

На правах рукописи

МАКСИМЕНКО ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ВВОД РЕЖИМА
В ДОПУСТИМУЮ ОБЛАСТЬ ОПТИМИЗАЦИОННЫМ МЕТОДОМ
ВНУТРЕННЕЙ ТОЧКИ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Ерохин Петр Михайлович

Официальные оппоненты: **Колосок Ирина Николаевна**,
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем;

Хохлов Михаил Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБУН Институт социально-экономических и энергетических проблем севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар, заведующий лабораторией энергетических систем

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «27» сентября 2017 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» 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», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=270323>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С целью обеспечения надежности и экономичности в управлении режимами работы электроэнергетической системы (ЭЭС) широко используются методы оптимизации теории нелинейного программирования. Такие методы лежат в основе решения ключевых задач электроэнергетики - ввода режима в допустимую область и достоверизации телеизмерений (ТИ) - оценивания состояния энергосистем.

Развитие и усложнение энергосистем приводит к увеличению сложности рассматриваемых задач и их решения могут не всегда удовлетворять требованиям эксплуатации. Развитие и алгоритмизация методов оптимизации при создании ПО, предназначенного для решения электроэнергетических задач диспетчерского управления энергосистемой, направлено на повышение качества и скорости их решения. Теория и практика управления ЭЭС тесно связано с аспектами неизбежного изменения моделей ЭЭС и развития методов практической реализации её моделей:

Изменяются сложность и масштабы ЭЭС, структура и элементы.

Изменяются модели и методы технико-экономического и правового управления развитием и режимами ЭЭС.

Развивается теория нелинейного программирования.

Интенсивно совершенствуются принципы и приёмы алгоритмизации и программирования математических методов.

Практика управления ЭЭС требует как периодической модернизации существующих инструментов, реализованных в виде программно-вычислительных комплексах (ПВК), так и внедрения новых ПВК, отвечающих современным требованиям эксплуатации. Разработка новых инструментов должна начинаться с выбора и применения наиболее развитых и современных математических теорий и методов.

В работе исследуется теоретическая и практическая эффективность применения **метода внутренней точки (МВТ) для решения и развития задач ввода режима в допустимую область (ВРДО) и оценивания состояния (ОС) энергосистем** с целью удовлетворения современных требований по управлению режимами работы ЭЭС.

ОС является одной из ключевых задач оперативного диспетчерского управления энергосистемой. Формируемая в результате ее решения модель установившегося режима создает основу для выполнения других расчетов, в том числе и ВРДО. Наиболее часто модель режима используется для проведения имитационных расчетов, связанных с проверкой различных прогнозируемых ситуаций, для оптимизации режимов, контроля надежности и устойчивости системы. Математическая модель электроэнергетической системы предусматривает множество ограничений на используемые переменные, которые продиктованы как физическими ограничениями применяемого оборудования и элементов сети, так и технологическими особенностями эксплуатации электрических сетей, не допускающими нарушений надежности и устойчивости в установившихся режимах. Для реализации возможности существования режима предлагается использовать механизм ВРДО. Под допустимой областью понимается множество всех режимов, которые удовлетворяют совокупности режимных ограничений. В задачах оптимизации для получения решения в виде установившегося режима (УР) в качестве ограничений выступают балансовые ограничения по узлам и технологические режимные ограничения, продиктованные требованиями эксплуатации электрических режимов.

Постановка обеих задач выполняется в виде классической нелинейной задачи минимизации ЦФ с наличием ограничений. По виду реакции целевой функции разделяются и методы решения. Методы, в которых рост целевой функции начинается уже по факту нарушения ограничения, относятся к категории методов внешней точки. Методы, в которых целевая функция начинает асимптотично возрастать при приближении к любой из границ, называются методами внутренней точки. Наличие режимных ограничений в форме неравенства обуславливает выбор МВТ в качестве основного метода решения, так как он позволяет легко учитывать такие ограничения. Основным достоинством метода является быстрая сходимость даже при наличии большого числа ограничений типа неравенство.

Учет ограничений может приводить к необходимости изменять доступные для регулирования параметры режима от своих исходных значений, обычно оптимальных с точки зрения безусловной оптимизации. Такие отклонения называются управляющими воздействиями (УВ), в общем случае для изменения исходного режима с целью учета ограничений можно применить бесконечное множество возможных управляющих воздействий. Для выбора наиболее подходящих (далее такие УВ будут называться оптимальными) из них необходимо определить критерий оптимальности. В роли такого критерия может выступать сумма модулей или квадратов модулей отклонений регулируемых параметров от своих исходных значений. Каждое УВ изменяет целевую функцию (ЦФ) с учетом своей условной цены. Решение задачи ВРДО обеспечивает выработку оптимальных управляющих воздействий для получения допустимого режима, что соответствует минимизации условной стоимости управляющих воздействий, где критерий минимума определяется суммой функций отклонений регулируемых параметров. Использование минимума суммы взвешенных наименьших квадратов отклонений значений управляемых параметров в качестве целевой функции является наиболее распространенной постановкой задачи оптимизации, для решения которой используется метод взвешенных наименьших квадратов (МВНК). В задачах электроэнергетики этот метод получил наибольшее распространение при решении задачи ОС.

Тем не менее, такие «классические» способы формирования ЦФ и её минимизации не могут в полной мере учесть специфику энергосистем. Для задачи ВРДО – это требование учета дискретности доступных УВ, обычно реализуемых в виде заданного ограничения нагрузки (ОН) или ограничения генерации (ОГ). Для задачи ОС – это, главным образом, необходимость выявления и подавления влияния ошибочных измерений на ЦФ, а также возможность использования некоторых априорных знаний об энергосистеме в вычислительном процессе ОС. Например, при отсутствии измерения нагрузки в качестве его аналога может выступать заранее известная доверительная область, нахождение в которой не приводит к изменению ЦФ. В отличие от классического подхода рост ЦФ начинается только при выходе за границы доверительной области, а не при отклонении от заданного значения. Появление высокоточных Phasor measurement unit (PMU) и новых измерений диктует необходимость точного удержания оцениваемого параметра на измеренном значении, сохраняя возможность его отклонения в процессе решения при возможных сбоях для обеспечения надежности расчета ОС. Возможность использования механизма дискретного управления в задачах ОС также потенциально позволяет проводить оценку топологии сети, что и сейчас является одной из актуальнейших задач в этой сфере.

В работе предлагаются критерии формирования ЦФ и её ограничений, позволяющие учесть обозначенные свойства ЭЭС, проявляющиеся в рассматриваемых задачах. Ключевой особенностью предлагаемой методики формирования и решения задачи минимизации является разбиение функции стоимости отклонения параметра на интервалы, на каждом из которых функция может иметь свой вид (линейный, квадратичный, комбинированный) с заранее заданным весовым коэффициентом для каждого участка. Такой подход позволяет использовать с целью повышения качества решения различные модели, соответствующие требованиям эксплуатации реальных объектов ЭЭС в рамках единого процесса расчета.

Степень разработанности темы исследования. Задачи ВРДО и ОС не являются новыми в сфере управления и оптимизации режимов работы ЭЭС и глубоко проработаны с точки зрения применения классических методов решения основанных на использовании внешних штрафных функций и квадратичных критериев изменения ЦФ. Тем не менее, такие подходы обладают рядом представленных ранее недостатков, преодолеть которые возможно за счет применения кусочно-заданных видов ЦФ и использования МВТ. Исследование неквадратичных критериев ЦФ для задачи ОС отражено в работах М.В. Хохлова. Применение МВТ получило широкое развитие за рубежом для решения задач условной оптимизации, но крайне слабо представлено в отечественной научной школе. В связи с этим возникает необходимость развития теории и практики применения МВТ в задачах ВРДО и ОС.

Цель исследования – развитие теории и практики ввода режима в допустимую область и оценивания состояния энергосистем с применением метода внутренней точки.

Для этого поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ и систематизация существующих методов оптимизации. Выявление их возможностей, преимуществ и основных недостатков. Формирование уточнённой математической постановки задачи.
2. Анализ возможностей применения МВТ для класса оптимизационных задач с наличием ограничений. Разработка математической модели для формирования поставленных оптимизационных задач с учетом необходимости использования их специфики. Разработка унифицированного алгоритма решения.
3. Формулировка условий постановки задачи ВРДО в зависимости от необходимости минимизации потерь, учета технологических нарушений, минимизации отклонений параметров от заданных значений. Разработка моделей дискретного регулирования источников активной мощности для учета УВ в виде ОГ и ОН.
4. Разработка моделей измерений, позволяющих задавать зоны достоверности оцениваемого параметра, удерживать его на заданном уровне для учета «точных» измерений и использовать неквадратичные критерии в задаче ОС.
5. Выбор и обоснование наиболее эффективных априорных фильтров грубых ошибок измерений, подходящих к реализации для первичной отбраковки «плохих» данных.
6. Реализация в программном виде разработанной методики формирования и решения задач ВРДО и ОС для применения в промышленном программном комплексе.

Предмет исследования – способы и методы ВРДО и ОС режимов электроэнергетических систем.

