dt} &= \frac{\partial g_s}{\partial x} y + g_s, \\ \lambda_s &\geq 0, \quad l = 1, \dots, n; s = 1, \dots, q. \end{aligned} \quad (47)$$

Структура НС отличается от таковой на рис.6 наличием в первом слое нейронов, вычисляющих невязки ограничений и множители Лагранжа. Нейроны первого типа состоят из сумматора и нелинейного элемента, ограничивающего выходной сигнал z сумматора в соответствии с функцией $f(z) = \min(0, z)$. Нейроны, вычисляющие множители Лагранжа, содержат между сумматором и нелинейным элементом интегратор с постоянной интегрирования μ . Весовые коэффициенты образуемых межнейронных связей соответствуют значениям элементов матрицы Якоби для ограничений. Если ограничения записываются в форме равенств (30), функция $f(z) = z$.

В работе выполнены исследования нейросетевого подхода к оцениванию состояния ЭЭС путем моделирования разработанных НС на ПЭВМ. Результаты, полученные в ходе экспериментов с различными расчетными условиями и схемами ЭЭС, подтверждают теоретические выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Возможности обеспечения устойчивости результатов оценивания состояния ЭЭС к НИ и другим отклонениям от предполагаемого закона распределения ошибок определяются не только топологической избыточностью измерений, т.е. объемом и схемой их расстановки в сети, но и уровнем алгебраической избыточности, которая зависит от параметров расчетной схемы ЭЭС и точности измерений. Независимо от применяемых методов и алгоритмов, трудности с идентификацией и подавлением влияния грубых ошибок возникают в измерениях, расположенных в ветвях сети с относительно малым сопротивлением, и измерениях, имеющих сравнительно высо-

кую точность.

2. Показано, что существующие методы обеспечения устойчивости оценок путем идентификации и удаления НИ даже в условиях высокой избыточности измерений не гарантируют правильного решения при возникновении множественных НИ. Кроме того, эти методы не способны учитывать другие отклонения от нормального закона распределения ошибок измерений.

3. Обоснованная в работе робастная постановка задачи оценивания состояния ЭЭС не только не уступает по качеству получаемых оценок традиционному подходу, комбинирующему оценивание состояния по критерию наименьших квадратов с методами идентификации НИ, но часто превосходит его.

4. Разработанные численные методы и алгоритмы решения задачи демонстрируют высокую надежность и скорость сходимости вычислительного процесса. Они малочувствительны к начальному приближению, размерности сети, количеству измерений и грубых ошибок в них.

5. При современном темпе поступления телеметрической информации целесообразно применение невыпуклых неквадратичных критериев оптимальности. Их использование позволяет достичь наиболее высокой устойчивости оценок параметров режима к ошибкам в оперативных данных. В случае резких изменений режима, а так же при выполнении разовых расчетов ориентироваться следует на выпуклые критерии.

6. С появлением нейросетевых вычислительных устройств открываются принципиально новые возможности повышения быстродействия задачи оценивания состояния ЭЭС. Реализация представленных алгоритмов на аналоговых нейровычислителях позволит достичь сверхвысокого быстродействия при расчете схем большой размерности. Зависимость скорости сходимости НС в цифровом исполнении от размерности ЭЭС может быть преодолена разработкой последующих моделей, аппроксимирующих динамику НС разностными уравнениями второго и более высокого порядков.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Хохлов М.В. Анализ методов оценивания состояния на примере Коми энергосистемы // Материалы тринадцатой Коми республиканской молодежной научной конференции. – Сыктывкар, 1997. (Коми научный центр УрО РАН). – С. 210-211.

2. Хохлов М.В. Применение искусственных нейронных сетей в задаче робастного оценивания состояния электроэнергетических систем // Молодежная науч.-техн. конф., посвященная 100-летию со дня рождения А.Я. Кремса: Тезисы докладов. – Ухта, 1999. – С.38.

3. Чукреев Ю.Я., Хохлов М.В., Алла Э.А. Оперативное управление режимами региональной энергосистемы с использованием технологии искусственных нейронных сетей // Электричество, 2000, № 4. – С.2-10.

4. Хохлов М.В., Чукреев Ю.Я. Повышение достоверности информационного обеспечения задач оперативного управления ЭЭС с использованием искусственных нейронных сетей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Сыктывкар, 2000, Вып.51. – С.261-268.

