



31.05.2018, № 36/11 - 3610

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной  
деятельности

ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»

д-р техн. наук, профессор

АЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА  
СТУШИНА

## ОТЗЫВ

ведущей организации ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» на диссертацию **Анохина Бориса Анатольевича «Исследование несимметрии и управление параметрами симметрирующих устройств в протяженных электрических сетях с тяговой нагрузкой»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»**

### 1. Актуальность темы диссертации

Систему электроснабжения западного участка БАМ образуют две воздушные линии электропередачи 220 кВ протяженностью более 1000 км, что значительно превышает рекомендуемую для ЛЭП данного класса напряжения. В условиях одностороннего питания наличие резкопеременной распределенной тяговой нагрузки, существенно различающейся по фазам, является основной причиной возникновения значительной несимметрии режима в протяженной высоковольтной сети.

Проблема несимметрии решается путем установки симметрирующих устройств в определенных пунктах высоковольтной сети. Симметрирующее устройство представляет собой трехфазный элемент с различными реактивными сопротивлениями по фазам, принимающими как индуктивный, так и емкостной характер, в зависимости от конкретного вида несимметрии. Пофазные параметры симметрирующего устройства должны управляться при изменяющемся уровне несимметрии в сети на межпоездном интервале, что требует разработки системы управления его параметрами.

Особенности протяженных сетей внешнего электроснабжения железных дорог требуют особого подхода при анализе режимов их работы и должны быть учтены при создании систем управления параметрами симметрирующих устройств. Традиционные методы расчета режимов работы электрических систем,

основанные на однолинейных моделях трехфазных цепей, не применимы в данном случае, поскольку приводят к недопустимым погрешностям. В связи с этим также возникает задача моделирования в трехфазной постановке ЛЭП, трансформаторов, нагрузки и сети в целом при выборе мест установки симметрирующих устройств и разработке систем управления их параметрами.

Планируемый рост электрических нагрузок железных дорог, приводящий к дальнейшему повышению уровня несимметрии в протяженных высоковольтных сетях, говорит об актуальности темы данной работы.

## **2. Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы» по следующим пунктам:

- Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.
- Разработка методов расчета установившихся режимов электроэнергетических систем.
- Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

## **3. Структура и объем диссертации**

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Общий объем работы составляет 170 страниц. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и 5 приложений.

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы её цель и задачи, новизна основных научных положений, представлена теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** дана характеристика схемам электроснабжения железных дорог и особенностям их работы.

Во **второй главе** дано описание первой части предложенной методики расчета несимметрии в протяженной трёхфазной сети с тяговой нагрузкой, включающей матричные модели в фазных координатах основных элементов протяженной высоковольтной сети и оригинальные способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети.

В **третьей главе** рассматривается вторая часть разработанной методики, которая включает описание алгоритма расчета несимметрии в аналитической форме,

основанного на линеаризации тяговой нагрузки. Этот алгоритм позволил провести анализ режимов работы сети внешнего электроснабжения на примере сети внешнего электроснабжения БАМ при различных точках раздела сети.

В **четвертой главе** рассмотрен оригинальный метод определения параметров симметрирующих устройств, основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте его установки при учете остальной сети входным сопротивлением по обратной последовательности.

В **пятой главе** обосновывается алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства в протяженной высоковольтной сети, питающей тяговую нагрузку, и даются рекомендации по созданию системы автоматического управления этим устройством, применительно к его схемам на базе статического тиристорного компенсатора, а также управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием.

В **заключении** приведены основные выводы по результатам исследований.

#### **4. Основные научные результаты диссертации**

1. Разработана методика расчета несимметрии в протяженной высоковольтной сети, включающая матричные модели в фазных координатах всех элементов сети, оригинальные способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети, а также расчетный алгоритм, основанный на линеаризации тяговой нагрузки.

2. Впервые предложен и обоснован метод определения пофазных параметров симметрирующих устройств, основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте установки симметрирующих устройств при учете остальной сети входным сопротивлением.

3. Обоснован алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства на межпоездном интервале, которые обеспечивают полную компенсацию напряжения обратной последовательности, а также контроль величины входного сопротивления сети относительно места установки симметрирующего устройства.

