

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Поляков Илья Дмитриевич

**АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ
ТРЕХФАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Голуб Ирина Ивановна**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, г. Иркутск, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем № 40;

Ананьев Борис Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, ведущий научный сотрудник отдела оптимального управления;

Хохлов Михаил Викторович, кандидат технических наук, доцент, Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Сыктывкар, заведующий лабораторией энергетических систем.

Защита состоится 19 ноября 2019 г. в 15.30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=293>.

Автореферат разослан « »

Ученый секретарь
диссертационного совета  **Самойленко Владислав Олегович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность темы. Основная тенденция модернизации распределительных сетей (РС) напряжением до 35 кВ включительно связана с повышением степени управляемости режимами их работы за счет технического и информационного перевооружения в рамках концепции «интеллектуальных сетей» (Smart Grid). Тенденции развития РС связаны с появлением в них установок распределенной генерации, систем накопления электроэнергии, современной коммутационной аппаратуры и устройств гибкой компенсации реактивной мощности. Изначально спроектированные только для передачи электрической энергии до потребителей РС уходят от радиальной структуры. Зарождаются предпосылки их перехода на локально-кольцевые схемы, так как потоки мощности РС становятся двунаправленными. При этом возрастает потребность в более точном контроле сетевых ограничений ввиду возросшего режимного и топологического многообразия. Все это приближает РС к сетям более высоких классов напряжения, открывает новые возможности по контролю их работы, следовательно, требует создания систем управления, адекватных сложности объекта. Численные объемы элементов РС на порядок больше по сравнению с магистральными сетями и это делает нерентабельным их контроль только лишь на основе оперативно-диспетчерского управления. Управление РС требует большей степени автоматизации при контроле режимов их работы. Функционирование таких систем управления не представляется возможным без on-line расчета режима работы электрической сети на основе измерений текущих электрических параметров, то есть решения задачи оценивания состояния (ОС).

За последнее время в отечественных РС были запущены процессы реновации измерительной инфраструктуры, благодаря чему она существенно расширилась и обновилась. Устанавливаемое оборудование позволяет получать фазные измерения основных параметров электрического режима и передавать эту информацию в диспетчерские центры и пункты управления. Режимы работы РС имеют существенную степень несимметрии, по сравнению с магистральными сетями, о чем свидетельствуют отечественные и зарубежные исследования. Обзор публикаций показал, что для анализа электрических режимов РС требуется применение трехфазных моделей электроэнергетических систем (ЭЭС). Переход от однолинейных моделей к трехфазным порождает проблемы применения классических методов ОС, связанные с появлением новых типов измерений, снижением скорости выполнения расчетов, а также решением таких стандартных подзадач ОС, как анализ наблюдаемости и поиск плохих данных.

Перспективы развития российских РС свидетельствуют о зарождающейся важности ОС их электрических режимов работы. Выполненные к настоящему моменту исследования в области ОС РС в наибольшей степени были

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», номер соглашения 075-15-2019-1214 (внутренний номер соглашения 14.578.21.0226, уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57817X0226).

ориентированы на выбор постановки задачи, которая позволяла бы наилучшим образом учитывать все особенности таких сетей. Последние исследования в данной сфере были направлены на применение к РС классической постановки задачи ОС на базе метода взвешенных наименьших квадратов (МВНК) с использованием трехфазных моделей ЭЭС при разных формах записи вектора состояния. При этом рассматривался учет только самых распространенных измерений, доступных в таких сетях. В проведенных исследованиях обычно опускалось применение теории ОС для решения других задач РС, связанных с исключением плохих данных из набора измерений, а также поиском ошибок в состоянии сетевых элементов расчетной модели. Настоящая работа является продолжением исследований в области ОС РС. В ней рассматривается применение альтернативных методов ОС на базе МВНК к трехфазным моделям ЭЭС. На основании полученных данных о существующих в отечественных РС измерительных комплексах представлены способы включения в задачу ОС новых типов измерений, повышающих избыточность исходной информации. В работе рассмотрены особенности применения теста нормализованных невязок измерений для трехфазных моделей, предложена модификация метода поиска топологических ошибок К. Клементса и П. Дэйвиса, позволяющая выполнять идентификацию и определение ошибок в фазах сетевых элементов трехфазной расчетной модели ЭЭС.

Степень разработанности темы исследования. Среди отечественных ученых огромный вклад в развитие теории ОС и решение данной задачи на практике внесли А.З. Гамм, И.И. Голуб, И.Н. Колосок, М.В. Хохлов, В.Л. Прихно, П.И. Бартоломей, Б.И. Аюев, В.Г. Неуймин, Д.М. Максименко. Их исследования в большей мере посвящены применению методов ОС в магистральных сетях, где и зарождалась проблема определения текущего режима работы ЭЭС. Большая работа по развитию и систематизации знаний в области ОС была проделана зарубежными учеными: А. Абуром, А. Гомезом, Ф. Швеппе, К. Клементсом, П. Дэйвисом и другими. Непосредственно исследования в области ОС РС берут свое начало в 90-х годах прошлого века. В большей степени они сразу были ориентированы на использование трехфазных моделей ЭЭС, они выполнялись М. Бараном, В. Келли, И.И. Голуб и другими.

Цель работы. Целью настоящего исследования является адаптация методов ОС для трехфазных моделей РС среднего класса напряжения, в том числе, методов идентификации недостоверных измерений и поиска топологических ошибок. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор наилучшего вектора состояния и других параметров математической модели ЭЭС, на основании которых может быть получено эффективное решение задачи статического ОС в фазных координатах.
2. Адаптация современных методов ОС, разработанных для однолинейной модели, к трехфазной постановке задачи ОС.
3. Обеспечение возможности учета наиболее распространенных типов измерений РС в качестве исходной информации задачи трехфазного ОС.

4. Программная реализация задачи статического ОС в фазных координатах на основании МВНК и робастных М-оценок, анализ их вычислительных характеристик при разных способах формирования и решения системы линеаризованных уравнений (СЛУ).
5. Модификация методов идентификации ошибок измерений и поиска топологических ошибок для трехфазной модели ЭЭС.
6. Повышение скорости рассматриваемых алгоритмов ОС при использовании современной вычислительной техники и параллельных вычислений.

Объектами исследования являются распределительные сети и системы, работающие на классах напряжения 6-35 кВ, их центры управления, а также информационно-измерительная инфраструктура.

Научная новизна:

- Обоснован выбор основных параметров расчетной трехфазной модели ОС РС с использованием наиболее распространенных измерений;
- Получены оценки вычислительных характеристик современных методов ОС применительно к трехфазным моделям ЭЭС;
- Произведен анализ методов поиска недостоверных измерений, в том числе, проверена работоспособность робастной М-оценки на трехфазных моделях ЭЭС с использованием трехфазных измерений;
- Модифицирован алгоритм поиска топологических ошибок, основанный на анализе полученных в результате ОС невязок измерений с целью выявления некорректного состояния фаз сетевых элементов трехфазных моделей ЭЭС;
- Предложены требования к хранению матричных данных для задачи ОС, выполнение которых позволяет в разы увеличить скорость расчета на современных компьютерах за счет применения параллельных вычислений.

Теоретическая и практическая значимость. Предложены подходы, позволяющие повысить эффективность алгоритмов ОС. Выполнена программная реализация данных подходов при разработке алгоритмов ОС РС на базе трехфазной модели ЭЭС. Продемонстрирована высокая скорость работы разработанных алгоритмов ОС. Для трехфазных моделей ЭЭС адаптированы методы поиска ошибок в топологии сети и поиска плохих данных. Имеющиеся наработки были использованы при разработке программно-технологического комплекса для управления цифровой подстанцией, разработанного в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57817X0226).