Объект исследования - математические модели электроэнергетических систем. В работе активно использовались 4 модели:

- простейшая трехузловая модель энергосистемы с двумя генераторами, которая в процессе исследования дополнялась ограничениями и последовательно усложнялась, и, в итоге, преобразовалась к четырехузловой модели с тремя генераторами;
- модель 13-узловой тестовой схемы, разработанная для отладки адаптируемых алгоритмов МВТ в задаче ОС;
- расчетная модель ОЭС ОДУ Урала для задачи ЦСПА, содержащая 144 узла;
- расчетная модель ОЭС ОДУ Северо-Запада для задачи СМЗУ, содержащая 1024 узла.

Методика исследования. В исследовании применялись математические модели энергосистем, разработанные в теории расчета установившихся режимов, оптимизации и оценивания состояния энергосистем, а также методы системного анализа, теории оптимального управления и комплексной многопараметрической оптимизации математического аппарата нелинейного программирования.

При выполнении работы использовались программные комплексы «RastrWin3» и «Космос».

Научная новизна работы:

- Предложен новый подход применения МВТ для моделирования ограниченных кусочно-квадратичных функций на основе представления физических переменных суммой элементарных, который даёт возможность разработать универсальный инструмент минимизации комбинированных видов ЦФ, реализовать учет технологических ограничений и специфики электроэнергетических задач за счет широких возможностей настройки вида конечной суммарной ЦФ.
- На основе представленного подхода разработаны алгоритм решения комплексной задачи ВРДО, а также способ учета дискретности использования доступных для управления энергосистемой УВ вида ОГ и ОН в общем алгоритме решения задачи ВРДО за счет комбинирования линейных и квадратичных моделей, используемых в задаче минимизации, взамен округления полученных результатов и проведения дополнительных расчетов.
- Для задачи ОС разработаны специальные модели измерений физических величин, позволяющие точно удерживать оцениваемые параметры в заданных пределах изменения значения соответствующего множителя Лагранжа, что делает возможным учёт новых, высокоточных видов синхронизированных векторных измерений.
- Представлен новый способ проведения ОС по неквадратичным критериям для подавления влияния ошибок измерений на суммарную ЦФ, автоматически реализующий выпуклый, неразрывный вид ЦФ с получением неубывающего вида частных производных по всем переменным, что гарантирует унимодальность исходной задачи.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, качественным соответствием теоретических выкладок и результатов, полученных путем математического моделирования, результатам, полученным с использованием специализированного ПО, что неоднократно отмечалось во время обсуждений в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

Практическая ценность работы заключается в улучшении возможностей учета любых ограничений в виде неравенств при решении оптимизационных задач диспетчерского управления за счет использования алгоритмов МВТ. В частности, представлено решение задач ВРДО и ОС. Для рассматриваемых задач разработаны модели параметров электрического режима, что позволяет учитывать специфику каждого параметра в общей задаче и обеспечивает гибкую настройку формирования расчетной задачи минимизации. Представленная методика реализована в составе промышленного ПК «RastrWin3».

Внедрение результатов работы. Разработанная методика адаптации метода внутренней точки для решения оптимизационных задач диспетчерского управления легла в основу расчетного ядра оптимизации специализированного ПО «ВРДО», прошедшего опытную эксплуатацию в филиалах АО «СО ЕЭС». Акт о готовности к вводу в промышленную эксплуатацию подтверждает надежность полученных результатов и дает основание для широкого применения МВТ в задачах оптимизации. Адаптированный алгоритм с использованием МВТ для выполнения функции оценивания состояния также реализован в ПК «RastrWin3», что существенно расширяет функциональные возможности комплекса. Дополнительно для настройки и выверки схемы по телеметрии в задаче ОС разработаны и реализованы методы фильтрации грубых ошибок телеизмерений и их привязок к модели сети.

ПК «RastrWin3» используется в качестве основного инструмента по расчету и оптимизации режимов более чем в 260 организациях на территории России, Казахстана, Киргизии, Белоруссии, Молдовы, Монголии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная математическая модель на основе МВТ, предназначенная для решения задач ВРДО и ОС с учетом собственной специфики каждой задачи.
2. Разработанные специальные модели источников активной мощности в задаче ВРДО и модели измерений для задачи ОС.
3. Обоснование и доказательство эффективности разработанных методов с точки зрения качества получаемых результатов.
4. Аспекты реализации разработанного алгоритма и его быстродействия.
5. Результаты сравнительного анализа реализации со специализированным промышленным ПК на примере задачи ОС.

Апробация результатов работы. Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных и Российских научно-технических конференциях:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», 2010, Екатеринбург;
- Международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», 2011, Самара;
- Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах, 2011, Новосибирск;
- Современные устройства в электроэнергетике: релейная защита, автоматика и элементы активно-адаптивных сетей. Подготовка кадров для электроэнергетической отрасли, 2012, Томск;
- Релейная защита и автоматика энергосистем, 2012, Москва;
- III международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», 2012, Екатеринбург;

- IV международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» РНК CIGRE, 2013, Екатеринбург.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 статей, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Разработка методики адаптации МВТ для решения оптимизационных задач ВРДО и ОС и ее алгоритмическая реализация; внедрение разработанных методов оптимизации в программный комплекс промышленного назначения; практическая реализация выбранных фильтров грубых ошибок телеметрии в задаче ОС;

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и 3 приложений. Объем работы составляет 169 страниц, в том числе 145 страницы основного текста, 47 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведена общая характеристика и структура диссертации.

В первой главе приводится общее понятие оптимизации в задачах электроэнергетики. Рассматривается роль и место задач оптимизации в автоматизированной системе диспетчерского управления (АСДУ) единой энергосистемы (ЕЭС) с учетом истории становления и развития служб АСДУ в структуре АО «СО ЕЭС». Представлены типичные задачи, решаемые службами АСДУ с использованием методов оптимизации. Определены основные проблемы, возникающие в практике получения решений и приводящие к необходимости декомпозиции задачи оптимизации. Дана классификация задач по временным циклам регулирования и способам учета ограничений, в соответствии с которой определены подзадачи оптимизации, рассматриваемые в рамках представленной работы.

Далее приводится анализ задачи комплексной оптимизации применительно к задачам электроэнергетики. Рассматривается декомпозиция задачи комплексной оптимизации по активной и реактивной мощности, приводятся характерные регуляторы и наборы ограничений для каждой из подзадач, и анализируется влияние регуляторов реактивной мощности на результаты задач оптимизации по активной мощности, например, минимизации активных потерь.

Для определения задачи комплексной оптимизации сформированы требования к основным ограничениям:

1. Точное соблюдение ограничений в виде равенств, сформированных в форме баланса активных и реактивных мощностей узлов.
2. Наложение ограничений в виде неравенств на:
 - P, Q генерацию;
 - режимные переменные, например, напряжения в узлах, допустимые пределы нагрузок и генераций;
 - переменные, связанные с регуляторами, например, коэффициенты трансформации, инъекции реактивной мощности, УВ в виде ограничения генерации (ОГ) и ограничения нагрузки (ОН);
 - нагрузку линий или величину разницы углов по концам линии.

В отношении рассмотренных ограничений возможен выбор различных целевых функций или их комбинаций. Наиболее часто в качестве критерия формирования ЦФ используются:

1. Минимум стоимости расходуемого условного топлива.
2. Минимум потерь активной мощности.
3. Максимум резервов по реактивной мощности.
4. Минимум отклонений напряжений в узлах от заданных значений.
5. Минимум стоимости необходимого оборудования для компенсации реактивной мощности.

С учетом ограничений формируется математическая постановка задачи комплексной оптимизации

$$\min f(x, u) \quad (1)$$

с соблюдением ограничений:

$$h(x, u) = 0; \quad (2)$$

$$x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i} \quad (3)$$

$$u_{\min i} \leq u_i \leq u_{\max i} \quad (4)$$

$$g_{\min i} \leq g_i(x, u) \leq g_{\max i}. \quad (5)$$

Здесь (x, u) – векторы независимых и зависимых переменных соответственно. К независимым переменным относятся величины, на которые можно воздействовать непосредственно, например, изменять коэффициент трансформации, регулировать выработку активной и реактивной мощности на генераторах. Другими словами, эти переменные отражают возможности регулирования в энергосистеме. В роли зависимых переменных выступают расчетные значения напряжений, токов, перетоков мощности в линиях. Ограничения, определяемые уравнениями (2), являются уравнениями баланса мощностей и должны выполняться в любой точке. Они включают уравнения как по активной, так и по реактивной мощности. Ограничения (3), (4) определяют допустимый минимум и максимум независимых и зависимых переменных. Все переменные трактуются как непрерывные плавные функции. Ограничения (5) являются функциональными, они включают максимум и минимум перетоков мощности по сечениям, ограничения на использование УВ в виде ОГ, ОН и т. п.

Для учета уравнений (2) в работе используются уравнения балансов мощностей узлов в полярной системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_k - V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \\ Q_k + V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in k} V_m (B_{km} \cos \delta_{km} - G_{km} \sin \delta_{km}) \end{array} \right\} = 0, \quad (6)$$

функция Лагранжа определяется как:

$$L(x, u, \lambda, \mu) = f(x, u) + \lambda^T h(x, u) + \mu^T g(x, u), \quad (7)$$

где λ – вектор множителей Лагранжа, соответствующий уравнениям баланса мощности, μ – вектор множителей Лагранжа, соответствующий ограничениям в форме неравенств.

