

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора технических наук, доцента  
Черных Ильи Викторовича на диссертацию Банных Павла Юрьевича  
«Развитие потоковой модели установившихся режимов электрических сетей  
в трехфазном и однолинейном представлении»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

На отзыв представлены: диссертационная работа, состоящая из введения, четырёх глав с выводами, заключения, библиографического списка из 106 наименований, приложение.

### **1. Актуальность темы диссертации**

На сегодняшний день одним из наиболее распространённых инструментов математического моделирования установившихся и переходных режимов в электроэнергетических системах является среда MATLAB Simulink. В научных статьях, где требуется точное моделирование процессов, MATLAB Simulink является основным инструментом для проведения исследований. При этом, используемые схемы замещения элементов электрической сети являются трехфазными.

Для моделирования процессов во временной области требуется расчёт начальных условий интегрируемых переменных. Для этого необходимо выполнить расчёт установившегося режима работы электрической сети.

В случае несимметричных режимов работы сети требуется выполнять расчёт режима в трёх фазах. Инструмент встроенный в MATLAB Simulink позволяет выполнять соответствующие расчёты. При этом существует проблема расчёта режимов работы распределительных сетей с трансформаторами с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» и несимметричной нагрузкой. В этом случае расчёт установившегося режима расходится и решение не может быть найдено.

Особенно эта задача является актуальной в случае применения схем MATLAB Simulink в моделирующих комплексах реального времени и проведении программно-аппаратного моделирования (hardware-in-the-loop) для тестирования оборудования. Поскольку некорректный исходный режим с некорректным расчётом начала переходного процесса может приводить к ложным срабатываниям тестируемого оборудования.

Предложенная в диссертации трехфазная потоковая модель решает эту проблему. Она позволяет рассчитывать установившиеся режимы в трех фазах для схем характерных для отечественных распределительных сетей, решена проблема плохой сходимости.

Сказанное выше определяет актуальность темы и направления диссертационной работы Банных П.Ю., посвященной расчёту установившихся режимов работы распределительных сетей.

## **2. Анализ содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 106 наименований, 1 приложения, содержит 129 страниц, включая 33 рисунка и 5 таблиц.

### *Содержание диссертации*

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, представлены цели, задачи, выносимые на защиту положения, описана научная новизна и практическая значимость результатов.

*В первой главе* приведён обзор математических моделей основных элементов электрической сети на которых строятся алгоритмы расчёта установившихся режимов, предложенные в работы. Описаны основные допущения, лежащие в основе схем замещения.

*Во второй главе* приведён обзор существующих методов расчёта установившихся режимов в фазных координатах. Проанализированы основные достоинства и недостатки методов расчёта. Рассмотрены основные современные тенденции и существующие проблемы в выбранной предметной области.

*Третья глава* посвящена разработанной автором диссертации потоковой модели установившегося режима. Уравнения потоковой модели позволяют описывать установивший режим для однолинейных и трехфазных схем замещения электрической сети. Представлен математический алгоритм, позволяющий ускорить расчёт режима на основе потоковой модели благодаря использованию особой структуры матрицы Якоби. Выполнено сравнение потоковой модели с традиционными моделями установившегося режима.

*В четвёртой главе* представлена гибридная трехфазно-однолинейная (ГТО) потоковая модель, которая позволяет рассчитывать режим части сети в однолинейном представлении, а другой сети в фазных координатах. ГТО

модель может быть использована как в задаче расчёта установившегося режима, так и в задаче оценивания состояния.

*В заключении* приведены основные выводы и обобщены полученные в диссертационной работе результаты.

*В приложении* содержатся копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **3. Соответствие диссертации паспорту специальности**

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.

П.7. Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

П.13. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

### **4. Методы исследования**

В работе применялись методы нелинейного программирования, теоретических основ электротехники, выполнялось моделирование в интерактивной среде MATLAB. Для проведения расчётов использовались программы, разработанные автором, написанные на языках C# и Wolfram Language.

### **5. Степень обоснованности положений и достоверности полученных результатов**

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов определяются корректным применением фундаментальных теоретических методов исследования в рассматриваемой предметной области и методов математического моделирования установившихся режимов ЭЭС. Основные выводы подтверждены вычислительными экспериментами на тестовых схемах ЭЭС и сравнительным анализом с классическими методами расчёта установившихся режимов.