Методология и методы исследования. При проведении исследования использовалась теория математической статистики, теоретические основы электротехники, методы оптимизации и нелинейного программирования, а также различные методы решения СЛУ. Применялась среда Visual Studio, языки C++ и C# при программной реализации алгоритмов ОС для проведения расчетов на тестовых схемах IEEE. Для верификации получаемых результатов создавались модели тестовых сетей в интерактивной среде для моделирования MatLab Simulink.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Способы представления различных измерений в задаче ОС в фазных координатах на базе трехфазной модели ЭЭС.
2. Методы ОС РС, позволяющие определять режим работы ЭЭС с использованием трехфазных моделей и различных типов измерений, получивших наибольшее распространение в РС.
3. Модифицированный метод поиска топологических ошибок для трехфазных моделей ЭЭС, позволяющий производить идентификацию и определение топологических ошибок в состоянии фаз сетевых элементов на основании результатов разработанных алгоритмов ОС.
4. Требования к реализации математических операций, позволяющие с использованием параллельных вычислений на современных компьютерах ускорять до трех раз наиболее трудоемкие этапы ОС.

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов ОС для трехфазных моделей, реализации возможности использования при ОС основных типов измерений, встречающихся в РС. На базе разработанных алгоритмов ОС предложен способ выявления топологических ошибок в состоянии фаз сетевых элементов трехфазных моделей ЭЭС. Был проведен анализ используемых при ОС математических операций и предложены подходы, позволяющие получить ускорение расчета на наиболее трудоемких этапах решения задачи.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на 8 конференциях, в том числе:

- Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – Томск-2014, Казань-2016, Самара-2017, Казань-2018;
- International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), Eilat, Israel, 16-18 Nov. 2016;
- Международная конференция и выставка «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017», Санкт-Петербург, 25 – 28 апреля 2017 г;
- The 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Phuket, Thailand, 2017;
- The 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 12 – 14 November 2018.

Также они рассматривались на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИН УрФУ, г. Екатеринбург, в период с 2015 по 2018 гг.

Публикации. По результатам исследований было опубликовано 11 работ, в том числе, две в русскоязычных изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Внедрение результатов работы. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ на разработанное в рамках данной диссертационной работы программное обеспечение для трехфазного оценивания состояния на основе уравнений узловых напряжений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 101 наименования и 2 приложений. Содержит 159 страниц, включает 17 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выполненного исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, охарактеризована практическая ценность результатов исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описываются основные проблемы, препятствующие применению классических алгоритмов ОС к РС в их первоначальном виде с использованием однолинейных моделей. Разбираются ключевые отличия РС от магистральных сетей, анализируются актуальные проблемы РС. Также в главе рассматриваются существующие в РС типы измерений.

Большая размерность подведомственной сети, слабая оснащенность оборудования телеизмерениями и телесигнализацией, отсутствие передачи измеренных параметров в центры управления, отсутствие специализированных расчетных программных комплексов – до недавнего времени были основными факторами, затрудняющими управление РС. Данные факторы порождали проблемы получения актуальной режимной схемы, поиска мест повреждений, уточнения текущего режима работы ЭЭС, снижения потерь и оптимизации режимов работы сетей, контроля напряжений и токовой нагрузки. Сегодня во всем мире наблюдается широкое распространение установок распределенной генерации. Их ввод может приводить к двунаправленным потокам мощности в сетях, что требует более точного контроля режимов работы РС. С учетом последних тенденций и проводимой реновации измерительной инфраструктуры, решение всех указанных задач может быть найдено при внедрении в РС алгоритмов ОС, а также разработанных на их базе методов поиска ошибок измерений и топологических ошибок. В ближайшей перспективе алгоритмы ОС и получаемые с их помощью результаты могут послужить основой для разработки систем управления РС, необходимых для построения интеллектуальных сетей и развития рыночных механизмов.

В целях повышения эффективности постановка задачи ОС должна максимально просто учитывать имеющиеся особенности систем, к которым ее применяют. Используемые в ней упрощения не должны в значительной степени влиять на итоговый результат. Например, для магистральных сетей наибольшее распространение получила постановка задачи ОС, где в качестве вектора состояния выступают параметры напряжений в полярной или прямоугольной формах. Применимо к данному виду сетей, создаваемая с помощью рассматриваемой формулировки система уравнений будет содержать минимальное число неизвестных ввиду преимущественно кольцевой топологии. В таблице 1 представлено сравнение характеристик магистральных и распределительных сетей, оказывающих наибольшее влияние на формулировку задачи ОС.

Таблица 1 – Сравнение характеристик магистральных и распределительных сетей

Сравниваемый параметр	Магистральные сети	Распределительные сети
Нагрузки в фазах	распределены симметрично	распределены значительно несимметрично
Параметры схемы замещения	<ul style="list-style-type: none"> • для сетевых элементов отношение $R/X \ll 1$; • телесигналы состояния имеет каждый объект, о состоянии которого необходимо знать. 	<ul style="list-style-type: none"> • для сетевых элементов $R/X \approx 1$; • большая разнородность параметров элементов схемы замещения; • могут встречаться однофазные и двухфазные ответвления; • телесигнализация состояния имеется на малой части оборудования.
Конфигурация сети	<ul style="list-style-type: none"> • сеть сложнозамкнутая с обилием контуров; • порядок узлов в модели $\sim 1\ 000 - 10\ 000$. 	<ul style="list-style-type: none"> • сеть радиальная (в перспективе – сложнозамкнутая); • порядок узлов в модели может превосходить 10 000.
Доступные измерения	<ul style="list-style-type: none"> • присутствует избыточность измерительной информации; • распространены измерения мощности в узлах и ветвях, модулей напряжений; • встречаются векторные измерения, а также токов и напряжений нулевой последовательности. 	<ul style="list-style-type: none"> • избыточность измерений может отсутствовать, но уже сейчас активно внедряются умные счетчики и новые измерительные комплексы; • распространены измерения модулей токов в ветвях и узлах, модулей линейных и фазных напряжений, модулей токов и напряжений нулевой последовательности; • начинают активно внедряться измерения мощностей.

Исходя из представленного сравнения, можно сделать вывод, что успешно применяемые к магистральным сетям модели и методы ОС нельзя напрямую использовать для РС ввиду особенностей последних. Получившая широкое распространение в магистральных сетях классическая формулировка задачи ОС на базе комплексов напряжений и однолинейной модели теряет основные свои преимущества при ее использовании в области РС. Широко применяемые в различных задачах магистральных сетей однолинейные модели крайне нежелательно использовать для РС, ввиду несимметрии параметров их схем замещения, а главное – несимметрии распределения нагрузок по фазам.

В данной работе исследования проводились при использовании трехфазных моделей ЭЭС и постановки задачи ОС на базе фазных узловых напряжений, представленных в полярной форме. Обоснование выбора такой постановки будет представлено далее.

