

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н., профессора  
Гусева Александра Сергеевича 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 темы**

Поскольку только устойчивое функционирование электроэнергетической системы (ЭЭС), обеспечиваемое синхронной работой генераторов ЭЭС, позволяет осуществлять приемлемое по режимным параметрам электроснабжение потребителей, достоверная оценка устойчивости ЭЭС является важнейшей. В связи с этим данная диссертационная работа, целью и задачами которой являются детальный анализ существующих моделей, методов, вычислительных алгоритмов расчета установившихся предельных режимов, определяющих статическую устойчивость ЭЭС, и разработка с учетом этого анализа новых, модифицированных подходов к решению указанных задач, несомненно актуальна.

### **2. Анализ содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и восьми приложений. Диссертация изложена на 462 страницах, включая 41 рисунок и 28 таблиц. Список литературы содержит 372 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы и задачи исследования. Определены научная новизна и практическая значимость работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* исследована математическая модель потокораспределения мощностей ЭЭС и выявлены ее особенности, влияющие на предельные по существованию установившиеся режимы ЭЭС.

Предложена и исследована геометрическая интерпретация решений системы уравнений установившихся режимов ЭЭС, представляющая гиперповерхность в пространстве мощностей узлов. Установлено, что область существования установившихся режимов ЭЭС, широко используемая в теории и практике, является проекцией этой гиперповерхности вдоль оси активной мощности балансирующего узла на подпространство задаваемых мощностей узлов. Выявлено влияние месторасположения балансирующего узла на предельные режимы и области существования установившихся режимов. Исследована позиционная модель ЭЭС и получен критерий ее предельных по статической аperiodической устойчивости режимов, обобщающий критерий Вагнера – Эванса на многомашиные системы, соответствующий критерию предельных режимов модели потокораспределения с распределенным балансирующим узлом. Предложена расчетная модель предельных режимов, обеспечивающая адекватную оценку коэффициентов запаса статической устойчивости ЭЭС.

*Во второй главе* представлены результаты исследований методов расчета установившихся режимов ЭЭС. Установлено влияние формы уравнений потокораспределения и системы координат на вычислительные характеристики метода Ньютона. Исследованы быстрые разделенные методы Ньютона, методы второго и высоких порядков, методы Ньютона по параметру и их модификации, использующие технику нелинейного программирования. Разработан вычислительно эффективный алгоритм расчета установившихся режимов, определяющий статически устойчивый режим, если такой существует при заданных исходных данных, в противном случае рекомендации для его получения.

*Третья глава* посвящена разработке и исследованию модели нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС. Представлен обзор существующих вычислительных моделей и подходов нахождения предельных режимов ЭЭС, выявлены их преимущества и недостатки. Предложена, теоретически обоснована и исследована модель нелинейного программирования предельных режимов, определяющая предельный режим ЭЭС, соответствующий минимуму сформированной целевой функции. Рассмотрены вычислительные аспекты реализации модели.

*В четвертой главе* приведены результаты разработки вычислительных моделей нелинейного программирования расчета предельных режимов ЭЭС

в заданном направлении утяжеления. Исследованы особенности и вычислительные трудности реализации. Используя свойства структуры модели разработан простой, быстрый и надежный метод расчета предельных режимов ЭЭС в заданном направлении утяжеления, рассмотрен учет технологических ограничений. Предложена модель нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС в заданном направлении утяжеления с учетом ошибок прогноза узловых мощностей и разработан вычислительно эффективный метод ее численной реализации. Сформирован алгоритм идентификации критических сечений ЭЭС в предельных режимах.

*В пятой главе* предложены и исследованы модели нелинейного программирования ближайших предельных режимов ЭЭС в пространстве узловых мощностей в  $p$ -пормах. Рассмотрено влияние технологических ограничений ЭЭС на ближайшие предельные режимы. Определены модели нелинейного программирования ближайших предельных режимов ЭЭС, наиболее подходящие для оценки коэффициентов запаса статической устойчивости, ввода режима ЭЭС в область существования и допустимую область.

*В заключении* представлены основные результаты диссертационной работы, подтверждающие решение поставленных задач.

*В приложениях* представлены расчетные выражения вычислительной реализации разработанных моделей.

Автореферат диссертации полно отражает ее основное содержание.

### **3. Опубликованность основных результатов диссертационной работы**

По теме диссертации опубликовано 59 работ, в том числе: 12 статей в журналах, включенных в текущий перечень ВАК, 1 патент РФ, 2 работы в журнале "IEEE Transactions on Power Systems", входящего в Web of Science и Scopus, 1 монография, 2 учебных пособия.

### **4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы**

Содержание диссертации и автореферата соответствует:

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.

