

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.178.12,

созданного на базе федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования

«Омский государственный технический университет»,

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23 января 2020 г. № 3

О присуждении Сафонову Дмитрию Геннадьевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Управление компенсацией емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения при однофазных замыканиях на землю» по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» принята к защите 01.11.2019 (протокол № 2) диссертационным советом Д 212.178.12, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 644050, пр. Мира, 11, г. Омск. Приказ о создании диссертационного совета Д 212.178.12 № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Сафонов Дмитрий Геннадьевич, 1983 года рождения, в 2005 году окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» с присвоением квалификации инженер по специальности «Электроснабжение». В 2009 году окончил очную аспирантуру по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». В 2015 году окончил с отличием магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный

ный технический университет» с присуждением квалификации магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». Работает в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» в должности старшего преподавателя кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – Горюнов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Шуин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра «Автоматическое управление электроэнергетическими системами», профессор кафедры;

Третьяков Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», доцент кафедры – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, в своём положительном

отзыве, подписанном Павлюченко Дмитрием Анатольевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Системы электроснабжения предприятий», Манусовым Вадимом Зиновьевичем, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Системы электроснабжения предприятий» и утвержденном Вострецовым Алексеем Геннадьевичем, доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе, заслуженным деятелем науки Российской Федерации, указала, что диссертация удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.

Соискатель имеет 19 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации девять опубликованных работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ – **пять**. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. В публикациях, включенных в список основных по теме диссертации и подготовленных в соавторстве, вклад диссертанта оценивается до 50–75 %. Наиболее значительные работы:

1. Сафонов, Д. Г. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов / Д. Г. Сафонов, Д. С. Осипов, С. Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 79–84.

2. Сафонов, Д. Г. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи / Д.Г. Сафонов, В.А. Ощепков, С.С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 58–60.

3. Сафонов, Д. Г. Имитационное моделирование функционирования распределительной сети с дугогасящим реактором / Д.Г. Сафонов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 98–102.

4. Safonov, D. G. The Calculation of Steady-State Mode of 35 KW Radial System with Arc Suppression Coils Considering Asymmetry of Power Lines / D.G. Safonov, S.S. Girshin, V.N. Goryunov, E.A. Kuznetsov, E.V. Petrova // 2016 IEEE

16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, June 07–10. 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555455.

5. Safonov, D. G. Analysis of Asymmetrical Modes in Medium Voltage Electrical Grids with Compensated Neutral / D.G. Safonov, S.S. Girshin, V.N. Goryunov, E.A. Kuznetsov, E.V. Petrova // 2016 the 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies. Istanbul, May 25–27. 2016. Vol. 70. DOI: 10.1051/mateconf/20167010008.

6. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21771 от 14.04.2016 г. Алгоритм автоматической подстройки дугогасящего реактора / Д.Г. Сафонов, С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов, ОмГТУ. – М.: ОФЭРНиО.

На диссертацию поступили отзывы, все они положительные.

Отзыв ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», подписанный Павлюченко Дмитрием Анатольевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Системы электроснабжения предприятий», Манусовым Вадимом Зиновьевичем, доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Системы электроснабжения предприятий» и утвержденный Вострецовым Алексеем Геннадьевичем, доктором технических наук, профессором, проректором по научной работе, заслуженным деятелем науки Российской Федерации. Замечания: 1) На режим ОЗЗ оказывает существенное влияние сопротивление грунта. Каким образом это может быть учтено в приведенной в разделе 2.1 диссертации математической модели? 2) Следовало более подробно проанализировать выражение (2.13), так как оно связывает мгновенные значения параметров режима без участия производных, что довольно необычно. Кроме того, данное выражение совпадает с выражением (2.96). 3) В п. 2.6 автором представлена достаточно новая математическая модель дугового замыкания на землю на основе вольт-амперной характеристики дуги. Однако автором не представлены результаты решения полученной системы уравнений. 4) Для выделения свободной составляющей контура нулевой последователь-

ности автор в разделе 3.2 применяет вейвлет Добеши, при этом не приводится обоснование выбора данного типа вейвлета. 5) На рис. 2.2 нагрузки смоделированы источниками тока, включенными во всех трех фазах. Однако сумма этих токов равна нулю, поэтому лучше было показать источники тока только в двух фазах. 6) По тексту диссертации встречаются опечатки, стилистические погрешности.

