

Отзыв

официального оппонента – доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Воропая Николая Ивановича – на диссертацию Давыдова Виктора Васильевича «Исследование и разработка моделей расчета предельных режимов электрических систем», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

1. Актуальность проблемы

Несмотря на имеющуюся достаточно успешную историю разработки моделей и методов расчета предельных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), насчитывающую несколько десятилетий, эта проблема еще далека от исчерпывающего решения. Поскольку в предельных режимах актуальной является задача оценки их статической устойчивости, использование надежных методов расчета режимов и корректных критериев статической устойчивости ЭЭС приобретает принципиальное значение.

Во-первых, управление режимами реальных ЭЭС требует использования быстрых и надежных методов расчета предельных режимов системы. Во-вторых, несмотря на глубокое изучение особенностей уравнений установившихся режимов ЭЭС, при реализации алгоритмов расчета установившихся режимов используются определенные нестрогие эвристические предположения, которые целесообразно устранить. В-третьих, для комплексного теоретического рассмотрения задач собственно расчета режима и оценки его статической устойчивости до сих пор практически не использовались мощные средства дифференциальной геометрии, включая теории особенностей, бифуркаций и катастроф, что может дать новые результаты. И, наконец, в-четвертых, до сих пор практически при определении предельных режимов ЭЭС используется подход П.С.Жданова в котором предполагается, что исходный режим является статически устойчивым, а затем производится утяжеление режима до тех пор, пока критерий статической устойчивости не сменит знак. Проблема в том, что используемые в настоящее время алгоритмы расчета потокораспределения не гарантируют получение такого режима, и необходимо искать возможности преодоления этой проблемы.

Все сказанное подчеркивает актуальность рассматриваемой автором проблемы разработки эффективных моделей и методов расчета предельных режимов сложных ЭЭС.

2. Новизна исследований и полученных результатов

Новизна исследований автора и полученных им результатов имеет место в нескольких важных направлениях.

- Целый ряд принципиальных новых результатов, полученных в диссертации, связан с ролью балансирующего узла при расчетах установившихся режимов ЭЭС. В частности, показано, что местоположение балансирующего узла существенно влияет как на расчетную область

существования решения уравнений установившихся режимов ЭЭС, так и на пределы по статической апериодической устойчивости системы. Выявлена неспособность балансирующего узла поддерживать установившийся режим в некоторых узлах в предельных режимах ЭЭС. Показано, что в реальных ЭЭС изменение местоположения балансирующего узла делает этот режим неопредельным.

- Исследование позиционной модели ЭЭС позволило выявить ряд новых положений, в том числе тот важный факт, что эта модель неявно реализует идеологию распределенного балансирующего узла, причем коэффициенты участия узлов в балансировании режима по активной мощности прямо пропорциональны постоянным инерции синхронных машин.
- Предложены и теоретически исследованы модели нелинейного программирования ближайших к границе существования предельных режимов. Разработан простой, быстрый и надежный метод нелинейного программирования для расчета предельного режима в заданном направлении утяжеления. Этот метод значительно превосходит известные по указанным параметрам.

Перечисленными теоретическими результатами расширены фундаментальные знания о предельных режимах в моделях потокораспределения ЭЭС, что и составляет новизну исследований автора и полученных им результатов.

3. Практическая значимость и реализация результатов

Практическая значимость работы связана с повышением надежности и устойчивости ЭЭС за счет более адекватного определения их предельных режимов, повышения быстродействия и точности используемых алгоритмов расчета предельных режимов при управлении реальными ЭЭС.

4. Обоснованность и достоверность научных выводов, положений и рекомендаций

Выполнение требований обоснованности и достоверности выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректным применением теории электрических цепей и теории электроэнергетических систем, математического моделирования режимов ЭЭС, соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, широкой практической апробацией результатов исследований диссертации, одобрением результатов работы российскими и зарубежными специалистами в ходе обсуждений, в том числе на конференциях.