Основными источниками данных для ОС являются модель схемы сети и измерения. В центры управления РС передается меньший набор информации, чем измеряется на объектах, что вызвано высокой стоимостью организации и обслуживания каналов передачи данных, но при надлежащем обосновании такой

передачи она может быть организована. В качестве измерений в РС обычно выступают:

- Фазные и трехфазные потоки активной/реактивной мощности в ветвях и узлах – активно внедряются в РС в настоящее время (ниже представлены расчетные функции этих параметров для активной мощности P_{flow} и P_{inj}):

$$P_{flow_{ij}}^d = V_i^d \sum_{l=1}^{3 \in (a,b,c)} V_i^l [g_{ij}^{d,l} \cdot \cos(\delta_i^d - \delta_i^l) + b_{ij}^{d,l} \cdot \sin(\delta_i^d - \delta_i^l)] - V_i^d \sum_{l=1}^{3 \in (a,b,c)} V_j^l [g_{ij}^{d,l} \cdot \cos(\delta_i^d - \delta_j^l) + b_{ij}^{d,l} \cdot \sin(\delta_i^d - \delta_j^l)], \quad (1)$$

$$P_{inj_i}^d = (V_i^d)^2 \cdot G_i^{d,sh} + \sum_{j=1}^{NB} P_{flow_{ij}}^d, \quad (2)$$

$$P_{flow_{ij}}^{ABC} = P_{flow_{ij}}^A + P_{flow_{ij}}^B + P_{flow_{ij}}^C, \quad P_{inj_i}^{ABC} = P_{inj_i}^A + P_{inj_i}^B + P_{inj_i}^C, \quad (3, 4)$$

где $g_{ij}^{d,l}$, $b_{ij}^{d,l}$ – соответственно активная и реактивная проводимость между фазами d и l линий, связывающих узлы i и j ; $G_i^{d,sh}$, $B_i^{d,sh}$ – соответственно активная и реактивная эквивалентная проводимость шунта фазы d узла i ; NB – общее количество узлов; i, j – номера узлов; d, l – номера фаз; V_i^d – модуль напряжения фазы d узла i ; δ_i^d – угол напряжения фазы d узла i .

- Модули тока в ветвях и узлах (I_{flow} и I_{inj}) – до недавнего времени были наиболее распространенными измерениями РС, передаются в управляющие центры в виде фазных измерений:

$$I_{flow_{ij}}^d = \sqrt{(P_{flow_{ij}}^d)^2 + (Q_{flow_{ij}}^d)^2} / V_i^d, \quad I_{inj_i}^d = \sqrt{(P_{inj_i}^d)^2 + (Q_{inj_i}^d)^2} / V_i^d \quad (5, 6)$$

где Q_{flow} и Q_{inj} – соответственно потоки реактивной мощности в ветвях и узлах.

- Фазные и линейные модули напряжений ($V_{mod_i}^d$ и V_i^{d-l} соответственно) – для отечественных РС наиболее распространены линейные измерения:

$$V_{mod_i}^d = V_i^d, \quad (7)$$

$$V_i^{d-l} = \sqrt{(V_i^d)^2 + (V_i^l)^2 - 2 \cdot V_i^d \cdot V_i^l \cdot \cos(\delta_i^d - \delta_i^l)}, \quad \text{при } d \neq l, \quad (8)$$

- Измерения умных счетчиков – активно устанавливаются в современных РС, способны предоставить параметры мощности и модуля напряжения;
- Напряжения нулевой последовательности (V_{0_i}) – распространены в РС:

$$V_{0_i} = \sqrt{\left[\sum_{l=1}^{3 \in (a,b,c)} (V_i^l \cdot \sin(\delta_i^l)) \right]^2 + \left[\sum_{l=1}^{3 \in (a,b,c)} (V_i^l \cdot \cos(\delta_i^l)) \right]^2}, \quad (9)$$

- Векторные измерения – отсутствуют в РС, но есть незначительная вероятность их наличия на границе с магистральными сетями.

Для повышения уровня информационной избыточности и уменьшения числа ненаблюдаемых участков алгоритмы ОС РС должны иметь возможность в рамках единой задачи учитывать все представленные виды измерений.

Во второй главе работы показано, что наиболее предпочтительным является учет взаимовлияния фаз в трехфазных моделях ЭЭС при ОС РС среднего класса напряжения. В главе рассмотрены постановки задачи ОС РС, где в качестве элементов вектора состояния в прямоугольной или полярной формах выступают токи ветвей или напряжения узлов, анализируются их плюсы и

минусы. Представлены основные методы ОС, получившие наибольшее распространение в магистральных сетях. Показана их адаптация для работы с трехфазными моделями и измерениями РС.

В теории ОС состояние ЭЭС в любой момент времени представляется через вектор состояния x , с помощью элементов которого и математической модели ЭЭС вычисляются другие режимные параметры. Например, значения собираемых по ЭЭС измерений могут быть получены расчетным путем:

$$z = h(x) + e, \quad (10)$$

где $z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_m]^T$ – вектор измерений; $h_t(x)$ – нелинейная функция, с помощью которой значение измерения t может быть получено через элементы вектора состояния x и параметры математической модели ЭЭС; $h(x) = [h_1(x) \ h_2(x) \ \dots \ h_m(x)]^T$ – вектор нелинейных функций; $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = [\delta_{rf+1}^a \ \dots \ \delta_k^c \ V_{rf}^a \ V_{rf}^b \ V_{rf}^c \ \dots \ V_k^c]^T$ – вектор состояния системы, включающий модули и углы напряжений фаз при ОС в фазных координатах на базе узловых напряжений в полярной форме; rf – индекс базисного узла; k – количество узлов модели; $e = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_m]^T$ – вектор ошибок измерений; m – число измерений; n – число переменных состояния.

ОС позволяет расчетным путем получить наиболее вероятное состояние системы в заданный момент времени при использовании набора измерений, их статистических параметров и модели ЭЭС. Наиболее широкое распространение получил способ ОС, основанный на МВНК. Он может быть представлен в виде задачи минимизации следующей целевой функции:

$$J(x) = \sum_{t=1}^m W_{tt} \cdot (z_t - h_t(x))^2 = [z - h(x)]^T \cdot W \cdot [z - h(x)], \quad (11)$$

где $W = R^{-1}$, а R является диагональной матрицей весовых коэффициентов измерений, в которой каждый элемент ($R_{tt} = \sqrt{\sigma_t}$) равняется соответствующему квадратному корню дисперсии измерения t . Обычно решение задачи ОС находится итерационно с применением метода Гаусса-Ньютона:

$$G(x^k) \cdot \Delta x^k = H^T(x^k) \cdot W \cdot (\Delta z^k), \quad (12)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^{k+1}, \quad (13)$$

где x^k – вектор состояния системы на итерации k ; Δx^k – вектор приращения вектора состояния системы на итерации k ; $H(x^k) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ – матрица частных производных нелинейных функций измерений $h(x)$ по переменным вектора состояния (матрица Якоби); $\Delta z^k = z - h(x^k)$; $G(x^k) = H^T(x^k) \cdot W \cdot H(x^k)$.

На первых этапах диссертационной работы проводились исследования, направленные на анализ необходимости учета взаимоиндукций сетевых элементов при ОС РС среднего класса напряжения. При анализе в качестве элементов вектора состояния выступали напряжения узлов, представленные в полярной форме. Тестовые расчеты проводились на схеме РС IEEE13 для которой были созданы две трехфазные модели. В первой модели (МВИ) учитывались сопротивления, характеризующие взаимоиндукции сетевых элементов, а во второй модели (МБВИ) они игнорировались. Это позволяло разбить ее на три (по числу фаз) отдельные модели для каждой из которой

выполнялось ОС. Результаты расчетов показали, что использование МБВИ при среднеквадратичном отклонении (СКО) в начальном наборе измерений ниже 1.5% приводит к росту ошибки в расчетных значениях параметров набора измерений по завершении ОС, что можно видеть из рисунка 1. Кроме того, МБВИ приводит к существенным расхождениям в углах напряжений относительно их действительных значений, что показано в таблице 2, в которой представлены выделенные градиентной заливкой параметры, содержащие наибольшие отклонения.