Отзыв официального оппонента, профессора кафедры «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктора технических наук, профессора **В.А. Шуина**. Замечания: 1) Аналитический обзор известных способов автоматической настройки компенсации емкостного тока ОЗЗ, приведенный в первой главе (раздел 1.3), не содержит главного – оценки степени проработанности проблемы. Из содержания раздела и главы 1 в целом не ясно, почему и в какой степени применяемые в настоящее время способы резонансной настройки ДГР (например, разработки Обабкова В.К., НПП «Бреслер» и др.) не позволяют эффективно решить указанную задачу. Автор просто принимает, что в своих дальнейших разработках он будет применять, как наиболее эффективные, экстремальный и частотный методы. 2) На стр. 11 и 12 автор утверждает, что «изоляция кабелей [после пробоя при ОЗЗ] не восстанавливается», поэтому «для кабельных сетей одно из достоинств такого режима заземления нейтрали [компенсации емкостного тока ОЗЗ] исключается». Известно (Шалыт Г.М., Лихачев Ф.А. и др.), что в кабельных сетях большая часть (до 70% и более) пробоев изоляции фазы на землю имеет кратковременный самоустраняющийся характер («клевки земли», «мгновенные земли»). При таких пробоях изоляция кабеля действительно полностью не восстанавливается, однако в компенсированных сетях время от первого кратковременного до окончательного пробоя (от нескольких часов до нескольких суток и более) позволяет отключить поврежденный участок без нарушения электроснабжения потребителей и провести испытания кабеля.

Основной проблемой в компенсированных кабельных сетях является выполнение селективной защиты от ОЗЗ, фиксирующей все разновидности замыканий. 3) Не ясно, в каких целях автор разрабатывает модель сети в форме системы дифференциальных уравнений состояния 1-го порядка? Для численного решения такой системы потребуется применение стандартных программ. Более эффективно для разработки такой модели использовать современные профессиональные инструменты моделирования (Matlab, PSCAD, ATP/ATPDraw и др.). Следует отметить также, что в диссертации отсутствуют примеры применения разработанной модели для практических расчетов, а в 3-й главе для исследования эффективности разработанной системы управления ДГР используется модель сети, реализованная с использованием Matlab. 4) Математические описания моделей сети для исследования переходных процессов при ОЗЗ (раздел 2.1) и для расчета установившегося режима, предшествующего ОЗЗ (раздел 2.4) излишне громоздки (содержат сотни уравнений). Следовало бы применить матричную форму записи систем дифференциальных и алгебраических уравнений, а громоздкие преобразования перенести в приложения. 5) На точность расчетов переходных процессов при ОЗЗ существенное влияние оказывает методика определения продольных параметров линий, учитывая зависимость индуктивностей и активных сопротивлений от частоты переходных токов. При параметрировании разработанной модели автором предлагается использовать формулы (2.141) – (2.152) для определения погонных значений индуктивностей и взаимных индукций ВЛ на рабочей частоте 50 Гц. В формулах (2.153) – (2.156) для КЛ используются справочные значения погонных индуктивностей на частоте 50 Гц. Формулы для расчета активных сопротивлений линий (2.137) – (2.139) также не учитывают влияние поверхностного эффекта в переходных режимах, а также различие сопротивлений прямой и нулевой последовательности. Такой подход может привести к грубым ошибкам в оценке амплитуды, частоты и постоянной затухания, прежде всего, разрядных составляющих переходных токов. 6) Раздел 2.5 имеет название «Модель дугового замыкания на землю», однако рассматривается только модель дуги в мес-

те повреждения. Модель дугового перемежающегося ОЗЗ должна включать также уравнения и условия, определяющие моменты гашения и повторного зажигания заземляющей дуги (например, в соответствии с теориями W. Petersen, J.F. Peters, J. Slepian, Белякова Н.Н.). Следует отметить также, что в условиях реальных сетей повторные зажигания и гашения заземляющей дуги могут иметь неупорядоченный характер, что затрудняет моделирование. 7) Раздел 3.2 имеет название «Принципиальная схема системы управления», однако в нем приводится только структурная схема и ее краткое описание (рис. 3.3). 8) В главе 4, посвященной разработке макета ДГР, автор формулирует основные требования к их техническим характеристикам. Учитывались ли при этом требования стандарта организации ПАО «РОССЕТИ» СТО 34.01-3.2-008-2017. 9) В разделе 3.3, посвященном исследованиям эффективности системы управления ДГР на имитационной модели сети, приведен только пример ее работы при устойчивом ОЗЗ (рис. 3.16). Отсутствуют какие-либо примеры, подтверждающие эффективность работы разработанной системы при ОЗЗ через перемежающуюся дугу. 10) К недостаткам диссертации следует отнести недостаточно четкие выводы по главам, наличие орфографических и пунктуационных ошибок, отступления от требований ГОСТ к оформлению рисунков.