#### **5. Достоверность научных результатов**

**Достоверность** проведенных численных экспериментов обеспечена применением лицензионного программного обеспечения, а также корректным использованием фундаментальных законов математики и теоретических основ электротехники. Обоснованность выводов и рекомендаций работы подтверждена публикациями и обсуждениями результатов исследований на научно-технических семинарах и конференциях.



## **6. Практическая значимость**

1. Результаты анализа режимов работы сети внешнего электроснабжения 220-500 кВ БАМ, показавшие, что уровень несимметрии, обусловленный пофазно различной тяговой нагрузкой, значительно превосходит допустимый уровень, что говорит о необходимости использования симметрирующих устройств для устранения недопустимой несимметрии.

2. Рекомендации по созданию микропроцессорных систем автоматического управления симметрирующими устройствами на базе статических тиристорных компенсаторов и с использованием управляемых шунтирующих реакторов с подмагничиванием, которые могут быть использованы при проведении НИР и ОКР по разработке опытно-промышленных образцов симметрирующих устройств.

## **7. Замечания по работе**

1 В главе 2 на стр. 34 используется понятие преобразующей матрицы для перехода от фазных к модальным составляющим. Однако не поясняется, каким образом находится эта матрица.

2 Матрицы и вектор-столбцы в диссертации принято выделять жирным шрифтом. Однако в главах 2 и 3 это не всегда соблюдается.

3 В главе 3 анализируются режимы при разделе сети внешнего электроснабжения БАМ на подстанциях Таксимо, Уоян и Северобайкальск. При этом нет пояснений, какими обстоятельствами определяется место раздела.

4 В главе 3 (формула (3.1)) отклонения напряжения определяются для составляющей прямой последовательности. Однако для однофазной тяговой нагрузки большую информативность давала бы пофазная оценка отклонений напряжения.

5 В диссертации рассматриваются устройства компенсации реактивной мощности для снижения отклонений напряжения и симметрирующие устройства для устранения несимметрии. Возможно ли использование одного устройства, совмещающего обе функции?

## **8. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»**

По п.9. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой автором выполнено новое научно-обоснованное решение в виде аналитического метода определения параметров симметрирующего устройства на основе параметров режима в месте подключения и алгоритма управления параметрами симметрирующего устройства.

По п.10. Диссертация написана автором самостоятельно в виде рукописи, содержит новые научные результаты и положения, заслуживающие публичной защиты. Содержание диссертации и опубликованные работы свидетельствуют о достаточном вкладе автора в науку. В диссертации имеются сведения о практической полезности выполненных исследований, подтвержденные актом внедрения.

По п.11-13. Основные научные результаты достаточно полно отражены в шести публикациях, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

По п.14. Диссертация соответствует указанным критериям.

**9. Общее заключение о соответствии выполненной работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям**

Диссертация Б.А. Анохина является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основании выполненных автором исследований представлено решение актуальной задачи по повышению качества электроэнергии в протяженных электрических сетях с тяговой нагрузкой за счёт разработки системы управления параметрами симметрирующих устройств.

Содержание диссертации отражает основные идеи работы и полученные в ней результаты, а также раскрывает ее научную и практическую ценность. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Анохина Бориса Анатольевича «Исследование несимметрии и управление параметрами симметрирующих устройств в протяженных электрических сетях с тяговой нагрузкой» соответствует критериям, изложенным в «Положении о присуждения ученых степеней» ВАК РФ, п. 9, а ее автор Анохин Борис Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Заключение принято на заседании кафедры «Электротехнические комплексы и системы», протокол № 8(100) от 14.05.2018 г.

Директор Политехнического института, заведующий кафедрой

«Электротехнические комплексы и системы», д-р техн. наук, профессор

Василий Иванович Пантелеев

Сибирский Федеральный университет,  
Политехнический институт,  
кафедра «Электротехнические комплексы и системы»,  
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26.  
E-mail: vpanteleev@sfu-kras.ru, тел. 8(391)2275665

*Одобрено*  
13.06.2018

*А.А. Русская А.Т.*

*С от завом кафедры*  
13.06.2018 *Анохин Б.А.*