Пусть $z = [x, u, \lambda, \mu]^T$, тогда решение в общем виде имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \nabla_{xx}^2 L(z^k) & \nabla_{xu}^2 L(z^k) & \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial x} \\ \nabla_{ux}^2 L(z^k) & \nabla_{uu}^2 L(z^k) & \frac{\partial h}{\partial u} & \frac{\partial g}{\partial u} \\ \frac{\partial h^T}{\partial x} & \frac{\partial h^T}{\partial u} & 0 & 0 \\ \frac{\partial g^T}{\partial x} & \frac{\partial g^T}{\partial u} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^k \\ \Delta u^k \\ \Delta \lambda^k \\ \Delta \mu^k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x L(z^k) \\ \nabla_u L(z^k) \\ h(x^k, u^k) \\ g(x^k, u^k) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$\nabla_{xx}^2 L(z^k) = \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right] + \sum_i \lambda_i \left[\frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} \right] + \sum_i \mu_i \left[\frac{\partial^2 g_i}{\partial x^2} \right]. \quad (9)$$

Неактивные ограничения ($\mu_i = 0$) не влияют на матрицу Гессе. Таким образом, несмотря на то, что они являются частью функции Лагранжа, явно они не показаны. Оптимальное направление определяется вектором $d^k = [\nabla x^k, \nabla u^k]$. Ключевой проблемой в получении системы (7) является то, что до расчета неизвестно, какие из ограничений перейдут в разряд активных. В (7), кроме уравнений баланса мощности, необходимо явным образом рассматривать только набор активных ограничений. Таким образом, требуется процедура, определяющая набор активных ограничений в точке оптимума.

Учет ограничений в виде неравенств (двухсторонних ограничений) является более сложной задачей, чем соблюдение ограничений в виде равенства. Ограничения в виде равенства легко вписываются в общую концепцию решения систем нелинейных уравнений методом Лагранжа простым добавлением соответствующих уравнений в ограничения минимизируемой функции. В случае с двухсторонними ограничениями, с одной стороны, имеется некая зона нечувствительности целевой функции между верхним и нижним пределами, а с другой – эта же целевая функция должна резко

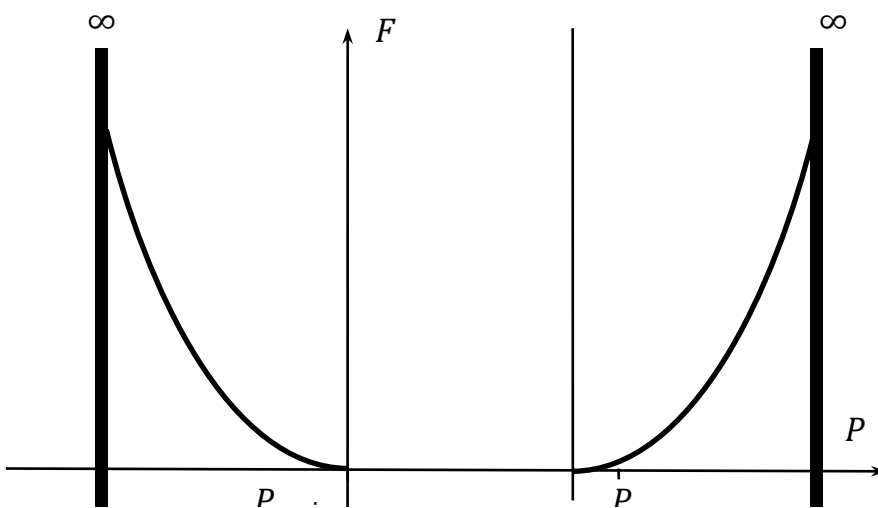


Рисунок 1 - Жесткие и мягкие ограничения в форме неравенства

реагировать на выход контролируемого параметра за пределы одной из границ или при приближении к ней. Ограничения делятся на два типа – мягкие и жесткие (Рисунок 1). У мягких ограничений пределы желательны, но необязательны. К преимуществам использования мягких ограничений относится то, что при невозможности учета всех ограничений,

например, в случае их противоречивости, решение задачи комплексной оптимизации может быть получено за счет использования их степени свободы, то есть выхода за пределы границ.

Одним из путей учета ограничений в форме неравенства является использование штрафных функций. В задачу вводятся мягкие ограничения в виде неравенства внутри зоны жестких ограничений с дополняющей квадратичной функцией штрафа. Однако в таком случае нет гарантий отсутствия нарушения заданных ограничений. При выходе за пределы ограничений в процессе расчета возникает необходимость либо сдвига границ внутренних ограничений, либо усиления коэффициента штрафа.

Применение жестких ограничений в виде неравенства может быть реализовано либо через большие штрафы, либо прямым моделированием ограничений в форме равенства. Моделирование жестких ограничений в форме равенства выглядит более предпочтительно, так как позволяет избежать проблем с плохой обусловленностью. Однако эффективная реализация такого алгоритма требует изощренных стратегий обновления и разделения активных и пассивных ограничений и трудно реализуема на практике. Для соблюдения жестких ограничений в процессе оптимизации применяются подходы, основанные на методе внутренней точки.

Вторая глава посвящена МВТ и его применения для решения оптимизационных задач. Математически задача оптимизации сводится к форме

$$\begin{aligned} \min F(x), \\ h_i(x) = 0, \quad i = \overline{1, N}, \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $x = (\vec{V}, \vec{\delta}, \vec{K}, P_i^{\text{ген}}, Q_i^{\text{ген}})$, h – ограничения типа равенство, g – ограничения типа неравенство. Перед решением ограничения типа неравенство заменяются ограничениями типа равенство с помощью вспомогательных неотрицательных переменных s :

$$g_j(x) + s_j = 0, \quad j = \overline{1, M}. \quad (11)$$

Для решения используется функция Лагранжа:

$$L(x, \lambda^h, \lambda^g, s) = F(x) + \sum_i^N \lambda_i^h h_i(x) + \sum_j^M \lambda_j^g (g_j(x) + s_j) - \mu \sum_j^M \ln s_j, \quad (12)$$

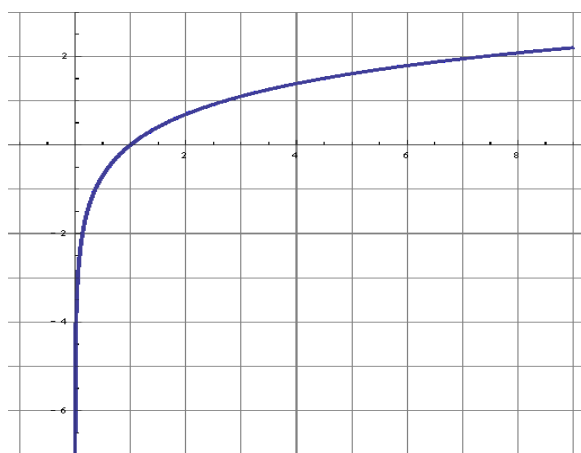


Рисунок 2 - График функции $\ln(x)$

где λ_i^h , λ_j^g – множители Лагранжа по ограничениям типа равенство и неравенство соответственно. При приближении к границе допустимой области соответствующая ограничению переменная $s_i \rightarrow 0$, а добавка в целевую функцию $\ln(s_i) \rightarrow \infty$ (Рисунок 2). Это гарантирует удержание ограничиваемого параметра в допустимой области. Однако гарантии распространяются только на область, где на каждом шаге выполняются условия неотрицательности переменных $s_i > 0$.

Вследствие таких условий необходимо контролировать каждый шаг изменения переменных s_i и корректировать его, если он приводит к отрицательным значениям контролируемых переменных. Для сохранения неотрицательности переменных s_j , λ_j^g длина шага α^p , α^d для соответствующих переменных определяется по формулам:

$$\alpha^p = \min \left[\min_{\Delta s_j < 0} \frac{s_j}{1,1 \cdot |\Delta s_j|}, 0,99995 \right];$$

$$\alpha^d = \min \left[\min_{\Delta \lambda_j^g < 0} \frac{\lambda_j^g}{1,1 \cdot |\Delta \lambda_j^g|}, 0,99995 \right];$$
(13)

новые значения переменных определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + \alpha^p \Delta x_i, \\ s_{j+1} &= s_j + \alpha^p \Delta s_j, \\ \lambda_{j+1}^g &= \lambda_j^g + \alpha^d \Delta \lambda_j^g, \\ \lambda_{i+1}^h &= \lambda_i^h + \alpha^d \Delta \lambda_i^h. \end{aligned}$$
(14)

Двусторонние ограничения на переменные исключаются из системы уравнений:

$$x^- \leq x \leq x^+ \quad (15)$$

ограничение (15) переводится в два обычных:

$$\begin{aligned} x - x^+ + s^+ &= 0; \\ -x + x^- + s^- &= 0. \end{aligned}$$
(16)

Каждому ограничению соответствует свой множитель Лагранжа (λ^- , λ^+ соответственно) и две вспомогательные переменные (s^- , s^+). В работе предлагается разделить используемые переменные на физические и элементарные. Под физическими переменными подразумевается классические переменные электрического режима: модули и углы напряжений, коэффициенты трансформации, нагрузки и генерации, а также дополнительные функциональные переменные. Элементарные переменные - сугубо вычислительные и не являются физическими параметрами. Физические переменные состоят из суммы элементарных переменных (19). При этом на физические переменные явно не накладывается никаких ограничений типа неравенство, и они не входят в целевую функцию. Любые функциональные ограничения приводятся к элементарным введением дополнительных переменных.