5. Заключение о соответствии диссертации установленным критериям

Диссертационная работа В.В.Давыдова в полном объеме отвечает критериям, которые установлены «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а именно:

- 5.1. Указанная диссертантом *цели работы* – развитие теории и практики применения математических моделей потокораспределения и предельных режимов ЭЭС, построение робастного метода расчета потокораспределения, гарантирующего получение статически устойчивого режима ЭЭС, разработка и исследование моделей нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС, *реализованы в представленной диссертационной работе.*
- 5.2. *Автореферат диссертации* В.В.Давыдова соответствует *диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: по целям и задачам исследования; основным положениям, выносимым на защиту; определению актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и др.
- 5.3. *Основные выводы и результаты диссертационной работы* соответствуют поставленным задачам исследований и сформулированы автором структурно логично и содержательно.
- 5.4. *Научные публикации* В.В.Давыдова, изданные в период работы над диссертацией, *соответствуют тематике диссертационной работы* и с достаточной полнотой отражают ее суть, основные результаты и выводы.
- 5.5. *Тема и содержание диссертации* В.В.Давыдова *соответствует паспорту специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»* (далее курсивом по тексту паспорта):
 - **по направлению исследования**, связанному с разработкой быстродействующих и надежных моделей и методов определения предельных режимов ЭЭС с оценкой статической устойчивости системы в этих режимах в части *«...развития и совершенствования теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного снабжения потребителей электроэнергией в необходимом количестве и требуемого качества...»* в соответствии с формулой специальности;
 - **по областям исследования** в соответствии с пунктами паспорта специальности:
 - п.6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»,*
 - п.7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем»,*

п.8 «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике»,

п.10 «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов».

п.13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике»;

- по объектам исследования – электроэнергетическим системам – в части «...электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей...».

Диссертационная работа В.В.Давыдова написана доступным грамотным языком, корректным в научном и техническом отношении. Имеет место достаточно высокий математический уровень изложения материала. Материалы и результаты исследования изложены в объеме, достаточном для понимания их сути. Результаты, полученные диссертантом, являются важным и весомым вкладом в теорию, методы и средства определения предельных режимов сложных ЭЭС.

6. Анализ содержания диссертации

Диссертация В.В.Давыдова состоит из введения, пяти глав, заключения и восьми приложений. Полный объем работы составляет 462 страницы, включая 41 рисунок и 28 таблиц. Список литературы содержит 372 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность направления исследований, сформулированы цели и задачи исследований диссертации, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены результаты исследования математической модели установившихся режимов ЭЭС и ее особенностей, влияющих на расчеты предельных режимов системы. Рассмотрена геометрическая интерпретация уравнений установившихся режимов ЭЭС как гиперповерхности в пространстве мощностей узлов, а область существования режимов – как проекция этой гиперповерхности вдоль оси активной мощности балансирующего узла. Выявлено влияние местоположения балансирующего узла на предельные режимы и области существования режимов. Исследована позиционная модель ЭЭС, получен критерий предельных режимов по статической аperiodической устойчивости системы, обобщающий критерий Вагнера-Эванса на многомашинные ЭЭС, выявлена его связь с критерием предельных режимов модели потокораспределения с распределенным балансирующим узлом. Разработана расчетная модель предельных режимов, обеспечивающая адекватную оценку коэффициентов запаса статической устойчивости ЭЭС.

Во второй главе приведены результаты исследований методов расчета потокораспределения в ЭЭС. Рассмотрено влияние формы уравнений установившихся режимов и системы координат на вычислительные характеристики метода Ньютона. Исследованы быстрые разделенные методы Ньютона, методы второго и более высоких порядков, методы Ньютона по параметру и их модификации, использующие алгоритмы нелинейного программирования. Разработан вычислительно эффективный и робастный метод расчета потокораспределения, который дает решением статически устойчивый режим, если таковой существует при заданных исходных данных, а если не существует - рекомендации для его получения.

Третья глава посвящена разработке и исследованию модели нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС. Представлен обзор литературных источников, содержащих вычислительные модели и методы нахождения предельных режимов. Предложена и теоретически обоснована новая более эффективная модель нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС. Рассмотрены вычислительные аспекты реализации предложенной модели.

В четвертой главе представлены результаты разработки вычислительных моделей нелинейного программирования поиска предельных режимов ЭЭС в заданном направлении утяжеления. Проанализированы особенности и вычислительные трудности реализации такой модели. Предложен простой, надежный и быстрый метод расчета предельного режима ЭЭС в заданном направлении утяжеления, учитывающий особенности задачи и используемого подхода. Представлен учет технологических ограничений, а также неточности прогноза узловых мощностей. Разработан алгоритм определения критических сечений ЭЭС в предельных режимах.