Отзыв официального оппонента, доцента кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кандидата технических наук, доцента **Е.А. Третьякова**. Замечания: 1) Во введении диссертации в качестве предмета исследования указана система регулирования ДГР, а далее в тексте рассматривается система управления ДГР. 2) В разделе 2 диссертации в математической модели расчета установившегося режима электрической сети не учитываются устройства компенсации реактивной мощности и прочие линейные регуляторы параметров режима и качества электроэнергии. 3) Математическая модель представлена для расчета установившегося режима электрической сети 35 кВ с воздушными линиями. Можно ли по данной модели выполнять расчет элек-

трических сетей с кабельными линиями напряжением 6-10 кВ? 4) Непонятно, как выполнялась верификация результатов расчета установившегося режима электрической сети. Как оценивалась адекватность математической модели? 5) Как в разработанном алгоритме работы системы управления ДГР учитывалось изменение частоты электрической сети? 6) Недостаточно обоснованы преимущества вейвлет разложения сигналов применительно к решаемой задаче. Автору следовало бы выполнить сравнительную оценку точности определения частоты свободной составляющей напряжения в контуре нулевой последовательности различными методами. 7) Непонятно, как оценивать изменение конфигураций в блоке 21 рисунка 3.4 диссертации, если не вся электрическая сеть будет находиться под оперативно-диспетчерским управлением одного собственника. 8) Разработанный автором алгоритм работы системы управления ДГР основан на компенсации емкостных токов основной частоты в электрических сетях. Выполнялась ли автором экспериментальная оценка спектрального состава указанных емкостных токов в реальных электрических сетях 6-35 кВ с нелинейными нагрузками? Какая доля емкостных токов будет скомпенсирована ДГР при искажениях синусоидальности токов и напряжений в рассматриваемой электрической сети? 9) В разделе 3 диссертации нарушен порядок нумерации формул. Низкое качество некоторых рисунков (рис. 1.1 и 1.2).

На автореферат поступило 10 отзывов: **1.** Вахнина В.В. – д-р. техн. наук, проф., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (г. Тольятти) – с одним замечанием; **2.** Герасименко А.А. – д-р. техн. наук, проф., федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск) – с тремя замечаниями; **3.** Ковалев В.З. – д-р. техн. наук, проф., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск) – с тремя замечаниями; **4.** Шведов Г.В. – канд. техн. наук, доц., федеральное государст-

венное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва) – с четырьмя замечаниями; **5.** Федчишин В.В. – канд. техн. наук, доц., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск) – с четырьмя замечаниями; **6.** Сизганова Е.Ю. – канд. техн. наук, доц., Филатов А.Н. – канд. техн. наук, доц., федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск) – с четырьмя замечаниями; **7.** Владимирова Л.В. – канд. техн. наук, доц., бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет» (г. Сургут) – с тремя замечаниями; **8.** Кажкин И.Е. – канд. техн. наук, доц., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (г. Калининград) – с тремя замечаниями; **9.** Щекочихин А.В. – канд. техн. наук, доц., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижевартовский государственный университет» (г. Нижневартовск) – с двумя замечаниями; **10.** Никишкин А.С. – канд. техн. наук, Омский институт водного транспорта – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта» (г. Новосибирск) – с тремя замечаниями.

Все отзывы на автореферат положительные, критические замечания сводятся к следующему: недостаточно обосновано применение вейвлет преобразования для определения частоты свободных колебаний в контуре нулевой последовательности; на графике зависимости индуктивности дугогасящего реактора от зазора не в полном объеме приведены расчетные и экспериментальные данные, необходимые для полноценного сравнения результатов; не представлены расчеты, подтверждающие корректность работы математической модели при перемежающемся однофазном замыкании на землю.

Остальные замечания имеют рекомендательный характер и не содержат возражений, касающихся научной новизны, основных результатов, выносимых на защиту и значения для теории и практики.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается сферой их научных интересов и широко известными результатами деятельности в области разработки способов и устройств защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего напряжения, разработки методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем, разработки методов управления режимами распределительных электрических сетей, что подтверждается их научными и учебно-методическими публикациями.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая методика, позволившая выявить качественно новые закономерности управления компенсацией емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения;

предложен нетрадиционный подход при разработке математической модели электрической сети напряжением 35 кВ с компенсированной нейтралью в нормальном установившемся режиме и режимах однофазного замыкания на землю с учетом естественной несимметрии воздушных линий, позволяющий существенно повысить точность расчета параметров режима электрической сети, включая напряжение смещения нейтрали;