С точки зрения реализации такой приём позволит унифицировать задачу и отделить вычислительную часть от использования традиционных физических переменных. Это, с одной стороны, позволяет не только использовать различные виды ЦФ в рамках единого метода решения, но и обеспечивать возможности их динамического изменения в процессе расчета, а с другой стороны, унифицировать задачу. Унифицированная модель существенно упрощает реализацию алгоритмов оптимизации и даёт возможность разработать единый расчетный блок без привязки к какому-то определенному виду ЦФ.

В предлагаемом методе минимизируется функция вида

$$\min F = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^K \alpha y_{ik}^2 + b y_{ik} + c \quad (17)$$

при наличии двусторонних ограничений на переменные

$$y_{ik}^{\min} \leq y_{ik} \leq y_{ik}^{\max} \quad (18)$$

переменные y_{ik} называются элементарными ограниченными переменными. Реальная физическая переменная x_i является суммой элементарных:

$$x_i = \sum_k y_{ik} + c_i. \quad (19)$$

Такой подход позволяет моделировать кусочно-квадратичные ограничения для физических переменных за счет ограничения элементарных и получать разные виды ЦФ для различных интервалов физической переменной в ходе расчета оптимизационной задачи. Пример модели, приведенной на рисунке 3, демонстрирует возможность одновременного использования полиномов 0, 1 и второй степени в итоговой ЦФ, а также способ моделирования ступенчатых изменений стоимости ЦФ. Обязательным условием является требование неубывающей производной ЦФ, это позволяет гарантировать наличие единственного минимума функции. Использование гладких или линейных функций переменных лежит в основе большинства оптимизационных методов, таких как МВНК или МНМ, применяемых в задаче ОС. Дискретное регулирование позволяет моделировать УВ в виде ОГ или ОН, что особенно актуально для задачи ВРДО.

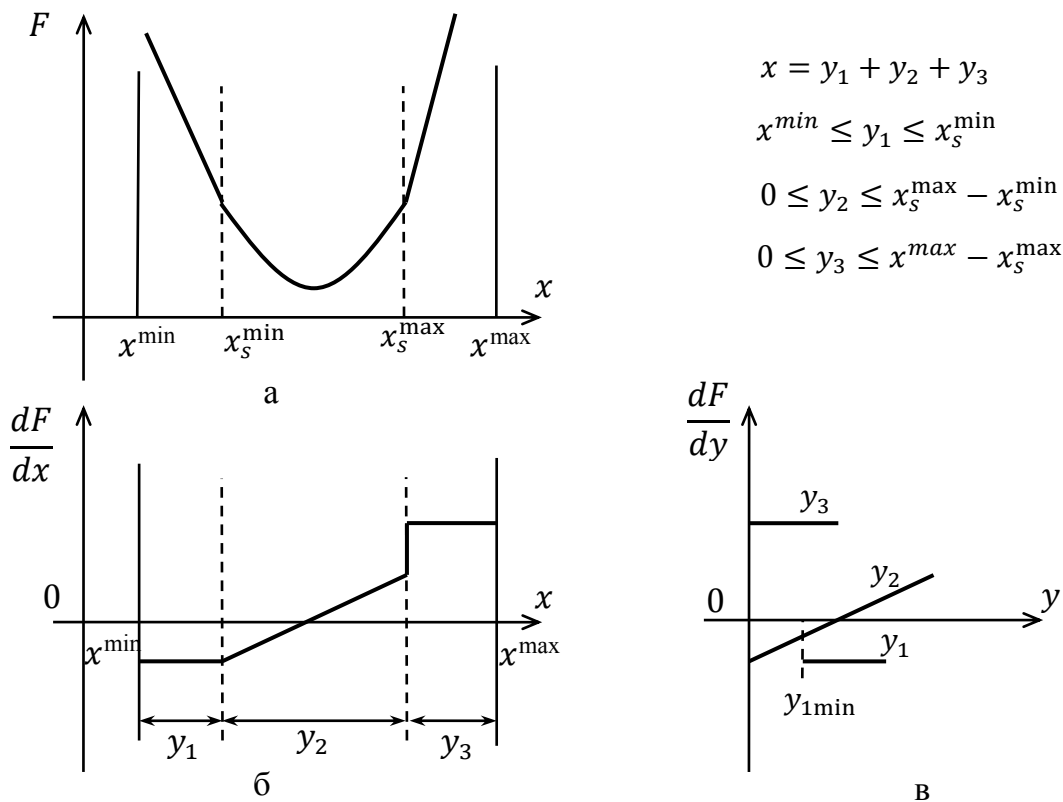


Рисунок 3 - Переход от физической переменной к моделям элементарных переменных
 а) Исходная ЦФ переменной б) Вид производной ЦФ в) Производные от элементарных переменных

С учетом разделения переменных и использования кусочно-квадратичных функций уравнение (12) преобразуется к виду

$$L = \sum_i \left[\sum_k \left((ay_{ik}^2 + by_{ik} + c) + \lambda_{ik}^{\max} (y_{ik} - y_{ik}^{\max} + s_{ik}^{\max}) + \lambda_{ik}^{\min} (-y_{ik} + y_{ik}^{\min} + s_{ik}^{\min}) \right) - \right. \\ \left. - \mu \sum_k (\ln s_{ik}^{\max} + \ln s_{ik}^{\min}) + \lambda_i^x \left(x_i - \sum_k y_{ik} \right) \right] + \sum_j \lambda_j h_j(x_i). \quad (20)$$

Для решения задачи обобщенным методом Ньютона находятся производные по всем переменным. Полученные уравнения приравниваются к нулю. После преобразований система уравнений в матричной форме сводится к виду

$$\begin{bmatrix} H & J^t \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N^x \\ N^\lambda \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где H – матрица Гессе; J – матрица Якоби; Δx – приращения неизвестных; $\Delta \lambda$ – приращения множителей Лагранжа; N^x , N^λ – невязки.

Матрица H , входящая в (21), имеет такую же структуру расположения ненулевых элементов, что и матрица J , и, соответственно, матрица узловых проводимостей. Поэтому, используя представление элемента матрицы (21) в виде микро-матрицы максимальным размером (4×4), можно свести процедуру решения к хорошо отработанной процедуре решения системы линейных уравнений, используемой в задаче расчета установившихся режимов.

Третья глава посвящена задаче ввода режима в допустимую область. В работе предлагается оптимизационная постановка задачи ВРДО, обеспечивающая получение УР, в котором все накладываемые на режим ограничения соблюдаются, в том числе за счет регулирования параметров:

- активных мощностей генераторных узлов;
- реактивных мощностей генераторных узлов и источников реактивной мощности;
- напряжений в генераторных узлах;
- напряжения опорного узла;
- коэффициентов трансформации, в том числе трансформаторов с продольно-поперечным регулированием;
- ОГ и ОН (дискретное регулирование);

Ограничения в задаче могут быть заданы в мягком и жестком виде. В качестве ограничений могут быть заданы следующие величины:

- допустимый диапазон модуля напряжения;
- регулировочный диапазон реактивной мощности;
- допустимый диапазон перетока по сечению;
- допустимый ток ветви;
- регулировочный диапазон вещественной составляющей коэффициента трансформации;
- регулировочный диапазон мнимой составляющей коэффициента трансформации;

В тексте главы приводится исходный тестовый пример трехузловой схемы, на базе которого вводятся различные ограничения и демонстрируются способы их учета.

Основными ограничениями являются ограничения (6) в форме равенств, их учет фактически означает расчет УР. Задача формулируется в виде минимизации функции:

$$F(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{NG} F_i(P_{gi})$$

с учетом ограничений:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= P_1 - V_1^2 g_{11} - V_1 V_2 (g_{12} \cos \delta_{12} + b_{12} \sin \delta_{12}) - V_1 V_0 (g_{10} \cos \delta_{10} + b_{10} \sin \delta_{10}); \\ \varphi_2 &= P_2 - V_2^2 g_{22} - V_2 V_1 (g_{21} \cos \delta_{21} + b_{21} \sin \delta_{21}) - V_2 V_0 (g_{20} \cos \delta_{20} + b_{20} \sin \delta_{20}); \\ \varphi_0 &= P_0 - V_0^2 g_{00} - V_0 V_1 (g_{01} \cos \delta_{01} + b_{01} \sin \delta_{01}) - V_0 V_2 (g_{02} \cos \delta_{02} + b_{02} \sin \delta_{02}). \end{aligned}$$

Для решения задач минимизации с учетом ограничений в виде равенств используется метод Лагранжа. Функция Лагранжа примет вид:

$$L = F(P_1, P_2) + \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 + \lambda_3 \varphi_0.$$

Для определения её минимума необходимо приравнять к нулю все частные производные функции и решить полученную систему уравнений. Решение выполняется методом Ньютона, для этого нужно снова взять частные производные для каждого уравнения по всем переменным и сформировать матрицу Якоби (матрицу Гессе для исходной функции Лагранжа) и составить вектор невязок F по уравнениям.

$$J dx = -F; \quad (22)$$

$$x^{k+1} = x^k + dx. \quad (23)$$

Решив систему уравнений (22) относительно dx , необходимо скорректировать начальное приближение (23).