Результаты не противоречат исследованиям, выполненными другими авторами и применяемыми на практике, а также подтверждаются их апробацией на трех международных научно-технических конференциях.

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

Новизна представленной на отзыв диссертационной работы определяется в первую очередь тем, что разработана новая трехфазная потоковая модель установившегося режима, обладающая лучшими характеристиками сходимости среди других методов расчёта установившегося режима в трёх фазах.

Наиболее значимыми новыми результатами, полученными в диссертационной работе, являются:

- введение контурного уравнения для учёта замкнутых контуров и способа учёта генерирующих узлов с фиксированным напряжением в потоковую модель, что позволяет обобщить её для анализа распределительных сетей любой конфигурации;
- расширение и обобщение потоковой модели для трехфазной постановки задачи расчёта установившегося режима;
- разработка алгоритма ускорения расчёта установившегося режима для потоковой модели;
- разработка гибридной модели, объединяющая однолинейную и трехфазную потоковые модели, при этом существует возможность применения гибридной модели в задачах расчёта установившегося режима и оценивания состояния.

## **7. Практическая значимость и использование результатов диссертационной работы**

В рамках диссертационной работы были разработаны программы для ЭВМ, которые могут быть использованы для расчёта режимов распределительных сетей на базе трехфазных моделей. Кроме того, результаты исследований были использованы при разработке программно-технического комплекса для управления цифровой подстанцией, разработанного в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 года».

## **8. Отличие выполненных исследований от других работ**

Главным отличием исследования является расширение возможностей применения уникальной потоковой модели установившегося режима. Настоящая работа является продолжением исследований в выбранной предметной области направлена на расширение границ применения потоковой модели при решении задач распределительных сетей с использованием трехфазных моделей.

## **9. Публикация основных результатов диссертационной работы**

По теме диссертации опубликовано четыре работы и зарегистрированы три программы для ЭВМ. Две работы опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, одна работа опубликована в журнале, включённом в перечень ВАК.

## **10. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы**

1. В первой главе диссертации указано, что нагрузка может моделироваться статическими характеристиками нагрузки по напряжению (СХН), при этом в математическом описании потоковой модели не описано, как использовать СХН.
2. Во второй главе диссертации приведён алгоритм расчёта режима в трех фазах с помощью метода Z-матрицы. В блок схеме алгоритма не соблюдены обозначения матриц и напряжений, принятые в работе.
3. В качестве объекта исследования в работе рассматриваются распределительные сети 6-35 кВ. Какова возможность применения разработанной трехфазной модели установившегося режима для распределительных сетей более низких классов напряжения?
4. Для анализа сходимости трехфазной потоковой модели использовались зарубежные тестовые IEEE. Возможен ли перенос результатов расчёта и анализа сходимости на отечественные распределительные сети, с другими режимами работы нейтрали?
5. В численных примерах для анализа гибридной трехфазно-однолинейной (ГТО) потоковой модели в качестве точки соединения двух моделей выбираются шины низшего напряжения понижающей подстанции. Насколько актуально применение ГТО модели для сетей с номинальными напряжениями 110 кВ и выше?

## **11. Соответствие диссертации критериям положения о присуждении ученых степеней**

Содержание диссертации полностью соответствует поставленным задачам и подробно отражает последовательность их решения. Диссертация написана логичным, понятным языком, выводы и рекомендации изложены аргументировано. Она в полном объеме отвечает критериям, которые установлены Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

## **12. Общее заключение**

Представленная диссертационная работа Банных Павла Юрьевича «Развитие потоковой модели установившихся режимов электрических сетей в трехфазном и однолинейном представлении» является самостоятельной, законченной, актуальной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и практической значимостью.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», а соискатель Банных Павел Юрьевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент,

заведующий кафедрой техники высоких напряжений

Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

доктор технических наук,

доцент

Черных Илья Викторович

22.01.2020

Сведения:

**Полное наименование организации:**

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

**Юридический адрес:** Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

**Телефон:** (343) 374-52-30.

**Эл. адрес:** i.v.chernykh@urfu.ru.

ПОДПИСЬ  
ЗАВЕРЯЮ.

Черных И.В.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.