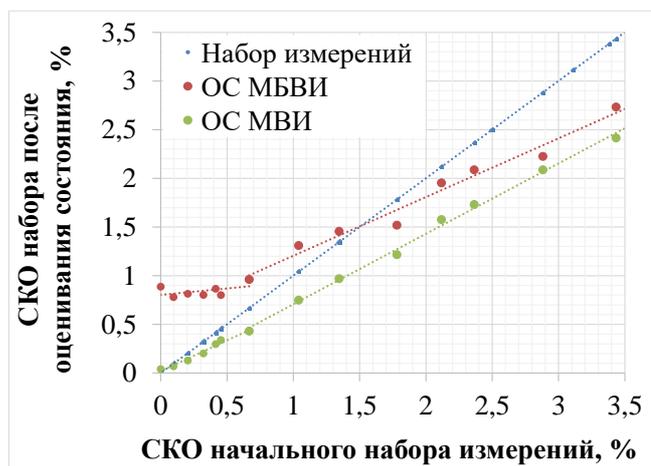


Рисунок 1 – График снижения СКО начального набора измерений при ОС

Таблица 2 – Сравнение значений элементов векторов состояния МВИ и МБВИ

Узел	Фаза	Отклонение от расчета УР U , %		U , о.е. Расчет УР (MatLab)	Отклонение от УР угла U, град.		Угол U, град. Расчет УР (MatLab)
		ОС, МБВИ	ОС, МВИ		ОС, МБВИ	ОС, МВИ	
684	С	1.84	-1.33	0.9070	-1.31	0.07	117.05
611	С	2.16	-1.35	0.9034	-1.37	0.07	116.96
652	А	2.41	0.08	0.9167	-3.57	0.08	-5.34
675	А	2.41	0.08	0.9169	-3.75	0.09	-5.54
675	В	-0.04	0.67	0.9936	-1.50	-0.16	-122.55
675	С	1.81	-1.37	0.9068	-1.19	0.07	117.20

На основании полученных результатов был сделан вывод, что ОС РС напряжением 6-35 кВ необходимо выполнять с использованием трехфазной модели ЭЭС, позволяющей учитывать взаимоиндукции сетевых элементов.

Дальнейшие исследования были посвящены сравнению формулировок задачи ОС РС. В качестве элементов вектора состояния при ОС, обычно выступают параметры напряжений узлов или токов ветвей. Они могут быть записаны в полярной или прямоугольной формах. В статьях по данной тематике можно также встретить формулировку задачи ОС в мощностях ветвей, но, исходя из проведенного обзора публикаций, распространения она не получила.

Когда вектор состояния представлен токами ветвей, каждая итерация расчета состоит из двух этапов – получения уточненных значений измерений и расчета напряжений в узлах системы. Плюсами такой формулировки являются хорошая обусловленность формируемой при ОС СЛУ, линейность функций измерений и простота эквивалентирования модели. К минусам относится необходимость перевода измерений мощности в токи. В оригинале формулировки измерения напряжений исключены из анализа, а матрица Якоби не изменяется в процессе ОС. Это приводит к снижению уровня информационной избыточности и ухудшает точность получаемого решения. При

добавлении напряжения узла базы в вектор состояния измерения напряжений могут быть включены в задачу, но это ухудшает обусловленность формируемых при ОС СЛУ, так как сопротивления сетевых элементов вернутся в матрицу Якоби. Также, в данном случае, ввода дополнительных допущений потребуют пофазное разделение задачи и восстановление неизменности матрицы Якоби.

Основным недостатком использования комплексов напряжений узлов в качестве элементов вектора состояния является проблема плохой обусловленности. Наиболее остро она проявляется при учете измерений транзитных узлов, что можно решить изменением формы записи СЛУ. Кроме того, негативное влияние оказывает одновременное наличие в модели длинных и коротких линий, что можно устранить путем эквивалентирования коротких линий в узлы. Преимуществами данной формулировки является естественный учет широкого спектра измерений, хотя ввод в задачу измерений тока вызывает ряд трудностей как при ОС с плоского старта, так и при сходимости расчета.

С момента начала исследований в области ОС РС было написано множество работ, посвященных сравнению данных формулировок. Полученные в них результаты позволяют заключить, что преимущества и недостатки каждой из формулировок достаточно сбалансированы. Обычно при их сопоставлении сравнивается только время, затрачиваемое на решение задачи, так как каждая из них приводит к практически одинаковому результату. В то время как одна формулировка будет лучшей в условиях ее применения к конкретной модели и конфигурации измерений, другая может оказаться лучшей при изменении этих условий. В данной работе исследования проводились при использовании напряжений узлов в качестве элементов вектора состояния, представленных в полярной форме, ввиду распространения такой формулировки, ее проработанности, а также перспектив работы РС в сложнзамкнутом режиме.

Основными недостатками классической формулировки задачи ОС МВНК на базе параметров узловых напряжений являются плохая обусловленность матрицы коэффициентов формируемой СЛУ, невозможность учета ограничений типа равенств (ОТР), а также сильное влияние грубых ошибок на корректные измерения. Первые две проблемы тесно связаны друг с другом. Необходимость учета строгих ограничений вызвана наличием транзитных узлов, в которых потребление и генерация мощности равняются нулю. В классической формулировке ОС МВНК их учет обычно выполняется путем ввода больших весовых коэффициентов, что ухудшает обусловленность системы уравнений. Для строгого учета ОТР в задаче ОС могут быть использованы множители Лагранжа. В таком виде ОС сводится к итерационному решению следующей системы:

$$\begin{bmatrix} G & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T W \Delta z^k \\ \Delta c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где C – матрица Якоби измерений, которые в процессе ОС не изменяются (они являются ОТР), их нелинейные функции удаляются из обычной матрицы Якоби и матрицы G ; $c(x^k)$ – вектор нелинейных функций измерений, являющихся ОТР; $\Delta c(x^k) = c - c(x^k)$; λ – вектор множителей Лагранжа. Применение

рассмотренного метода позволяет уменьшить число обусловленности матрицы в левой части системы, но еще большего эффекта можно достичь при использовании записи системы уравнений в форме расширенной матрицы, предложенной Хачтелом:

$$\begin{bmatrix} R & H & 0 \\ H^T & 0 & C^T \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu \\ \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z^k \\ 0 \\ \Delta c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где μ – под-вектор множителей Лагранжа. В методе Хачтела рассматривается крайний случай, в котором снижение влияния измерений потоков в узлах (инъекций измерений) на обусловленность достигается за счет ухода от приведения взвешенной матрицы Якоби к квадратичной форме. В нем помимо измерений инъекций затрагиваются и другие измерения, уже не играющие значительного влияния на обусловленность, такие меры избыточны. Логичным продолжением этой идеи стал следующей метод, в котором только измерения инъекций и измерения с ОТР выносятся в отдельные блоки:

$$\begin{bmatrix} R_I & H_I & 0 \\ H_I^T & -H_F^T W_F H_F^T & C^T \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_I \\ \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_I \\ -H_F^T W_F \Delta z_F \\ \Delta c(x^k) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где индексы I, F – обозначают, что матрица или вектор содержит только измерения потоков в узлах или ветвях соответственно, не относящиеся к ОТР.

В последнее время все большее внимание стало уделяться методам ОС, основанным на теории робастной статистики. Предложенная Хьюбером М-оценка относится к числу робастных методов ОС. В данном методе минимизируемая целевая функция представляет систему, в которой невязки измерений выражаются функциональной зависимостью:

$$J(x) = \sum_{t=1}^m \rho(r_t) = \sum_{t=1}^m \rho(z_t - h_t(x^k)), \quad (17)$$

где $\rho(r_t)$ – функция зависимости веса измерения t от его невязки r_t . Ее значение для каждого измерения формируется после определения величины его невязки и обновляется на каждой итерации ОС.