На рисунке 4 представлена исходная схема и схема с учетом соблюдения балансовых ограничений по активной мощности.

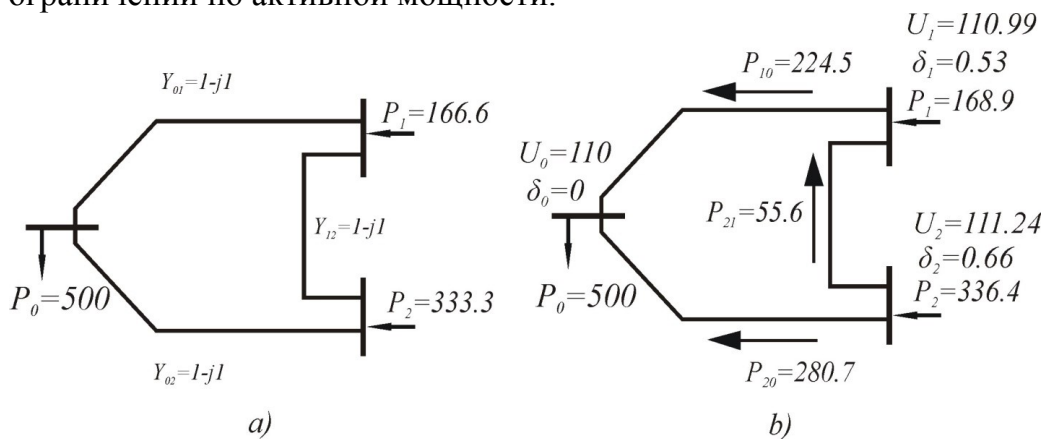


Рисунок 4 - а) Исходная модель б) УР тестируемой сети

Режимные ограничения в виде равенств учитываются таким же образом, как и ограничения на соблюдение балансов мощности в узлах. Для этого нужно включить уравнение вида $X - \bar{X} = 0$ в ограничения функции Лагранжа, где в качестве X выступает соответствующая переменная, например, мощность в узле, а \bar{X} – её ограничение. Так, например, при необходимости жестко выдержать переток в линии 2–0, функциональное ограничение перетока мощности в ветви $P_s^0 = 220$ МВт, включается в ограничения минимизируемой функции:

$$P_s^0 = 220 \text{ МВт.}$$

$$\varphi_s = P_s^0 - V_0^2 g_{02} - V_0 V_2 (g_{02} \cos \delta_{02} + b_{02} \sin \delta_{02}).$$

Функция Лагранжа

$$L = F(P_1, P_2) + \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 + \lambda_3 \varphi_0 + \lambda_4 \varphi_s.$$

Решение представлено на рисунке 5.

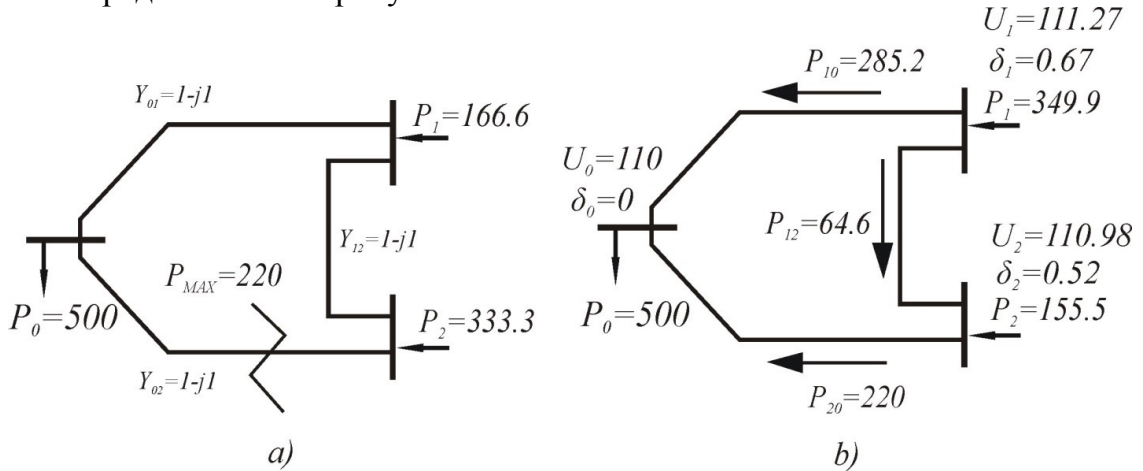


Рисунок 5 - а) Модель с заданным ограничением б) УР с жестким ограничением

Из решения видно, что переток активной мощности в точности соответствует заданной границе. Зачастую для оптимизации режима внутри допустимой области могут понадобиться не столь жесткие требования, например, в рассматриваемой задаче ограничение по перетоку может быть не столько ограничением, сколько желаемым значением перетока мощности по линии с определенными допусками на отклонение. В таких случаях необходимо говорить о мягких ограничениях, то есть о тех ограничениях, которые могут быть нарушены с ростом целевой функции. Учет таких мягких ограничений (Рисунок 6) выполняется через ввод дополнительной переменной P_s , квадрат отклонения которой от заданного значения пойдет в целевую функцию, а в уравнения ограничений будет добавлена связь этой переменной с её физическим параметром, или, другими словами, добавится уравнение перетока мощности по линии.

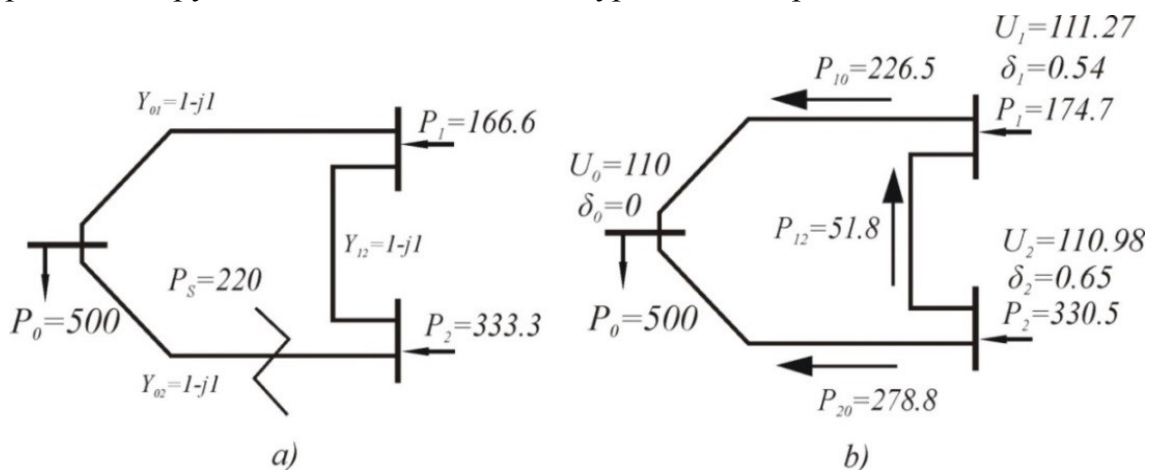


Рисунок 6 – Учет мягких ограничений а) Модель с ограничением б) УР с мягким ограничением

Минимизируемая функция примет вид

$$F(P_1, P_2, P_s) = (P_1 - P_1^0)^2 + (P_2 - P_2^0)^2 + (P_s - P_s^0)^2,$$

к ограничениям балансов добавится

$$\varphi_s = P_s - V_0^2 g_{02} - V_0 V_2 (g_{02} \cos \delta_{02} + b_{02} \sin \delta_{02}).$$

Тогда функция Лагранжа записывается

следующим образом:

$$L = F(P_1, P_2, P_s) + \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 + \lambda_3 \varphi_0 + \lambda_4 \varphi_s.$$

Решение с учетом мягких ограничений приведено на рисунке 6. Ввод весовых коэффициентов в ЦФ позволит определять степень важности ограничений и осуществлять настройку алгоритма оптимизации, смещая точку оптимума за счет регулирования цен ограничений. В главе подробно рассмотрены аспекты применения МВТ для решения задач электроэнергетики. В частности, приведено решение задачи ВРДО с изначально нарушенным ограничением на максимальный переток по сечению (Рис. 7).

