

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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. Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». Состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и пяти приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 86 рисунков и 20 таблиц.

### **2. Актуальность темы диссертации**

Транспортная загрузка железнодорожных магистралей в Сибири и на Дальнем Востоке в настоящее время постоянно растет. Сети внешнего электроснабжения указанных железных дорог имеют большую протяженность, что при значительном увеличении загрузки приводит к снижению качества электрической энергии. Так, например, систему электроснабжения западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали образуют две воздушные линии электропередачи 220 кВ, протяженность которых значительно превышает рекомендуемую для ЛЭП данного класса напряжения. В сети электроснабжения Байкало-Амурской магистрали наблюдаются недопустимые коэффициенты несимметрии, существенно превышающие допустимые значения и вызванные наличием резкопеременной тяговой нагрузки. Сети внешнего электроснабжения железных дорог имеют ряд особенностей, которые требуют специального подхода при анализе режимов работы, при выборе способа устранения несимметрии в таких сетях, а также должны быть учтены при создании системы управления симметрирующими устройствами.

Применение методов расчета режимов электрических систем, основанных на однолинейном представлении трехфазных цепей, в данном случае приведет к недопустимым погрешностям. Использование метода фазных координат позволяет корректно учесть несимметричные трехфазные элементы (например, участки линий с пофазно-различными параметрами,

несимметричные нагрузки), несимметричные соединения элементов сети и т.д.. Таким образом проблемы моделирования ЛЭП, трансформаторов, нагрузки и сети, в целом в фазных координатах с учетом взаимоиндуктивных и емкостных связей при анализе таких сетей, проблемы определения параметров симметрирующих устройств и способов управления ими являются актуальными.

### **3. Оценка содержания диссертации**

*Во введении* обосновывается актуальность проведенных в диссертации исследований, а именно снижения несимметрии в протяженной сети 220-500 кВ, питающей тяговую нагрузку. Сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, практическая ценность, указаны положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* диссертации показаны особенности схем электроснабжения тяговой сети однофазного переменного тока, рассмотрены проблемы качества электроэнергии с точки зрения такого показателя, как коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности. Рассмотрены специализированные программные комплексы для расчета несимметричных режимов.

*Во второй главе* приводится предложенная методика, включающая матричные модели в фазных координатах основных элементов протяженной высоковольтной сети и оригинальные способы преобразования отдельных участков сети. Например, при расчете режимов протяженной сети внешнего электроснабжения для объединения двухцепных и одноцепных участков в одну модель возникает необходимость преобразования двухцепного участка сети к одноцепному виду. Метод преобразования двухцепного участка сети к одноцепному виду, описанный в главе, получен впервые.

*В третьей главе* дается вторая часть разработанной методики, включающая описание безытерационного алгоритма расчета несимметрии в аналитической форме, основанного на линеаризации тяговой нагрузки. С использованием этого алгоритма проводится анализ режимов работы сети внешнего электроснабжения на примере сети внешнего электроснабжения БАМ при различных точках раздела сети и определяются отклонения напряжения и коэффициенты несимметрии.

*Четвертая глава* диссертации посвящена разработке мероприятий по улучшению качества электроэнергии. Предлагается оригинальный метод определения параметров симметрирующих устройств (СУ), основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте его установки при учете остальной сети входным сопротивлением по обратной последовательности. Подход к выбору параметров СУ формулируется исходя из условия максимального снижения напряжения обратной

последовательности в месте его установки. Приводятся результаты расчета режима работы сети при установке СУ в месте наибольшей несимметрии, которые показывают, что несимметрия на всех подстанциях западного и восточного участков БАМ после установки симметрирующих устройств не превышает допустимые значения.

*В пятой главе* предлагается алгоритм управления параметрами СУ в протяженной высоковольтной сети, питающей тяговую нагрузку. По предложенному алгоритму параметры СУ определяются величиной режимного сопротивления, которое зависит от двух режимных величин (напряжений холостого хода прямой и обратной последовательности в месте установки СУ) и входного сопротивления сети по обратной (прямой) последовательности относительно пункта размещения СУ. Приведены соотношения для корректировки величины входного сопротивления сети в процессе работы СУ.