Данный метод позволяет лучше моделировать реальное распределение ошибок в измерениях и избегать случаев, когда при оценивании большая ошибка в измерении приводит к существенному отклонению корректных измерений от их значений. В качестве функции $\rho(r_t)$ в работе были рассмотрены зависимости, представленные в таблице 3 и на рисунке 2.

Для снижения числа обусловленности и учета ОТР М-оценка может выполняться с применением методов (14 – 16). В оригинальной формулировке метода приращение вектора состояния находится с использованием выражения:

$$\Delta x^k = \left(H^T \cdot [\nabla \Upsilon(r^k)]^{-1} \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot \Upsilon(r^k), \quad (18)$$

где $r^k = z - h(x^k)$ – невязки измерений на итерации k ; $\Upsilon(r^k) = \frac{\partial \rho(r^k)}{\partial r^k}$ – функция градиента невязок измерений на итерации k ; $\nabla \Upsilon(r^k) = \frac{\partial \Upsilon(r^k)}{\partial r^k}$ – функция зависимости веса измерения от величины невязки на итерации k .

Таблица 3 – Неквадратичные функции

Название	Функция
Квадратичная-постоянная (а)	$\rho(r) = \begin{cases} \frac{r^2}{\sigma^2}, & \left \frac{r}{\sigma} \right \leq a \\ \frac{a^2}{\sigma^2}, & \left \frac{r}{\sigma} \right > a \end{cases}$
Квадратичная-линейная (б)	$\rho(r) = \begin{cases} \frac{r^2}{\sigma^2}, & \left \frac{r}{\sigma} \right \leq a \\ 2 \cdot a \cdot r \cdot \sigma - a^2 \cdot \sigma^2, & \left \frac{r}{\sigma} \right > a \end{cases}$
Квадратного корня (в)	$\rho(r) = \begin{cases} \frac{r^2}{\sigma^2}, & \left \frac{r}{\sigma} \right \leq a \\ 4 \cdot a^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{ r /\sigma} - 3 \cdot a^2, & \left \frac{r}{\sigma} \right > a \end{cases}$

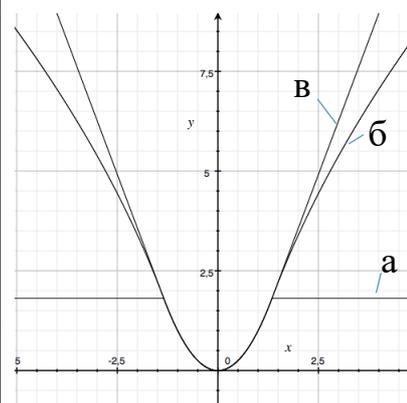


Рисунок 2 – Вид функций таблицы 3

Представленные методы ОС были запрограммированы на языках C# и C++. Была реализована возможность их работы с трехфазными моделями ЭЭС, учитывающими взаимоиндукции фаз, и представленными ранее видами измерений. Проверка работоспособности методов выполнялась на трехфазных моделях схем РС IEEE13 и IEEE37. Для моделирования ошибок, ОС данных схем выполнялось с различным уровнем зашумления измерений. В таблице 4 представлены результаты ОС модели сети IEEE13 различными методами.

Таблица 4 – Сравнение методов решения задачи ОС

Метод ОС	Число итераций	СКО начального набора измерений, %	СКО оцененного набора измерений, %	Порядок числа обусловленности матрицы коэффициентов СЛУ
ОС МВНК	4	1.488	0.896	8.0E+09
ОС МВНК с учетом ОТР				4.0E+06
ОС МВНК, метод Хачтела				6.7E+03
ОС МВНК, блочный метод				4.7E+06
М-оценка				8.0E+09

ОС разными методами на тестовой схеме приводит практически к одинаковому результату. Следовательно, для ОС РС может быть использован каждый из рассмотренных методов. За счет неквадратичной функции М-оценка может потребовать большего числа итераций, однако в рассматриваемой области отклонений измерений ошибка имела квадратичный характер. С вычислительной точки зрения наилучший результат показал метод Хачтела. При его использовании на несколько порядков снижается число обусловленности СЛУ, а также исключаются трудоемкие математические операции с матрицами.

Третья глава посвящена анализу возможности использования дополнительных методов, позволяющих на базе ОС или получаемых с его

помощью данных решать актуальные проблемы РС. Рассматриваются методы поиска плохих данных и поиска топологических ошибок в рамках трехфазной модели ЭЭС, а также применяемых в РС измерений.

Часть поступающих в диспетчерские центры измерений неизбежно содержит в значениях грубые ошибки. В теории ОС такие измерения обычно называют плохими данными. Существуют методы, производящие поиск плохих данных как в необработанных значениях телеизмерений (априорно), так и в процессе ОС (робастные методы), а также и после его завершения – апостериорно. Отсутствуют какие-либо сомнения в том, что методы априорного обнаружения грубых ошибок могут применяться в контексте рассматриваемого подхода к ОС с использованием трехфазных измерений. В предыдущей главе работы рассматривалась формулировка задачи робастной М-оценки, с помощью которой идентификация плохих данных происходит в ходе итерационного расчета. Также, в работе была рассмотрена возможность применения метода апостериорного поиска плохих данных, когда идентификация грубых ошибок выполнялась на основании нормализованных невязок измерений, получаемых в процессе обработки результатов ОС с использованием следующего выражения:

$$r_t^N = \frac{|r_t|}{\sqrt{\Omega_{tt}}}, \quad (19)$$

где $\Omega = R - H \cdot G^{-1} H^T$; r_t – невязка измерения t после выполнения ОС. Согласно проведенным расчетам, М-оценка и анализ нормализованных невязок измерений позволяют выполнять поиск плохих данных с использованием трехфазных моделей ЭЭС. Возможности использования в рамках одной задачи трехфазных и линейных измерений увеличивают естественную избыточность измерительной информации и оказывают положительное влияние на идентификацию плохих данных представленными методами. Из результатов проведенных тестов следует, что междофазные связи трехфазных моделей обладают достаточно слабым взаимовлиянием на поиск плохих данных, что позволяет одновременно идентифицировать ошибки в разных фазах, словно в разных моделях, а не исключать их по одной на каждом цикле теста нормализованных невязок.

Проблема получения актуальной топологии для РС обычно имеет даже более высокий приоритет, чем непосредственно знание текущего режима их работы. В магистральных сетях для ее решения используется топологический процессор, но в области РС ему может быть недостаточно данных для актуализации состояний всех элементов модели ЭЭС. С целью дополнительного уточнения состояния оборудования в данной работе предлагается модификация метода поиска топологических ошибок, основанного на МВНК. Классическая постановка данного метода была предложена К.А. Клементсом, П.В. Дэйвисом и направлена на поиск ошибки в состоянии сетевых элементов однолинейной модели ЭЭС. Используя оригинальную геометрическую интерпретацию метода, топологическая ошибка может быть найдена в однолинейной модели при обнаружении столбца ϑ матрицы T коллинеарного вектору невязок измерений:

$$\cos(\theta_\tau) = \frac{T_\vartheta^T \cdot r_e}{\|T_\vartheta\| \cdot \|r_e\|}, \quad (20)$$