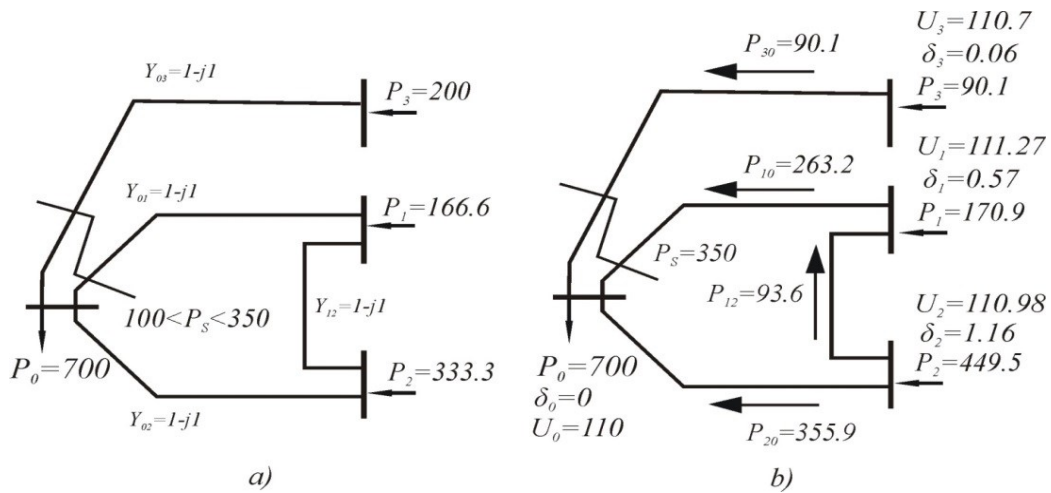


Рисунок 7 – Учет жестких ограничений а) Модель с ограничением; б) УР с жестким ограничением

Представленные алгоритмы реализованы в специализированном ПО ВРДО, осуществляющем расчет задачи ввода режима в допустимую область на оцененных данных телеметрии, в разработке которого автор принимал непосредственное участие. Схема работы ПО ВРДО представлена на рисунке 8. В главе приведено описание взаимодействия и работы модулей, входящих в систему ВРДО, и представлены различные модели генерирующего оборудования, используемые в зависимости от числа и типа заданных генераторов, возможностей плавного и дискретного регулирования активной мощности, требований минимизации потерь активной мощности.

Четвертая глава

описывает практику применения реализованного в составе ПК «RastrWin3» МВТ для задачи ОС. Приводится ряд тестовых расчетов для 13-узловой тестовой схемы демонстрирующих преимущества неквадратичных моделей измерений

Приводится общая постановка задачи для метода наименьших квадратов и метода наименьших модулей как минимизация (24) и (25) соответственно.

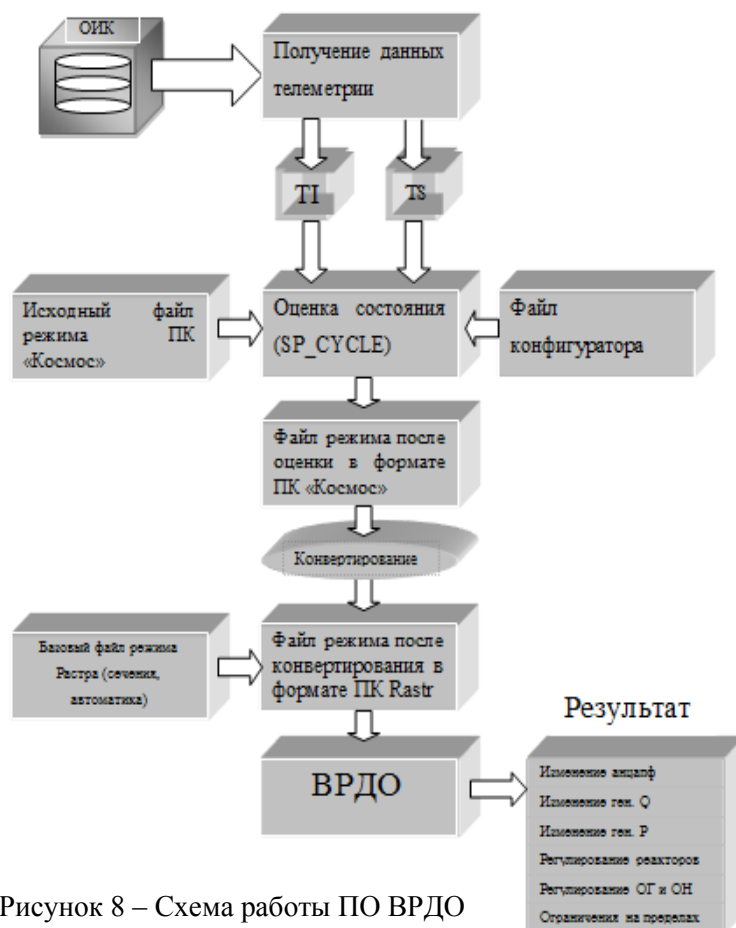


Рисунок 8 – Схема работы ПО ВРДО

$$\min F(x) = \min \frac{1}{2} [z - f(x)]^t [z - f(x)] = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} (z_i - f_i(x))^2 \quad (24)$$

$$\min F(x) = \min \sum_{i=1}^m |z_i - f_i(x)|. \quad (25)$$

Рассматриваются классические методы решения:

$$(J^t J) \Delta x = J^t r, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} J &= QR, \\ R \Delta x &= Q^t r. \end{aligned} \quad (27)$$

Анализируются их достоинства и недостатки. Общей проблемой в реализации классических методов МНК и МНМ является трудность учета ограничений в виде неравенств для нелинейных систем.

В диссертации предлагается **новый** подход к задаче оценивания состояния, основанный на базе нелинейного оптимизационного метода внутренней точки. В качестве ЦФ используется функция вида

$$\min F = \sum_i \left(\alpha_i \gamma_p^2 (P_i^{\text{изм}} - P_i(V, \delta))^2 + \beta_i \gamma_p |P_i^{\text{изм}} - P_i(V, \delta)| \right), \quad (28)$$

где: α_i – цена (весовой коэффициент) квадрата отклонения расчетного значения параметра от измеренного; γ_p – цена (весовой коэффициент) типа измеренного

параметра, которая необходима для сопоставления различных типов параметров (например, мощности и напряжения); $P_i^{изм}$ – измеренное значение параметра; $P_i(V, \delta)$ – расчетное значение параметра (функция от модуля и угла напряжения в узлах); β_i – цена (весовой коэффициент) модуля отклонения расчетного значения параметра от измеренного. Основные модели в производных представлены на рисунке 9.

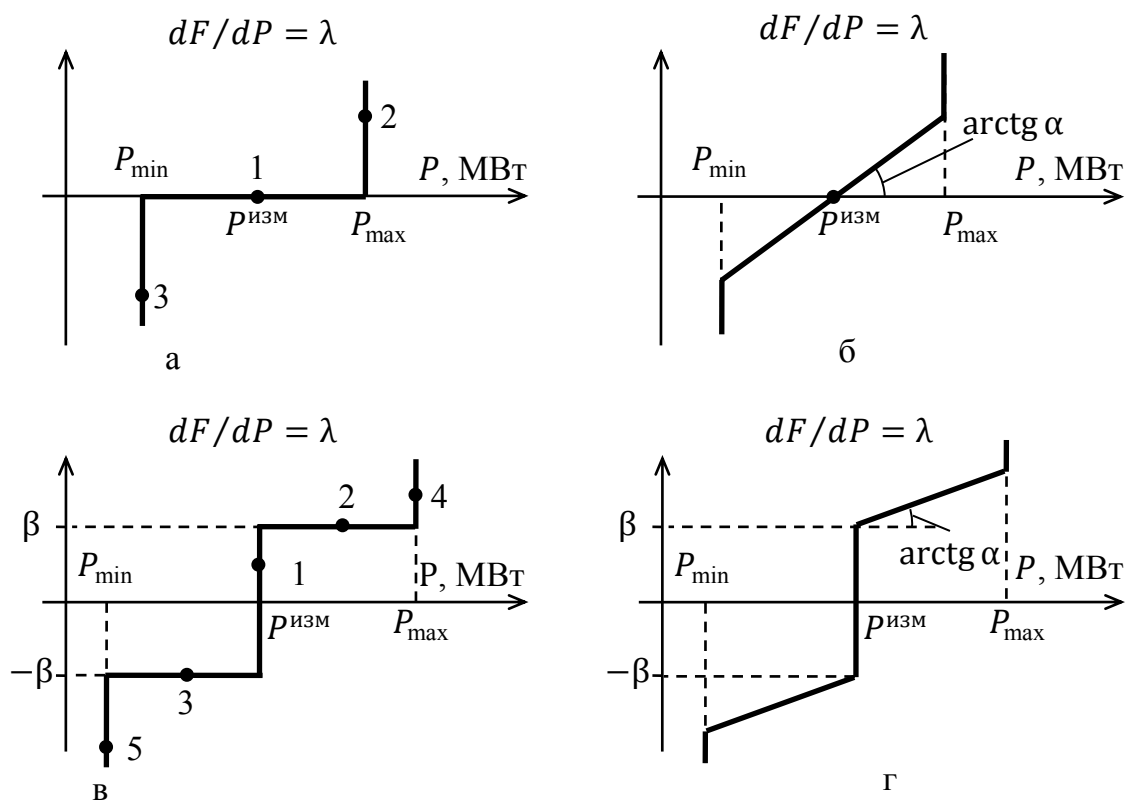


Рисунок 9 – Виды моделей измерений в производных: а) пустое измерение, б) квадратичная модель, в) линейная модель, г) комбинированная модель

На базе основных моделей возможно конструирование различных моделей измерений в задаче ОС, в том числе и моделей, обеспечивающих ОС по неквадратичным критериям. Такая модель представлена на рисунке 10.