доказана перспективность использования алгоритмов дискретного вейвлет преобразования для оценки параметров управляющих воздействий на существующие системы компенсации емкостных токов в электроэнергетических системах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, вносящие вклад в расширение представлений об автоматическом управлении компенсацией емкостных токов в электроэнергетических системах;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс существующих базовых методов исследования: теоретических основ электротехники, теории электромагнитного поля, теории вейвлетов, авторегрессионного спектрального оценивания, а также способов и методов настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю, компьютерное и математическое моделирование;

изложены элементы теории режимов однофазного замыкания на землю в электрических сетях среднего напряжения с высокой степенью естественной несимметрии;

раскрыты возможности использования математических моделей установившихся режимов и переходных процессов при компенсации емкостных токов замыкания на землю в электроэнергетических системах;

изучено влияние геометрических факторов на напряжение смещения нейтрали, а также причинно-следственные связи, определяющие зависимость параметров режима однофазного замыкания от расположения фаз воздушных линий в электроэнергетической системе;

проведена модернизация существующих математических моделей распределительной электрической сети 35 кВ с компенсированной через дугогасящий реактор нейтралью, обеспечивающих получение новых результатов в области параметров режима.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в электросетевой организации программно-техническая реализация математической модели расчета установившегося режима электрической сети с компенсированной нейтралью; имитационная модель распределительной электрической сети с дугогасящим реактором внедрена в образовательные технологии, используемые при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов в федеральном государственном бюджетном об-

разовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»;

создана система практических рекомендаций по проведению испытаний экспериментальных образцов электрооборудования на действующих подстанциях электроэнергетических систем;

представлены предложения по дальнейшему совершенствованию цифровых технологий в электроэнергетических системах посредством применения аппарата вейвлет преобразования в качестве средства программной фильтрации информативных параметров свободной составляющей напряжения для используемых систем компенсации емкостных токов в распределительных электрических сетях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ показана воспроизводимость результатов, которые получены на сертифицированном оборудовании в соответствии с разработанной программой и методикой стендовых испытаний экспериментального образца дугогасящего реактора и системы управления;

теория построена на известных фундаментальных положениях электротехники, проверяемых данных и применении общенаучных методов исследования и корректного математического аппарата, а также на сравнении расчетных данных с результатами, полученными экспериментальным путем;

идея базируется на анализе практики и обобщении передового мирового опыта в области компенсации емкостных токов замыкания на землю в электроэнергетических системах;

использованы результаты сравнения авторских данных и данных, опубликованных в научных трудах, известных специалистов в области компенсации емкостных токов замыкания на землю;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по тематике компенсации емкостных токов замыкания на землю;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации о параметрах распределительных электрических сетей в режиме однофазных замыканий на землю.

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии в разработке математической модели распределительной электрической сети с компенсированной нейтралью в установленном режиме и режиме однофазного замыкания на землю, разработке алгоритма автоматической настройки дугогасящего реактора, получении исходных данных и проведении научных экспериментов на действующем объекте электроэнергетики;

личном участии в разработке имитационной модели распределительной электрической сети с компенсированной нейтралью, в обработке и анализе экспериментальных данных и сопоставлении их с результатами моделирования, апробации результатов исследования, в подготовке основных публикаций по выполненной работе, в разработке и формировании выводов и рекомендаций по диссертации в целом.

при участии автора в разработке экспериментальной (стендовой) установки для проведения испытаний дугогасящего реактора и его системы управления на действующем объекте электроэнергетики.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования:

электросетевым организациям, осуществляющим деятельность по передаче электрической энергии – математическую модель распределительной электрической сети с компенсированной нейтралью для расчета установившегося режима и в режиме однофазного замыкания на землю;

научно-исследовательским и научно-производственным предприятиям, осуществляющим разработку и модернизацию электрооборудования электроэнергетических систем – алгоритм работы системы управления дугогасящим реактором, реализующий два способа автоматической настройки компенсации емкостных токов;

высшим учебным заведениям, осуществляющим подготовку бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», магистров по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» – имитационную модель распределительной электрической сети с дугогасящим реактором для расчета параметров режима при однофазном замыкании на землю.

Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения по совершенствованию управления компенсацией емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях среднего напряжения, имеющие существенное значение для развития страны.

На заседании 23 января 2020 года диссертационный совет принял решение присудить Сафонову Д.Г. учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени кандидата технических наук – 13, против – 1, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя

диссертационного совета Д 212.178.12  В.Т. Черемисин

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.178.12  Д.С. Осипов

«23» января 2020 г.

