ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертационную работу Максименко Дмитрия Михайловича
«Оценивание состояния энергосистем и ввод режима в допустимую область оптимизационным методом внутренней точки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

1. Актуальность темы диссертации

Среди многочисленных задач, решаемых при управлении функционированием электроэнергетической системой (ЭЭС), оптимизационные расчеты занимают ведущее место, как по значимости, так и по сложности применяемых методов и моделей. В современных условиях, когда размерность расчетных моделей исчисляется десятками тысяч и более переменных и ограничений, а получаемые на их основе результаты используются при оперативно-диспетчерском управлении ЭЭС, к методам и алгоритмам предъявляются высокие требования по качеству решения, скорости и надежности вычислительного процесса.

Современная математика располагает большим арсеналом оптимизационных методов. Среди них выделяется метод внутренней точки (МВТ), который зарекомендовал себя как высокоэффективный метод решения задач линейного, выпуклого и невыпуклого нелинейного программирования. Существует множество исследований по применению различных алгоритмов МВТ для решения оптимизационных задач в электроэнергетике, в том числе, рассматриваемых в диссертационной работе Максименко Д.М.: ввода режима в допустимую область (ВРДО), формулируемой в виде задачи комплексной оптимизации установившегося режима ЭЭС, и оценивания состояния (ОС) ЭЭС по критериям оптимальности оценок, отличным от классического квадратичного критерия. За рубежом эти исследования были начаты в начале 90-х годов прошлого века, и одна из первых работ была по ОС ЭСС. В нашей стране систематические исследования в области решения электроэнергетических задач методом внутренних точек проводятся с конца 70-х годов и положены в основу вычислительных комплексов, разработанных и развиваемых в ИСЭМ СО РАН.

Диссертационное исследование Максименко Д. М., направленное на дальнейшее совершенствование методов решения задач ВРДО и ОС ЭЭС на основе МВТ в плане алгоритмизации и унификации вычислительной модели, учета новых особенностей задач, вытекающих из современных условий эксплуатации ЭЭС, является, несомненно, актуальным.

2. Новизна исследований и полученных результатов

Новизна диссертационной работы состоит в разработке, теоретическом и экспериментальном обосновании математической модели и метода решения оптимизационных задач диспетчерского управления, ВРДО и ОС ЭЭС, функции переменных которых могут задаваться кусочными-гладкими, отвечающими реальным характеристикам ЭЭС или обусловленными особенностями постановки задачи, а ограничения – включать широкий спектр технологических и режимных ограничений. В рамках этой модели предложены и реализованы: способ учета дискретного характера управляющих воздействий, связанных с отключением генерации и нагрузки при ВРДО; неквадратичные критерии оптимальности оценок, применяемые при робастном ОС ЭЭС; модели неизмеряемых параметров, задаваемых пределами их изменения, и параметров, измеряемых с высокой точностью.

3. Практическая значимость работы

Работа имеет конкретную практическую направленность на создание эффективных алгоритмов и промышленного программного обеспечения для решения задач ВРДО и ОС ЭЭС. Разработанная в диссертации вычислительная модель реализована в виде ПО «ВРДО», которое прошло опытную эксплуатацию в филиалах АО «СО ЕЭС», а так же в виде модуля ОС ЭЭС для промышленного ПК «RastrWin3», апробированного на реальных схемах ЭЭС.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Результаты диссертационной работы получены при корректном использовании положений теории ЭЭС, обоснованном применении методов нелинейного программирования, а так же подтверждаются итогами опытной эксплуатации ПО "ВРДО", о чем свидетельствует приведенный в приложении диссертации "Акт готовности к вводу в промышленную эксплуатацию", и согласованностью результатов ОС ЭЭС с результатами промышленного ПК "Космос", полученными в ходе тестирования на реальных данных.

5. Подтверждение опубликованных основных результатов работы.

По теме диссертационного исследования опубликовано 16 печатных работ, в том числе две статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ. Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают основное содержание диссертационной работы и полученные в ней научные результаты.

6. Соответствие работы научной специальности

Объект, предмет и содержание исследования соответствуют паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, а именно пунктам 6 (Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике), 7 (Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем) и 8 (Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике).

7. Замечания и вопросы по диссертационной работе

7.1. В первой главе при анализе и классификации методов оптимизации автор ограничивается рассмотрением методов, относящихся к уровню развития математического программирования 60-80-х годов прошлого века. Ограничения и недостатки, связанные с их применением хорошо известны и описаны в большом количестве опубликованных работ. При этом в главе отсутствует какое-либо упоминание о методе внутренней точки, не говоря уже о методах, интенсивно разрабатываемых и исследуемых при решении оптимизационных задач в электроэнергетике в настоящее время. Краткий экскурс в историю развития и применения метода внутренней точки в начале второй главы так же основан на публикациях 20-летней давности. Знаком ли автор с современными работами и исследованиями МВТ и методов решения электроэнергетических задач на его основе?