*В заключении* сформулированы основные результаты теоретического и практического плана по диссертационной работе, совокупность которых свидетельствует о достижении поставленной цели.

*Приложения* содержат описание программы «Расчет несимметричного режима», результаты проверочных расчетов и акт об использовании результатов диссертационной работы.

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

Материалы диссертации и автореферата 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.12. Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

#### **5. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

#### **6. Методы исследования**

Применялись методы теоретических основ электротехники и теории электрических цепей с распределенными параметрами, методы математического моделирования сети на основе теории матриц, а также основы общей теории функционирования электроэнергетических систем. В

работе также использовались методы экспериментального исследования с применением современных программных средств (MatLab Simulink).

### **7. Степень обоснованности и достоверности полученных научных положений**

Достоверность научных положений подтверждается использованием математического аппарата теории волновых процессов в линиях высокого напряжения, обоснованность которой доказана многолетней практикой ее применения. Достоверность проведенных расчетов подтверждается программной реализацией в среде Matlab разработанной методики анализа несимметрии с использованием двух различных методов, дающих совпадающие результаты, а также проведенными поверочными расчетами на нелинейной модели участка электрической сети в среде Simulink.

Работа прошла широкую апробацию. Основные положения работы докладывались на двух международных научно-технических конференциях и научных семинарах.

Степень достоверности и обоснованности высокая.

### **8. Уровень новизны научных положений, выводов и рекомендаций**

Впервые предложено комплексное решение проблемы несимметрии в электрической сети, содержащее аналитические соотношения для определения параметров симметрирующих устройств и управления ими на основе измеренных значений параметров режима в месте подключения. В рамках решения данной задачи получены следующие новые результаты:

1. Предложена методика расчета несимметрии в протяженной трехфазной сети с тяговой нагрузкой, содержащая оригинальный метод приведения двухцепного участка протяженной сети к одноцепному виду.

2. Разработан и обоснован численными экспериментами аналитический метод определения параметров симметрирующего устройства.

3. Предложен алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства в протяженных высоковольтных системах с тяговой нагрузкой.

Уровень новизны оценивается, как «результаты являются новыми»

### **9. Ценность для науки и практики результатов исследования**

Ценность данной работы для науки состоит в развитии аппарата математического моделирования электрических сетей при расчете сложносимметричных режимов и аналитические соотношения для определения параметров симметрирующего устройства.

Практическая ценность работы состоит в рекомендациях по выбору параметров симметрирующих устройств и созданию систем автоматического управления ими. К отдельному результату, представляющему практическую ценность, следует отнести разработанную программу в среде MatLab,

позволяющую выполнить анализ несимметрии в протяженной трехфазной сети, питающей тяговую нагрузку.

Научный уровень диссертации характеризуется как достаточно высокий.

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

Диссертационная работа отличается от других работ, выполненных в исследуемой области, целостным подходом к решению поставленной задачи:

- разработана методика анализа несимметрии в протяженной трехфазной сети, питающей тяговую нагрузку;
- создана математическая модель протяженной сети внешнего электроснабжения 220-500 кВ БАМ и проведен анализ несимметрии;
- определены параметры симметрирующих устройств, обеспечивающих требуемый уровень несимметрии;
- предложен алгоритм управления параметрами симметрирующих устройств и предложены рекомендации по системам автоматического управления симметрирующими устройствами.

#### **11. Личный вклад автора**

Представленные в диссертационном исследовании результаты получены как лично автором, так и при его непосредственном участии. Автором самостоятельно выполнен обзор научно-технической литературы, разработаны соотношения для преобразования двухцепных участков линии к эквивалентным одноцепным, предложена методика расчета несимметрии в протяженной трехфазной сети, разработан метод определения параметров симметрирующего устройства, предложен алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства. В опубликованных в соавторстве работах по теме диссертации определяющая роль принадлежит автору данной работы.