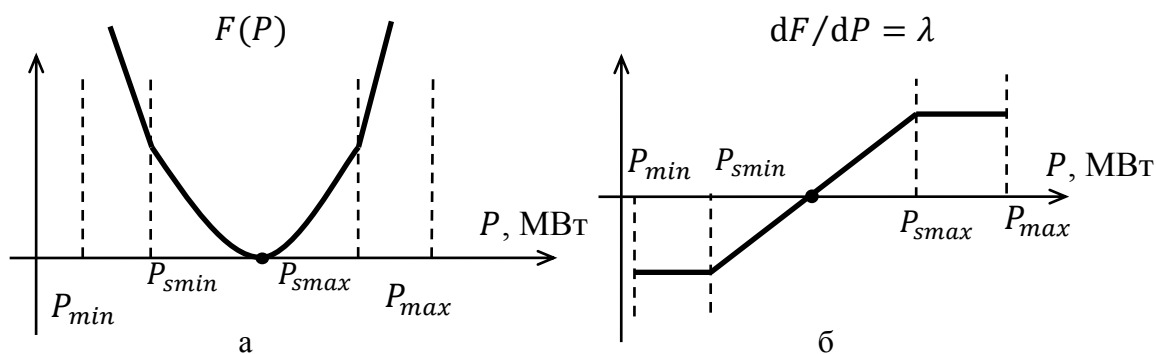


Рисунок 10 – Неквадратичная модель измерения: а) вид ЦФ измерения; б) производная функции измерения

Приведены рекомендации выбора моделей для наиболее распространенных типов измерений, таких величин, как: напряжения, генерация активной мощности, перетоки P

и Q в начале и конце линии и прочих. Представлены новые типы измерений, отражающих априорно известную или дорасчетную информацию об энергосистеме, для стабилизации функции ОС. К ним относятся измерения тангенса угла нагрузки, перетока мощности по сечению, мощности нагрузочной группы (района).

Приведен анализ и представлены результаты влияния грубых ошибок измерений в квадратичной, линейной, комбинированной, неквадратичной моделях измерений, а также для модели с зоной нечувствительности. Показаны преимущества линейной модели при идентификации грубых ошибок. Приведен способ точного выдерживания измерений до определенных пределов изменения множителя Лагранжа за счет использования комбинированной модели. Такой подход позволяет учитывать измерения, полученные с высокой точностью. Обычно под ними понимаются данные из WAMS-систем, получающих в последнее время все большее распространение и требующих специальных методов учета в задаче ОС.

В главе рассмотрены особенности использования токовых измерений: отсутствие знака (направления) и невозможность разделения активной и мнимой составляющих могут создавать дополнительные проблемы в ОС и даже приводить к ухудшению результатов ОС.

Рассмотрены основные способы априорной фильтрации грубых ошибок телеизмерений и их привязки к расчетной схеме. При подготовке больших, начиная примерно от 700 узлов, реальных схем для проведения ОС достаточно часто возникают ошибки на этапе обвязки схемы телеметрией. Такие ошибки вносят существенные искажения в результаты ОС в сравнении с реальным состоянием энергосистемы. Для поиска и исправления наиболее грубых ошибок предлагается использовать механизм фильтрации, основанный на проверке соответствия друг другу взаимосвязанных ТИ и ТС в одном временном срезе (статическая фильтрация) и анализе статистических данных для всех измерений на временном интервале (динамическая фильтрация).

На кафедре АЭС УРФУ ранее был разработан алгоритм статической фильтрации для повышения эффективности ОС ЭЭС. Автор диссертации разработал динамический фильтр и реализовал его вместе со статическим фильтром, при этом добавив к алгоритму последнего элемент топологического анализа. Автором выбраны наиболее эффективные и простые в реализации способы фильтрации недостоверной телеметрии на основе которых реализованы фильтры телеметрии, применяемые в составе ПК «RastrWin3».

Статический фильтр (Рисунок 11) выполняет следующие виды контроля:

- контроль допустимых значений ТИ;
- контроль соответствия коммутационного состояния ЛЭП перетоку P;
- контроль несоответствий ТИ начала и конца;
- выявление «плохих» ТИ через расчет потерь;
- расчет балансов мощностей узлов по ТИ;
- контроль дублей измерений.

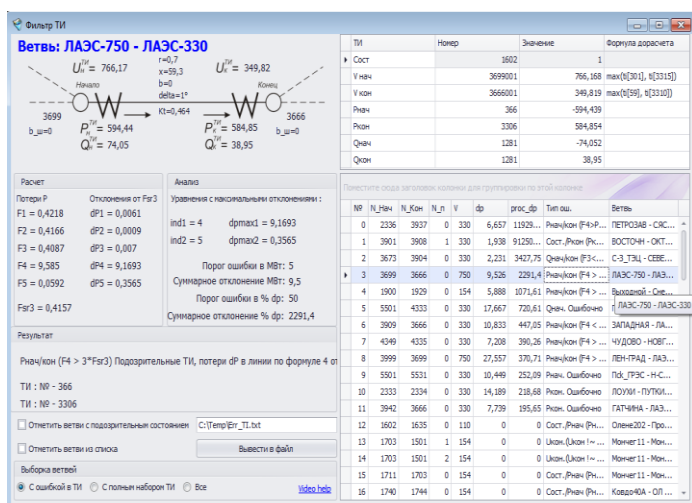


Рисунок 11 - Вид статического фильтра

В основе работы динамического фильтра лежит анализ статистической информации, рассчитанной для всей телеметрии. Анализ статистики позволяет выявить выбросы значений ТИ на протяжении времени наблюдений, нехарактерное поведение графиков ТИ, различные колебания и пропадания сигналов. Динамический фильтр (Рис. 12) выполняет следующие виды анализа:

1. Статистический анализ ТИ:
 - минимальное значение;
 - максимальное значение;
 - среднее значение;
 - дисперсия;
 - среднееквадратичное отклонение σ ;
 - признак наличия отклонений $>3\sigma$.
2. Корреляционный анализ ТИ.
3. Анализ поведения ТС.
4. Анализ балансов мощности в узлах.
5. Статистический анализ оцененных ТИ.

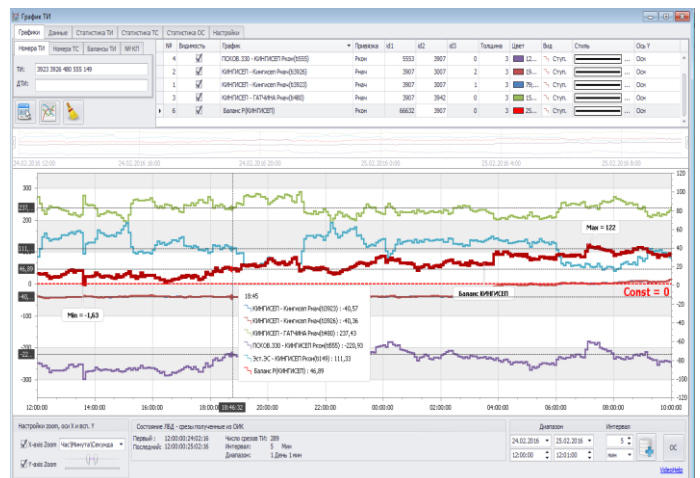


Рисунок 12 – Динамический фильтр

Совместное применение методов статической и динамической фильтрации обеспечивает эффективный механизм поиска грубых ошибок в схеме привязки телеметрии. В работе вынесены предложения по дальнейшему усовершенствованию механизмов фильтрации на основе использования коммутационных схем для оценки топологии сети по данным ТС и контрольных уравнений в оперативном режиме работы ОС для своевременного выявления сбоев ТИ.