7.2. Названия второй главы "Адаптация метода внутренней точки для решения оптимизационных задач" и раздела 2.6 "Адаптация МВТ для задач оптимизации", на мой взгляд, с одной стороны не корректны, с другой стороны не отражают их содержания. Во-первых, метод внутренней точки по своему назначению уже относится к методам решения задач оптимизации с ограничениями. Во-вторых, итерационный процесс, описываемый в 2.6, соответствует стандартному прямо-двойственному алгоритму внутренней точки. В главе по сути представлена методика преобразования исходной оптимизационной задачи с кусочно-квадратичной целевой функцией и нелинейными ограничениями в форме равенств и неравенств в задачу с квадратичной целевой функцией и нелинейными ограничениями-равенствами путем введения дополнительных ограниченных переменных, названных в работе элементарными, которая затем решается МВТ. Поэтому речь скорее идет об адаптации задачи к МВТ?

7.3. В силу нелинейности уравнений установившегося режима, задачи, рассматриваемые в работе, относятся к невыпуклым нелинейным задачам. По этой

причине унимодальность задачи ОС ЭЭС, которую автор отмечает в разделе научной новизны, не гарантируется. Примеры, иллюстрирующие наличие множества стационарных точек при оценивании состояния по неквадратичным критериям, можно найти в работе [120]. Чем подтверждается оптимальность решений, получаемых по результатам расчетов задач ВРДО и ОС ЭЭС?

7.4. Одним из основных требований, предъявляемых к методам расчета режимов ЭЭС, является высокая надежность сходимости итерационных процессов. Используемый в работе прямо-двойственный алгоритм внутренней точки был разработан для задач линейного, а затем квадратичного программирования. Применение его чистом виде к задачам нелинейного программирования не обосновано, поскольку в таких условиях его сходимость не гарантирована. Сравнительно недавние исследования сходимости алгоритма Меротры, описанного в разделе 2.2, продемонстрировали ненадежность его работы даже на линейных и квадратичных задачах. Примеры отказов в сходимости вычислительного процесса приводятся и в работах, посвященных применению прямо-двойственного алгоритма для решения оптимизационных задач диспетчерского управления. Какова статистика отказов разработанной вычислительной модели, и каким образом предполагается решать эту проблему?

7.5. Изложение в главе 2 содержит много математических неточностей и ошибок, некорректных предложений, затрудняющих чтение работы. Записанные системы уравнений зачастую не имеют правой части, что наблюдается и в последующих главах (см. (2.4), (2.42), (3.7), уравнения на стр. 64, 65, 69, 71 и т.д.). На системы нелинейных уравнений (2.4), (2.8) автор ссылаются как на СЛУ (системы линейных уравнений). Условия оптимальности первого порядка (2.4) получаются из условий ККТ, но никак не приравниванием к нулю производных функции Лагранжа L (2.3), как считает автор, поскольку в задаче имеются неотрицательные переменные s. В ситуациях, когда они учтены с помощью барьерной функции как в (2.40), приравнивание к нулю производных от L так же не дает (2.42), в чем можно убедиться дифференцированием L. Не ясно, каким образом получена линейная система (2.13) (а так же (2.17) и (2.21)), линеаризация (2.10) не приводит к формуле (2.13). Невязки нелинейных уравнений (2.52) и их приращения (2.54-2.58) имеют одинаковые обозначения, что затрудняет понимание излагаемого далее порядка исключения переменных при редуцировании линеаризованной системы линейных уравнений. Как автор прокомментирует указанные замечания?

7.6. Не совсем понятно, с какой целью во вторую главу включен раздел 2.7. "Методы Ньютона в задаче расчета установившихся режимов".

7.7. Вывод по второй главе о том, что разработанная модель позволяет "использовать дискретные УВ вида ОН, ОГ в задаче ВРДО, проводить ОС по неквадратичным критериям" и далее по тексту, не следует из содержания главы. Этим вопросам посвящены следующие главы.

7.8. В п. 5 выводов единственным недостатком разработанной вычислительной модели автор считает увеличение размерности задачи за счет введения дополнительных переменных. Как автор оценивает возможности использования "горячего" старта и учета несовместности ограничений.