#### **12. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 2 статьи в сборниках международных и всероссийских конференций; 1 статья в научном журнале.

Материалы диссертации опубликованы с достаточной полнотой.

#### **13. Соответствие полученных результатов поставленной цели и задачам**

Полученные результаты соответствуют поставленной цели. Сформулированные задачи решены.

#### **14. Замечания**

1. Известно, что любой несимметричный режим представляется как результат наложения режимов по прямой, обратной и нулевой

последовательностям. При этом, представленные в работе соотношения для определения параметров симметрирующего устройства (п 4.3) не содержат параметров режима по нулевой последовательности.

2. В работе (страница 51) предлагается метод эквивалентирования двухцепного участка сети при параллельной работе цепей к одноцепному виду. Влияние взаимной связи цепей двухцепной линии на результаты расчета установившегося режима работы сети, как правило, незначительно. В данном случае можно обойтись гораздо более простым и общеизвестным методом преобразования двух параллельных несвязанных цепей. Требуется обоснование необходимости разработки и применения предложенного в работе метода преобразования.

3. В главе 1 на странице 31 отмечено, что предлагаемая методика расчета несимметричного режима работы сети является аналитической. При этом получение матричной модели (матричных коэффициентов  $A, B, C, D$ ) нетранспонированной трехфазной одноцепной или двухцепной линии основано на переходе к модальным координатам при помощи матрицы собственных значений. Однако, аналитическое определение матрицы собственных значений в общем случае невозможно. С этой точки зрения методика расчета в целом не может называться аналитической.

4. В таблице 3.1 для расчета режима сети приняты конкретные значения проводимостей узлов подключения тяговой нагрузки. Необходимо пояснить на каком основании приняты эти значения.

5. При анализе эффективности применения симметрирующих устройств (глава 4) для снижения несимметрии в сети внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали приводятся результаты только с технической точки зрения. Хорошо было бы привести предварительные экономические оценки применения СУ.

6. В главе 5 (рис. 5.1, 5.2) приведены кривые изменения модуля и фазы напряжений обратной последовательности в узле на межпоездном интервале. При этом, не указано как получены эти зависимости.

7 На странице 8 констатируется, что для снижения несимметрии эффективным решением является использование симметрирующих устройств на базе СТК или УШР. На чём основано это утверждение? Какие плюсы дает использование этих устройств по сравнению с имеющимися предложениями снижать несимметрию с помощью устройств типа СТАТКОМ?

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

Диссертационная работа Анохина Б.А. отвечает требованиям соответствующих пунктов Положения о присуждении ученых степеней:

По п.9. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой автором обосновано новое научное решение актуальной задачи в виде аналитического метода определения параметров симметрирующего устройства на основе параметров режима в месте подключения, а также алгоритма управления параметрами симметрирующего устройства.

По п.10. Диссертация написана автором самостоятельно в виде рукописи, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует 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.

## **16. Заключение**

Приведенные замечания не снижают актуальности и значимости диссертационной работы. В результате проведенных исследований решен вопрос снижения несимметрии в протяженной сети 220-500 кВ, питающей тяговую нагрузку, а предложенный алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства и рекомендации по системам автоматического управления симметрирующим устройством позволяют повысить качество электроэнергии в протяженных сетях электроснабжения железных дорог.

Представленная работа «Исследование несимметрии и управление параметрами симметрирующих устройств в протяженных электрических сетях с тяговой нагрузкой» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержит совокупность выносимых на защиту новых научных результатов и положений, имеет

внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. По совокупности изложенного считаю, что Анохин Борис Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент

**Сальников Василий Герасимович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электроэнергетических  
систем и электротехники,

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский государственный  
университет водного транспорта»

630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
тел. 89137019639 e-mail: nsawt\_ese@mail.ru



С отзывом  
ознакомлен  
31 мая 2018

Отзыв получен  
31 мая 2018 г.  
Жукова А.Г.

*В. А. Анохин* Анохин Б.А.

Подпись Сальникова В.Г. заверено  
помощником ректора Жукова А.Г. 31.05.18