где $T = (I - H_e \cdot (H_e^T \cdot R^{-1} \cdot H_e)^{-1} \cdot H_e^T \cdot R^{-1}) \cdot M$; M – матрица связности ветвей и измерений; индекс e – указывает, что параметр был получен для ЭЭС, в модели которой содержится топологическая ошибка; r_e – полученный в результате ОС вектор невязок измерений. В ходе исследований было установлено, что взаимосвязанные ошибки трехфазной модели оказывают воздействие на геометрические свойства нормализованных невязок измерений. Для комплексного поиска топологических ошибок в трехфазных моделях ЭЭС в настоящей работе предложена модификация рассмотренного выше метода в части проверки ряда условий с целью обнаружения парных и тройных ошибок в состоянии фаз сетевых элементов:

$$\psi_{\vartheta}^d = \cos(\theta_{\vartheta}^d) \cdot k_{\psi} = \frac{[T_{\vartheta}^d]^T \cdot r_e}{\|T_{\vartheta}^d\| \cdot \|r_e\|} \cdot k_{\psi}, \quad d = A, B, C, \quad (21)$$

$$\psi_{\vartheta}^{d,l} = \cos(\theta_{\vartheta}^{d,l}) \cdot k_{\psi} = \frac{[T_{\vartheta}^d + T_{\vartheta}^l]^T \cdot r_e}{\|(T_{\vartheta}^d + T_{\vartheta}^l)\| \cdot \|r_e\|} \cdot k_{\psi}, \quad d \neq l, \quad (22)$$

$$\psi_{\vartheta}^{A,B,C} = \cos(\theta_{\vartheta}^{ABC}) = \frac{[T_{\vartheta}^A + T_{\vartheta}^B + T_{\vartheta}^C]^T \cdot r_e}{\|(T_{\vartheta}^A + T_{\vartheta}^B + T_{\vartheta}^C)\| \cdot \|r_e\|}, \quad (23)$$

где $\psi_{\vartheta}^d, \psi_{\vartheta}^{d,l}, \psi_{\vartheta}^{A,B,C}$ обозначают соответственно однофазную, двухфазную или трехфазную ошибку в состоянии конкретных фаз сетевого элемента ϑ ; k_{ψ} – масштабирующий коэффициент отстройки от ошибки измерения неповрежденной фазы, зависит от предполагаемой среднеквадратичной ошибки набора измерений, как $k_{\psi} = 1 + (\text{СКО}_{\text{набора}} / 100)$. Топологическая ошибка будет считаться идентифицированной в фазах ветви ϑ , если хотя бы одно из условий (21 – 23) $\psi_{\vartheta} \cong 1$, в то время как $\psi_u \ll 1$ для всех условий остальных ветвей $u \neq \vartheta$.

Для демонстрации работы модифицированного метода поиска топологических ошибок взята трехфазная сеть без однофазных и двухфазных ответвлений. Однолинейная топология, конфигурация измерений и электрический режим рассматриваемой сети представлены на рисунке 3.

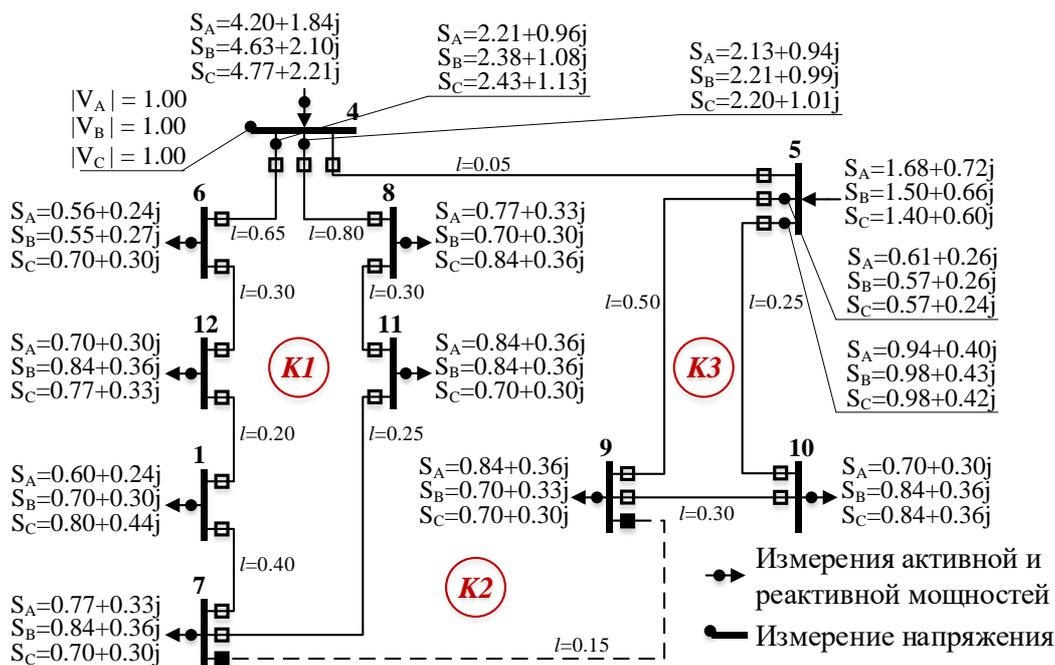


Рисунок 3 – Однолинейная схема тестовой трехфазной сети

Был проведен ряд тестов, во время которых к представленным значениям измерений добавлялись случайные ошибки с СКО в 0.5, 1, 2 и 3%. Далее последовательно производился анализ ситуаций, когда в состоянии одной, двух или трех фаз какой-либо одной линии вносилась ошибка, после чего выполнялось ОС и поиск топологической ошибки предложенным методом. Результаты данного анализа приведены в таблице 5, где в колонках *Ошибочно* представлено процентное количество тестов, в ходе которых ошибка была идентифицирована в фазе линии, в состоянии которой ошибка отсутствовала.

Таблица 5 – Результаты поиска топологических ошибок

СКО ошибок изм., %	k_{ψ}	Процент (%) идентифицированных топологических ошибок в					
		состоянии трех фаз		состоянии двух фаз		состоянии фазы	
		успешно	ошибочно	успешно	ошибочно	успешно	ошибочно
0.0	1.01	75.0	0.0	80.6	0.0	83.3	0.0
0.5	1.01	75.0	0.0	78.7	0.0	79.6	0.0
1.0	1.01	77.8	0.0	79.6	0.0	76.9	0.0
2.0	1.02	77.8	0.0	77.8	0.0	71.3	0.0
3.0	1.03	75.0	0.0	75.9	0.0	71.3	0.9

Как видно из таблицы 5, применение к тестовой схеме модифицированного метода поиска топологических ошибок позволило идентифицировать большинство из них. Не всегда удается точно определить место ошибки, что наблюдалось при отклонении от нормальной схемы состояний фаз ветвей 9-7 и 4-5. Это было связано с тем, что они являются критической парой ветвей. В данной ситуации ошибка не может быть идентифицирована, но может быть определена внутри пары. В дальнейшем, выполняя перебор возможных схем, изменяя состояния фаз ветвей критической пары, заново производя ОС и поиск топологических ошибок, можно будет подобрать актуальную конфигурацию. Таким образом, в большинстве спорных случаев с использованием предложенного алгоритма место ошибки может быть определено уже на втором-третьем цикле. В Таблице 5 такие ошибки к успешно идентифицированным не относились. Если учесть, что определить ошибку в критической группе ветвей невозможно и исключить связанные с такими ветвями результаты неудачной идентификации из представленной статистики, то процент успешно идентифицированных ошибок увеличится на 16.5% для каждого вида ошибок.

Применение рассмотренных в главе методов на практике позволит решить задачи поиска плохих данных в поступающей телеметрии, формирования актуальной модели и топологии ЭЭС, определения места повреждения и т.д.

В четвертой главе обсуждаются возможные подходы к повышению скорости выполнения ОС. В данной главе представлены эффективные подходы для работы с матрицами, а также предлагается применение современных программно-алгоритмических реализаций методов решения СЛУ с использованием параллельных вычислений.

Представленные во второй главе методы ОС позволяют выявить перечень основных математических операций, которые выполняются с матрицами при решении задачи. В первую очередь следует учитывать, что все матрицы при ОС

имеют разреженную структуру. Исключение обработки их нулевых элементов значительно ускоряет вычисления, особенно для систем, обладающих большой размерностью. В каждом методе ОС с матрицами производится ограниченный перечень действий, представленный в таблице 6.