7.9. В третьей главе автор отводит чрезмерно большое место описанию и демонстрации известных постановок и классических методов решения задач оптимизации режима и ввода режима в допустимую область. При этом выносимому на защиту способу учета дискретного регулирования источников активной мощности для моделирования управляющих воздействий в виде ограничения генерации или нагрузки посвящен один абзац (стр.84-85). Вызывает сомнение, что мощность генератора, задаваемого в задаче ВРДО функцией (3.22), может принимать только дискретные значения: Pmin, 0, Pmax, и не может принимать промежуточные значения. Никаких теоретических или экспериментальных подтверждений этому в тексте работы нет.

7.10. В начале четвертой главе, как и в предыдущих главах, дается необоснованно низкая оценка современного уровня развития методов ОС ЭЭС. Например, нельзя согласиться с утверждением на стр.96, что для учета узлов с нулевой инъекцией разработано два метода: задание больших весовых коэффициентов для соответствующих слагаемых в целевой функции и предварительное их исключение из матрицы Якоби. Это звучало бы справедливо в первую декаду развития теории оценивания состояния ЭЭС, т.е. 35 лет назад, в связи с чем опять возникает вопрос о знакомстве автора с современными исследованиями, проводимыми в области ОС ЭЭС.

7.11. Среди измерений, по которым выполнялось ОС тестовой ЭЭС (табл. 4.4-4.8), нет ни одного измерения напряжения. Поскольку система в таком случае не наблюдаема, чем объясняется оцениваемость параметров режима?

7.12. Пример на рис. 4.5, используемый для иллюстрации проблемы грубых ошибок при использовании линейной оценки измерения в условиях разных "цен", – не корректный. Независимо от значений весов, определить недостоверное измерение нельзя: имеющиеся два измерения активной мощности по линии образуют критическую пару, грубые ошибки в которых детектируемы, но не идентифицируемы. Однако выводы сделаны автором верные. Стоит только добавить, что нежелательное поведение линейных оценок определяется уровнем

локальной алгебраической избыточности измерения, которая зависит не только от весов, но и параметров схемы замещения ЭЭС. Неучет этого в разработанных моделях не обеспечивает достаточную робастность линейных оценок.

7.13. В работе абсолютно не раскрыт вопрос с заданием весов α, β, γ, с которыми измерения входят в целевую функцию (4.11), и которые называются в работе почему-то ценами (Price). На стр. 112 говориться о возможности их определения экспертным путем. На практике это означает, что веса будут установлены произвольным образом, сводя на нет весь эффект от разработанных моделей оценок, либо отстроены так, чтобы результаты оценивания подгонялись под желаемые, а не действительные. В теории ОС ЭЭС давно обосновано и никем не оспаривается использование в качестве весов величин, обратных стандартным отклонениям измерений для квадратичного критерия и стандартным отклонениям (либо их робастным вариантам) оценок измерений для неквадратичного или линейного критерия.

7.14. Представленные результаты сравнительных расчетов, выполненные на реальных данных ЭЭС с помощью разработанного модуля оценивания состояния и промышленного ПК "Космос", выглядят убедительно и показывают в ряде случаев преимущества использования предложенных в работе методов и алгоритмов. Вместе с тем, следует отметить недостаточность этих исследований, по причине использования в ПК "Космос" устаревших методов, относящихся к началу 80-х годов прошлого века. Выполнялись ли сопоставительные расчеты относительно более современных методов ОС ЭЭС, разрабатываемых как в России, так и за рубежом?

8. Достоинства и недостатки содержания и оформления диссертации

Содержание диссертации соответствует сформулированным целям. В работе последовательно решены поставленные автором задачи. Сделаны корректные выводы. Среди недостатков следует отметить небрежность в математических описаниях, отсутствие какого-либо упорядочения библиографических записей в списке литературы.

9. Заключение

Представленная диссертационная работа на тему "Оценивание состояния энергосистем и ввод режима в допустимую область оптимизационным методом внутренней точки" представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые решения важной и актуальной научной задачи

совершенствования математических методов моделирования ЭЭС, вносит заметный вклад в развитие теории и практики задач ВРДО и ОС ЭЭС.

Считаю, что диссертационная работа отвечает требования Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Максименко Дмитрий Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент, к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией энергетических систем
Института социально-экономических и энергетических
проблем Севера Коми НЦ УрО РАН

Хохлов Михаил Викторович
6 сентября 2017 г.

Подпись Хохлова М.В. заверяю

Подпись Хохлова М.В.
заверяю.
Заведующая канцелярией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук
«06» сентября 2017 г.

ФГБУН Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук
167982, г. Сыктывкар, ул Коммунистическая, д. 26
тел.: (8212) 44-50-37
E-mail: hohlov@energy.komisc.ru