5. Чукреев Ю.Я., Хохлов М.В., Готман Н.Э. Применение искусственных нейронных сетей в задачах оперативного управления режимами электроэнергетических систем. – Сыктывкар, 2000, Вып. 56. – 24 с. (Сер. Препринтов «Новые науч. методики»).

6. Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием / Н.А. Манов, Е.В. Сенова, М.Г. Сухарев и др. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2000. – С. 154-160.

7. Хохлов М.В., Чукреев Ю.Я. К выбору критерия в задаче робастного оценивания состояния

- электроэнергетических систем // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы III всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2000. – С.313-315.
8. Хохлов М.В. Синтез нейронной сети Хопфилда для оценивания состояния электроэнергетических систем по неквадратичным критериям // Межрегиональная молодежная науч. конф. «Севергеоэкотех-2001»: Тезисы докладов. – Ухта, 2001. – С.142-143.
9. Хохлов М.В. Идентификация точек разбалансировки в регрессионной модели телеизмерений // Межрегиональная молодежная науч. конф. «Севергеоэкотех-2002»: Тезисы докладов. – Ухта, 2002. – С.173-174.
10. Хохлов М.В. Обработка ограничений при оценивании состояния электроэнергетических систем на базе нейронной сети Хопфилда-Лагранжа // Там же.– С.174-176.
11. Хохлов М.В. Устойчивость динамической нейронной сети для оценивания состояния электроэнергетических систем // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. –Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2002. – С.166-169.
12. Манов Н.А., Чукреев Ю.Я., Успенский М.И. и др. Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 205 с.
13. Хохлов М.В. Развитие алгоритмов оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям // Управление электроэнергетическими системами – новые технологии и рынок. – Сыктывкар, 2004. – С.39-48.
14. Хохлов М.В. Модели нейронных сетей, использующие множители Лагранжа, в задаче оценивания состояния ЭЭС // Там же. – С.49-57.
15. Надежность либерализованных систем энергетики / В.А.Баринов, В.А.Савельев, М.Г. Сухарев и др. – Новосибирск: Наука, 2004. – С.276-288.
16. Khokhlov M.V. Constrained power system state estimation on recurrent neural networks // Proceedings of the IEEE PowerTech Conference 2005, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005. (CD-ROM, ref. 247) – P. 1-7.
17. Хохлов М.В., Чукреев Ю.Я. Помехоустойчивое оценивание состояния ЭЭС в условиях грубых ошибок телеизмерений // Вестник УГТУ-УПИ. Проблемы управления электроэнергетикой в условиях конкурентного рынка. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2005. №12 – С.309-322.
18. Хохлов М.В. Определение локальной избыточности телеизмерений в электроэнергетических системах // VII междунар. науч. конф. «Севергеоэкотех-2006»: Материалы конф. в 3 ч. – Ухта: УГТУ, 2006, ч.1. – С. 79-84.
19. Хохлов М.В. Задачи обеспечения режимной надежности при оперативном управлении ЭЭС // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – М.-Н.Новгород, Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2008. Вып.58. – С. 7-19.
20. Хохлов М.В. Избыточность телеизмерений как средство обеспечения надежности информационно-измерительных систем в ЭЭС // Там же. - С. 350-363.
21. Хохлов М.В. Алгоритм определения локальной топологической избыточности телеизмерений на гиперграфе измерений // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: Сб. докладов III междунар. науч.-практ. конф. в 2 т. - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008, Т.1. – С.423-427.
22. Хохлов М.В. Модифицированный метод Ньютона для оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям // Там же. – С.428-433.
23. Чупров В.С., Хохлов М.В. Оценивание состояния ЭЭС по неквадратичным критериям как задача нелинейного программирования // Там же. – С. 434-436.
24. Хохлов М.В. Модифицированный метод Ньютона для задачи оценивания состояния ЭЭС по неквадратичным критериям // Известия ВУЗов: Проблемы энергетики, 2008 №11-12/1. - С.149-158.

*В изданиях списка ВАК представлены работы [3,17,24].

Личный вклад автора. В коллективной монографии [12] автором написаны главы 3 и 4, разделы 1.2.1 и 1.3, в коллективной монографии [15] – раздел 4.5, посвященный методам устойчивого оценивания состояния ЭЭС. В коллективной монографии [6] в разделе 2.5 соискателю принадлежит разработка нейросетевого подхода.

Тираж 100

Заказ № 12

Информационно-издательский отдел Коми НЦ УрО РАН
167982, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48