Таблица 6 – Действия с матрицами при ОС различными подходами

Действие \ Метод	Классическое ОС МВНК	ОС МВНК (Лагр./Блоч.)	ОС МВНК (Хачтел)	Классич. М-оценка
Формирование матрицы Якоби	✓	✓	✓	✓
Умножение разреженной матрицы на диагональную или вектор	✓	✓	✗	✓
Транспонирование матрицы	✓	✓	✗	✓
Перемножение двух разреженных матриц	✓	✓	✗	✓
Слияние/расширение матрицы	✗	✓	✓	✗

Повышение скорости их выполнения может быть достигнуто за счет распараллеливания операций на современных компьютерах. Для этого требуется реализация следующих возможностей с хранящимися в матрицах данными:

- одновременная запись данных в несколько строк одной матрицы;
- обеспечение быстрого доступа только к ненулевым элементам (ННЭ) любой строки и любого столбца по индексам.

Обычно, разреженные матрицы в памяти компьютера хранятся в формате CRS (Compressed Row Storage) или его разновидностях. Он обладает возможностью быстрого доступа к ННЭ строки, но не колонки. Его формат хранения очень компактен, но не позволяет осуществлять параллельную запись элементов одновременно в разные строки или столбцы, так как используемая в нем модель индексирования значимых чисел обрабатывает данные последовательно.

С учетом вышеизложенных требований и замечаний в работе предлагается формат хранения матричных данных, который в первую очередь ориентирован на быстрый доступ к ННЭ матриц и добавление в них новых значений без необходимости перераспределения памяти. Его применение подразумевает для хранения одной матрицы использование трех матриц, одна из которых является матрицей значений, а две другие – индексные. Структура его матриц представлена на рисунке 4 и включает:

- матрицу значений Vl размерностью $a \times u$, где a – число строк и u – число колонок исходной матрицы;
- матрицу индексов колонок Cl размерностью $a \times (y + 1)$, где y – максимальное число элементов, которое может храниться в одной строке матрицы. В ней индексы колонок ННЭ хранятся последовательно для каждой

строки, а последняя колонка матрицы используется для хранения количества элементов в каждой строке;

- матрицу индексов строк Rw размерностью $(s + 1) \times u$, s – максимальное число элементов, которое может храниться в одной колонке матрицы. В ней индексы строк ННЭ хранятся последовательно для каждой колонки, а последняя строка используется для хранения числа элементов в колонке.

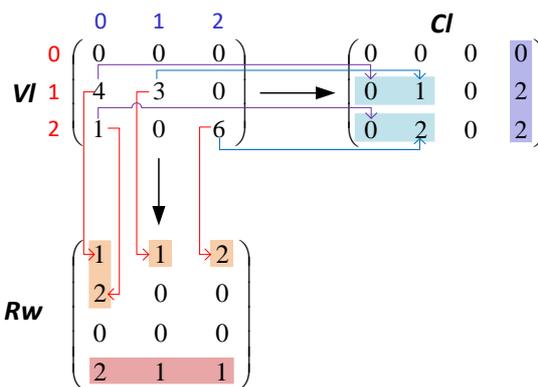


Рисунок 4 – Структура матриц предлагаемого формата

В представленном на рисунке 4 примере нумерация индексов начинается с нуля. В частных случаях, когда при создании матрицы определить максимальное число колонок или столбцов не представляется возможным, $y = u$, а $s = a$. Этот случай представлен на рисунке 4. Предложенный формат хранения матричных данных упрощает процесс поиска ННЭ в строках и колонках, что облегчает параллельное перемножение двух разреженных матриц, транспонирование и обработку их данных. Он может быть легко конвертирован в распространенные форматы, такие как обычный формат хранения матрицы в виде двумерного массива или CRS формат. Предложенный формат был запрограммирован для параллельного формирования элементов матрицы Якоби, а также осуществления других операций, указанных в таблице 6.

Среди плюсов предложенной формы хранения матриц стоит выделить, что хранящиеся в матрицах элементы могут добавляться в любой последовательности. К недостаткам формата относится необходимость хранения большого числа нулевых элементов в памяти компьютера. Однако стоит учитывать, что увеличение оперативной памяти компьютера до достаточно большого размера является менее сложной задачей, чем увеличение числа процессоров или их рабочей частоты. В приведенном формате записи строки матрицы Якоби могут создаваться параллельно, что повышает скорость его построения приблизительно в 3 раза на среднестатистическом современном компьютере. В таблице 7 приведены результаты формирования матрицы Якоби при последовательном и параллельном расчете его элементов для нескольких трехфазных моделей разной размерности.

Таблица 7 – Формирование матрицы Якоби

Тип расчета	Среднее время построения матрицы, мс		
	527 узл. модель (37 998 ННЭ)	1507 узл. модель (108 614 ННЭ)	3012 узл. модель (217 060 ННЭ)
Последовательный	5	19	48
Параллельный	2	5	15

При перемножении двух разреженных матриц в предложенном формате значительно повышается скорость выполнения данного действия даже при

последовательной его реализации. Возможность производить перемножение параллельно увеличивает скорость этого процесса еще в 4 раза. В таблице 8 представлено среднее время перемножения двух матриц в данном формате, созданных при решении задачи ОС. Умножение матрицы в рассмотренном формате на вектор или диагональную матрицу с использованием параллельных вычислений приводит к аналогичному порядку увеличения скорости процесса.

Таблица 8 – Перемножение двух разреженных матриц

Тип расчета	Среднее время выполнения операции, мс		
	<i>527 узл. модель (37 998 ННЭ)</i>	<i>1507 узл. модель (108 614 ННЭ)</i>	<i>3012 узл. модель (217 060 ННЭ)</i>
Последовательный	14	60	147
Параллельный	4	14	36

Представленные во второй главе методы ОС направлены на линейаризацию системы уравнений измерений и ее дальнейшее итерационное решение. Формируемые с их помощью системы в левой части содержат разреженную матрицу коэффициентов, умножаемую на вектор неизвестных, а в правой – вектор значений. Ввиду разреженности матрицы коэффициентов ее обращение является нерациональным, поэтому решение СЛУ при ОС чаще всего выполняется с использованием методов разложения, которые обычно не имеют параллельной реализации. Кроме них иногда используется метод сопряженных градиентов (СГ) с предобуславливанием. Он обладает хорошими вычислительными характеристиками для разреженных матриц и может иметь параллельную реализацию. Однако, для его применения матрица должна быть симметричной и положительно определенной. Если во всех рассмотренных постановках матрицы являются симметричными, то имеют положительный определитель только классическое ОС МВНК и М-оценка. Кроме того, метод СГ относится к разряду итерационных, что может приводить к проблемам со сходимостью или увеличению времени решения СЛУ. Однако, основным его недостатком является прекращение сходимости в условиях, когда матрица коэффициентов является плохо обусловленной, что для задачи ОС имеет критическое значение. Для оценки времени решения СЛУ методом СГ в работе была рассмотрена его реализация в библиотеке Eigen.

Среди средств решения СЛУ также была рассмотрена программно-алгоритмическая реализация LU-разложения, позволяющая находить решение системы с применением параллельных вычислений. Она называется NICS LU и была предложена учеными китайского университета Цинхуа. Применение данного подхода для решения СЛУ, где матрица коэффициентов является разреженной, обеспечивает высокое быстродействие. В таблице 9 представлены временные затраты, необходимые обозначенным методам для решения СЛУ на одной итерации оценивания при различных методах ОС. Рассматривались и другие методы решения СЛУ при ОС, но они показали меньшую эффективность.