Пятая глава посвящена разработке и исследованию моделей нелинейного программирования ближайших предельных режимов ЭЭС и выбору моделей, наиболее подходящих для оценки коэффициентов запаса статической устойчивости системы, ввода режима ЭЭС в область существования и допустимую область. Предложены и теоретически обоснованы модели нелинейного программирования, наиболее подходящие для этой цели. Исследовано влияние технологических параметров ЭЭС на ближайший предельный режим. Определены модели ближайшего предельного режима ЭЭС, наиболее адекватные для оперативного и противоаварийного управления системой.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

7. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

- 7.1. В первой главе автор весьма детально анализирует свойства позиционной модели ЭЭС с точки зрения возможности ее использования при формировании критерия апериодической статической

устойчивости системы. Справедливо подтверждается известный факт о вырожденности матрицы линеаризованной позиционной модели динамики ЭЭС без учета демпфирования пропорционально скольжению ротора синхронной машины. Вырожденность позиционной модели этого вида не позволяет ее использовать для формирования критерия апериодической статической устойчивости ЭЭС. Подтверждается также, что замена координат в абсолютных углах на координаты в относительных углах «позволяет производить исследование устойчивости движения, избежав вырожденности матрицы» (с. 115). Из дальнейшего текста следует, что автор все-таки рассматривает позиционную модель в абсолютных углах без учета демпфирования. Поэтому возникает вопрос, почему не используется далее преобразованная система уравнений в относительных (взаимных) углах?

- 7.2. В этой же главе на с. 103 утверждается, что «вычисление собственных значений матрицы линеаризованных уравнений малых колебаний является весьма трудоемким». На самом деле это не совсем справедливо: имеется целый ряд эффективных методов решения данной задачи (методы Ланцоша, Арнольди, QR-метод и др.), что послужило стимулом широкого использования и развития модального анализа.
- 7.3. На с. 262 приоритет в разработке метода внутренней точки автор отдает индийскому математику Кармакару, который сформулировал свой подход в середине 1980 годов. На самом деле приоритет нужно отдать советскому математику И.И.Дикину, опубликовавшему в журнале «Доклады АН СССР», 1967, том 141, № 4, с. 747 – 748 статью «Итеративное решение задач линейного и квадратичного программирования», представленную в журнал академиком Л.В.Канторовичем. Впоследствии Кармакар признал приоритет И.И.Дикина, которого в 1990-е – начале 2000-х регулярно приглашали на международную конференцию по проблемам метода внутренней точки в качестве почетного участника.
- 7.4. Достаточно часто по тексту диссертации трудно отделить результаты автора от результатов других исследователей, что затрудняет идентификацию результатов автора диссертации.

8. Общее заключение

Представленная диссертационная работа В.В.Давыдова является самостоятельной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней решена важная научно-техническая проблема корректного определения предельных режимов ЭЭС. Задачи, решаемые в работе, объединены общей научной идеей конструктивного сочетания эффективных методов расчета предельных ре-

жимов ЭЭС и корректных методов оценки устойчивости этих режимов. Глубокий математически адекватный анализ автором указанных проблем позволяет использовать этот аппарат для решения важных теоретических и практических задач.


Основные научные выводы и практические рекомендации сделаны на основе досконального анализа проблемы с использованием разработанных автором подходов и методов. Содержание представленной диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Содержание диссертации полностью соответствует заявленным целям и поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Диссертация написана грамотным языком, выводы и рекомендации изложены аргументировано. Основные научные результаты работы подробно изложены в публикациях в рецензируемых изданиях из списка ВАК, а также индексированных в базах цитирования Scopus и Web of Science.

Сделанные в п. 7 замечания носят частный характер и не снижают в целом высокой положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа В.В. Давыдова полностью отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а соискатель безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Официальный оппонент,
Научный руководитель Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук (специальность 05.13.16), профессор, член-корреспондент РАН

 Николай Иванович Воропай

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 206, тел. (3952) 424700, эл.почта: voropai@isem.irk.ru

*Отзыв получен 12.09.2019г.
С.А. Осипов А.А.*

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

яя Н.У. заверяю
ярней ИСЭМ СО РАН
Тавилова Г.У.
расшифровка подписи
09 2019 г.

С отзывом ознакомлен 12.09.2019

Воропай В.В.