### **5. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций.**

В данной диссертационной работе расширены знания о статически устойчивых предельных режимах и моделях потокораспределения мощностей ЭЭС, в результате которых:

1. Установлено, что вся совокупность решений системы нелинейных уравнений установившихся режимов ЭЭС геометрически представляет собой гиперповерхность в пространстве мощностей, а ее проекция вдоль оси активной мощности балансирующего узла на подпространство задаваемых мощностей узлов является областью существования установившихся режимов ЭЭС, причем граница этой проекции представляет собой гиперповерхность предельных режимов. Поэтому месторасположение балансирующего узла влияет на расчетную область существования установившихся режимов ЭЭС и на ее предельные режимы. Кроме того, в предельном режиме балансирующий узел не обеспечивает поддержание режима ЭЭС, а смена балансирующего узла делает этот режим непредельным.
2. Получен критерий предельных по статической апериодической устойчивости режимов позиционной модели, обобщающий критерий Вагнера-Эванса на многомашинные ЭЭС, соответствующий критерию предельных режимов модели потокораспределения с распределенным балансирующим узлом.
3. Разработан вычислительно эффективный метод расчета установившихся режимов ЭЭС, определяющий статически апериодически устойчивый режим или рекомендации для получения такого режима, в случае его отсутствия для заданных исходных данных.

4. Сформирована и теоретически исследована универсальная модель нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС, определяющая предельный режим, соответствующий минимуму сформированной целевой функции. Разработан простой, быстрый и надежный метод для модели нелинейного программирования предельных режимов ЭЭС в заданном направлении утяжеления, превосходящий существующие.
5. Предложены и теоретически исследованы модели нелинейного программирования ближайших предельных режимов ЭЭС в пространстве узловых мощностей в  $p$ -нормах и определены наиболее адекватные модели для оперативного и противоаварийного управления режимами ЭЭС.

#### **6. Практическая значимость и реализация результатов**

Практическая значимость работы определяется возможностью повышения статической устойчивости ЭЭС и оперативности её определения за счет увеличения точности и быстродействия применяемых моделей и алгоритмов расчета предельных режимов.

#### **7. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.**

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов определяются строгой аргументацией выбора направления исследования, корректным применением фундаментальных теоретических методов в рассматриваемой области и подтверждаются соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов.

#### **8. Замечания**

8.1. Утвержденные приказом Минэнерго России от 03.08.2018 №630 «Методические указания по устойчивости энергосистем» предусматривают проверку динамической устойчивости (п.7, п.8, п.9, п.21, п.33 г) статически устойчивых предельных режимов ЭЭС, которая в данной диссертационной работе полностью исключена. Поэтому более конкретным названием диссертации следует считать «Исследование и разработка моделей расчета статически устойчивых предельных режимов ЭЭС».

8.2. В диссертации отсутствует информация о реальном или опытном применении в практике управления режимами ЭЭС разработанных моделей и методов расчета предельных режимов.

8.3. В тексте диссертации встречаются орфографические ошибки и некорректные выражения, например: стр. 98 «... внутренним ЭДС», стр. 92 «Генератор снова будет посажен на верхний предел реактивной мощности, ...».

## **9. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертационная работа Давыдова В.В. соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 01.10.2018):

п.9. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором расширены знания о предельных режимах в моделях потокораспределения ЭЭС, содержит новые научно-обоснованные решения, применение которых позволит существенно повысить уровень оперативного управления режимами ЭЭС.

п.10. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации представлены сведения о практической полезности результатов, рекомендаций и использования научных выводов.

п.11-13. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях: 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент РФ, 2 работы в журнале, индексируемом базами данных Scopus и Web of Science.

п.14. Диссертация соответствует требованию указания ссылок на заимствованные материалы или отдельные результаты.

## **10. Заключение**

Содержание диссертации полностью соответствует заявленным целям, поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Диссертация в целом написана грамотным языком, выводы и рекомендации изложены аргументировано.

Сделанные в п.8 замечания носят уточняющий, рекомендательный характер и не снижают в целом положительной оценки диссертационной работы.

Основываясь на вышеизложенном, считаю, что диссертационная работа «Исследование и разработка моделей расчета предельных режимов электрических систем» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и содержащей значимые научные и практические результаты, а ее автор, Давыдов Виктор Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Официальный оппонент,

профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, профессор



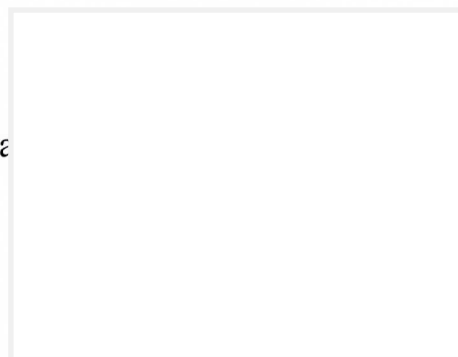
Гусев  
Александр  
Сергеевич

28.10.2019г.

Удостоверяю, что подпись представлена

А.С. Гусевым.

Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ



И ТПУ

наньева

Сведения:

Фамилия, имя, отчество лица, представившего отзыв	Гусев Александр Сергеевич
Ученая степень	Д.т.н.
Специальность	05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы
Ученое звание	Профессор
Наименование организации, работником которой является указанное лицо	Отделение электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного

	образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Должность	Профессор
Почтовый адрес организации	634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Телефон	+7(3822)701-777 (3406)
Адрес электронной почты	gusev_as@tpu.ru

Отзыв коллег 05.11.2019г. *Оаф /Осипов И.И./*  
 С отзывом ознакомлен 05.11.2019г. *Оаф /Осипов И.И./*