Согласно результатам, лучшие временные характеристики методов ОС во всех рассмотренных случаях были получены с использованием LU-разложения

в алгоритмической реализации NICS LU. Она обеспечивает его численную устойчивость и высокое быстродействие в приведенной расчетной библиотеке.

Таблица 9 – Время решения СЛУ на одной итерации ОС

Методы ОС, во время которых решается СЛУ в форме $A \cdot x = B$	Среднее время решения СЛУ, мс/число итераций ОС (тысяч ННЭ в матрице A)	
	1507 узловая модель	3012 узловая модель
Решение СЛУ методом LU-разложения в программной библиотеке NICS LU		
Классическое ОС МВНК	24/5 (251)	99/5 (635)
ОС МВНК с учетом ОTR	64/5 (302)	257/5 (736)
ОС МВНК, метод Хачтела	32/5 (241)	76/5 (444)
ОС МВНК, блочный метод	30/5 (215)	67/5 (430)
М-оценка	24/5 (251)	100/5 (635)
Решение СЛУ методом СГ в программной библиотеке Eigen		
Классическое ОС МВНК	174/5 (251)	200/6 (635)
М-оценка	194/5 (251)	209/6 (635)

Представленные подходы хранения матричных данных, реализация с их помощью математических операций, а также рассмотренные методы решения СЛУ позволяют значительно сократить общее время, требующееся для ОС на современном вычислительном оборудовании. Дальнейшее увеличение вычислительной мощности будет происходить в направлении роста числа ядер и оптимизации работы с параллельными процессами. Использование предложенных подходов будет с каждым годом становиться более актуальным.

В заключении приведены выводы и обобщены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Обоснована необходимость учета взаимоиндукций фаз в трехфазных моделях распределительных сетей среднего класса напряжения при оценивании состояния. Данные модели позволяют с необходимым уровнем точности анализировать несимметричные электрические режимы, характерные для распределительных сетей.
2. Известные методы оценивания состояния, изначально разработанные для однолинейных моделей, были адаптированы для работы с трехфазными моделями и наиболее распространенными в распределительных сетях видами измерений. Были модифицированы М-оценка и классическое оценивание состояния на базе метода взвешенных наименьших квадратов. Для последнего были рассмотрены различные распространенные формы записи целевой функции, учитывающие ограничения типа равенств: в виде множителей Лагранжа, в форме расширенной матрицы Хачтела, а также в блочной форме. Данные методы были реализованы в ПК «ТОСТЭР», где произведено их сопоставление, а также были получены оценки их вычислительных характеристик. При моделировании электрических режимов произведены расчеты, подтверждающие возможность применения разработанных алгоритмов. В проведенных расчетах наилучшие временные

характеристики и наименьшее число обусловленности матрицы коэффициентов обеспечил метод Хачтела.

3. Произведена адаптация методов поиска плохих данных, а также условий их применения для трехфазных моделей электроэнергетических систем и распространенных в распределительных сетях видов измерений. Выполнена программная реализация анализа нормализованных невязок измерений, а также М-оценки. На тестовой модели была продемонстрирована возможность применения данных методов для поиска ошибок в измерениях.
4. Модифицирован и программно-алгоритмически реализован метод поиска топологических ошибок, предложенный Клементсом и Дэйвисом, с целью применения для трехфазных моделей электроэнергетических систем. Проведенные расчеты показали его высокую эффективность в выявлении несоответствий состояния фаз сетевых элементов при достоверизации топологии сети на базе трехфазного оценивания состояния.
5. Представлены эффективные подходы для работы с матрицами, позволяющие при обработке их данных использовать параллельные вычисления. Применение этих подходов позволяет ускорить в 3-4 раза процессы формирования матрицы Якоби, перемножения двух разреженных матриц, умножения матрицы на вектор или диагональную матрицу. Для различных методов оценивания состояния произведен поиск наиболее эффективных методов решения систем линейных уравнений.
6. Перспективы развития данной работы связаны с совершенствованием способов восполнения наблюдаемости, а также разработкой методов, позволяющих производить оценивание состояния гибридных моделей, состоящих из трехфазных и эквивалентных однолинейных участков.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ:

1. Паздерин А.В. Гибридная трехфазно-однолинейная режимная модель для решения задачи оценивания состояния / А.В. Паздерин, Н.Д. Мухлынин, П.Ю. Банных, И.Д. Поляков // *Электричество*. – 2019. – №3. – С. 15-23. 0,77 п.л./0,10 п.л.
2. Поляков, И.Д. Обзор подходов к трехфазному оцениванию состояния распределительных сетей / И.Д. Поляков, А.В.Паздерин // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2018. – № 2(39). – С. 18–27. 1,41 п.л./1,25 п.л.
3. I. Polyakov, O. Malozemova, A. Pazderin, Topology error processing in distribution networks by normalized residuals analysis of three-phase models // *RTUCON 2018 The 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. 2018. P. 1-5, 0,50 п.л./0,40 п.л. (индексирована в Web of Science и Scopus)

4. I. Polyakov, P. Chusovition, O. Malozemova, A. Pazderin, The usage of parallel calculations in state estimation algorithms // ICITEE 2017 The 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering. 2017. P. 1-5, 0,61 п.л./0,50 п.л. (индексирована в Web of Science и Scopus)
5. A.V. Pazderin, P.V. Chusovitin, I.D. Polyakov, Three-phase state estimation model for distribution grids // 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), Eilat. 2016. P. 1-5, 0,47 п.л./0,40 п.л. (индексирована в Web of Science и Scopus)

Авторские свидетельства и патенты:

6. Свид. 2018660546 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение для трехфазного оценивания состояния на основе уравнений узловых напряжений / И.Д. Поляков, П.В. Чусовитин; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (RU). – №2018617395; заявл. 16.07.18; опубл. 23.08.18, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

В других изданиях:

7. Поляков И.Д., Паздерин А.В., Поиск топологических ошибок в трехфазных моделях энергосистем, Электроэнергетика глазами молодежи: материалы IX Международной научно-технической конференции, 1 – 5 октября 2018 г., Казань. – В 3 т. – Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 256 с. 0,44 п.л./0,40 п.л.
8. Поляков И.Д., Паздерин А.В., Использование параллельных вычислений в задачах оценивания состояния и расчета установившегося режима // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 335-338. (индексирована в РИНЦ) 0,46 п.л./0,41 п.л.
9. Поляков И.Д., Чусовитин П.В., Мухлынин Н.Д., Паздерин А.В., Поиск однофазных замыканий на землю в распределительных сетях с помощью трехфазного оценивания состояния // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017. – 2017. – С. 1166-1173. 0,47 п.л./0,42 п.л.
10. Поляков И.Д., Парамонов П.А., Перспективы развития программы контроля перетоков и ограничений в сечениях (АИС «ENERSYS СОДП» КПОС) // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VII международной научно-технической конференции. – 2016. – Т.3. – С.101-104. 0,46 п.л./0,40 п.л.
11. Поляков И.Д., Дмитриев С.А., Чусовитин П.В., Паниковская Т.Ю., Анализ возможности выравнивания графика суточного потребления энергосистемы при помощи потребителей с регулируемой нагрузкой // Электроэнергетика глазами молодежи: труды V международной научно-технической конференции. – 2014. – Т.2. – С.234-238. 0,32 п.л./0,25 п.л.

Подписано в печать __. __.2019
Бумага типографская
Уч.-изд.л. 1

Печать цветная
Тираж 100 экз.

Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1
Заказ 220

Отпечатано в типографии ООО «Таймер - КЦ»
620075, г. Екатеринбург, ул. Луначарского, д.136