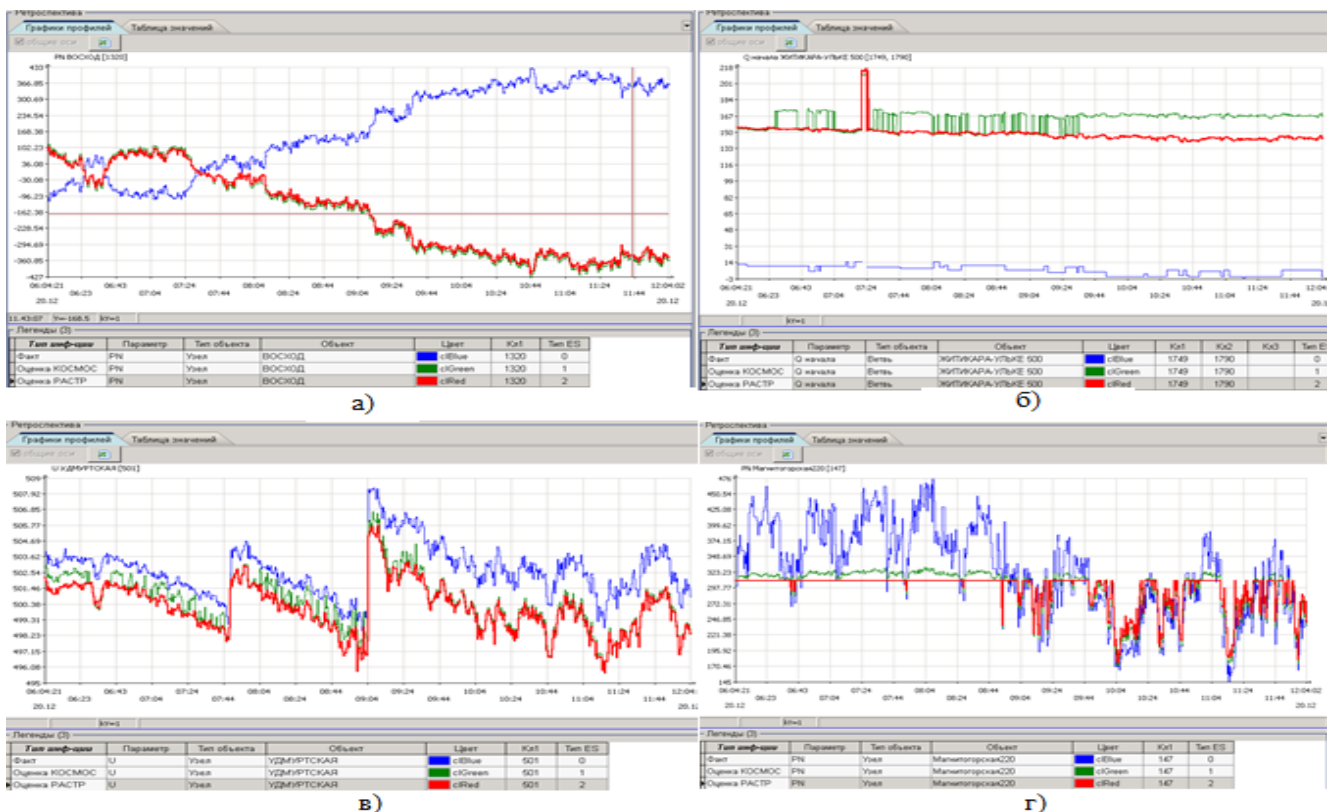


Рисунок 13 - Примеры результатов тестирования алгоритма ОС на модели ОЭС Урала а) реакция на ошибку в знаке ТИ б) скачки Q перетока в работе основного алгоритма в) реакция ОС на скачки измерения U г) учет ограничения по активной мощности

В завершение главы приводятся результаты тестирования разработанного алгоритма ОС, проведенного на моделях ОЭС ОДУ Урала (144 узла) и ОДУ Северо-Запада (1024 узла), применяемых в проектах ЦСПА и СМЗУ соответственно. Результаты тестирования сравнивались с результатами промышленного ПК «Космос», специализирующегося на выполнении функции ОС. Примеры представлены на рисунке 13. На основе данных, полученных в ходе тестирования, подтверждены известные проблемы, возникающие в задачах ОС на больших схемах, а именно: низкое качество данных телеметрии по реактивной мощности, приводящее к искажениям профилей напряжений, локальное отсутствие избыточности информации и даже отсутствие наблюдаемости отдельных участков схем. Кроме того, существуют ошибки привязки телеметрии к схеме, вносящие порой существенные погрешности, а порой не оказывающие значимого влияния и потому трудно идентифицируемые при статическом анализе.

В целях решения обозначенных задач приведены рекомендации по применению измерений тангенсов углов нагрузки, использованию различных моделей измерений, применению разработанных фильтров и повышению оснащенности телеметрией.

В ходе тестирования встречались ситуации неуспешного завершения работы одного из двух модулей, выполняющих ОС. Для ситуаций неуспешного оценивания модулем ПК «RastrWin3» даны разъяснения о причинах ошибки, которые обычно связаны с невозможностью выдерживания жестких ограничений и их нарушением в результатах ОС, полученных в ПК «Космос». Сделан вывод о применимости представленного подхода в задаче ОС для схем большой размерности с возможностью гибкой настройки алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ методов оптимизации широко применяемых для решения задач диспетчерского управления ЭЭС. Выявлены основные трудности получения решения, приводящие к необходимости декомпозиции задач по активной и реактивной мощности. Представлены результаты объединения задач оптимизации по активной и реактивной мощности для получения единого решения. Выявлена проблема «перерегулирования» энергосистем, приводящая к необходимости выдерживания большого количества ограничений в виде неравенств. Представлена классификация используемых ограничений.

2. Рассмотрены теоретические основы метода внутренней точки для класса оптимизационных задач с наличием ограничений. На основе МВТ разработана математическая модель для решения оптимизационных задач с учетом технологических ограничений. В модели реализована возможность задания уникального вида функции от каждого параметра для формирования общей целевой функции. Разработан унифицированный алгоритм решения, не привязанный к виду ЦФ.

3. Сформулированы условия постановки задачи ВРДО как оптимизационной задачи с учетом ограничений, решаемой с использованием МВТ. Для задачи ВРДО разработаны модели дискретного регулирования источников активной мощности для возможности моделирования управляющих воздействий вида ограничения генерации и ограничения нагрузки. Представлены способы формирования ЦФ в зависимости от необходимости минимизации потерь, учета технологических ограничений, минимизации отклонений параметров от заданных значений.

4. Для задачи оценивания состояния разработаны специальные модели измерений, в том числе позволяющие учесть априорные знания о рассматриваемой

энергосистеме и подавить влияние ошибочных измерений, представлены способы их учета в задаче ОС.

5. На основе простых и эффективных методов анализа ошибок реализован фильтр грубых ошибок телеметрии. Результаты тестирования на реальных схемах подтвердили эффективность применяемых методов для первичной отбраковки грубых ошибок привязки телеметрии к схеме, и на практике позволили выявить ошибки привязки телеметрии в модели сети ОДУ Северо-Запада.

6. Результаты исследований использованы при развитии и модернизации отечественного ПК широкого применения RastrWin и его расчетных модулей, предназначенного для решения задач диспетчерского управления.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Максименко Д.М. Верификация модели обвязки схемы и идентификация грубых ошибок данных телеметрии в ПК «RastrWin3» / В.Г. Неуймин, П.М. Ерохин, Д.М. Максименко // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". 2016. Т. 16, №1. С. 24-29 (0,25 п. л. / 0,21 п. л.).
2. Д.М. Максименко. Методика расчета схем замещения трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. 2016. №7. С. 38-45 (0,33 п. л.).

Свидетельства о госрегистрации программы для ЭВМ:

3. А.с. 2016662459 (Россия) о государственной регистрации программы для ЭВМ от 10 ноября 2016 г. Оценка состояния для централизованной системы противоаварийной автоматики (ОС ЦСПА) / Неуймин В.Г., Максименко Д.М.. Свидетельство № Заявка 2016619764, дата поступления 16 сентября 2016 г.

Другие публикации:

4. Максименко Д.М. Формирование оптимальных управляющих воздействий при анализе режимной надежности по критерию N-i // «Электроэнергетика глазами молодежи»: сб. материалов всероссийской науч.-техн. конф. Т.1. Екатеринбург, 2010. С. 338-341 (0.18 п. л.).
5. Максименко Д.М. Создание EMS приложений с использованием расчетных модулей RASTRWIN в составе SCADA системы на примере ПО ВРДО // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах: сб. материалов всероссийской науч.-техн. конф. Новосибирск, 2011. С. 267-271 (0.21 п. л.).
6. Максименко Д.М. Оптимизация суточных режимов энергосистемы с адаптивным расчетом максимально допустимых перетоков / Шубин Н.Г., Неуймин В.Г., Багрянцев А.А., Максименко Д.М. // Известия НИИ постоянного тока. 2011. № 65. С. 135-144 (0.47 п. л. / 0.1 п. л.).
7. Максименко Д.М. Модуль ввода режима в допустимую область / Неуймин В.Г., Александров А.С., Максименко Д.М., // Современные устройства в электроэнергетике: релейная защита, автоматика и элементы активно-адаптивных сетей. Подготовка кадров для электроэнергетической отрасли: сб.

- материалов всероссийской науч.-техн. конф. Томск, 2012. С. 23-24 (0.1 п. л. / 0.05 п. л).
8. Максименко Д.М. Аспекты реализации модуля ВРДО в составе ПК RastrWin3 / Максименко Д.М., Александров А.С., Ерохин П.М. // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. материалов международной науч.-техн. конф. Т.1. Екатеринбург, 2012. С. 294-299 (0.25 п. л. / 0.1 п. л).
 9. Максименко Д.М. Использование оптимизационных методов внутренней точки для оценивания состояния энергосистем / Ерохин П.М., Неуймин В.Г., Шубин Н.Г., Максименко Д.М. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2012. №1(66). С. 39-46 (0.31 п. л. / 0.1 п. л).
 10. Максименко Д.М. Оценивание состояния на базе оптимизационного алгоритма в ПК RastrWin3 / Максименко Д.М., Машалов Е.В., Неуймин В.Г., // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. №2(69). С. 36-43 (0.33 п. л. / 0.1 п. л).
 11. Максименко Д.М. Расчет МДП в системе мониторинга запасов устойчивости / Александров А.С., Неуймин В.Г., Максименко Д.М. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2014. №1(70). С. 13-24 (0.47 п. л. / 0.15 п. л).
 12. Максименко Д.М. Реализация оценивания состояния на базе оптимизационного алгоритма в ПК RastrWin3 / Неуймин В.Г., Ерохин П.М., Максименко Д.М. // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. материалов международной науч.-техн. конф. Т.1. Иваново, 2015. С. 135-138 (0.23 п. л. / 0.09 п. л).