

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Новосибирский  
государственный технический  
университет», доктор технических  
наук, профессор, заслуженный  
деятель науки Российской  
Федерации



## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Д.Г. Сафонова на тему «Управление компенсацией емкостных токов в электрических сетях среднего класса напряжения при однофазных замыканиях на землю», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

### **1. Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы**

Исходя из анализа тематики выполненных исследований, посвящённых разработке математической модели распределительной сети с компенсированной нейтралью в режимах до и во время однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), алгоритма работы системы управления дугогасящим реактором (ДГР), имитационной модели распределительной сети с компенсированной нейтралью, а также практических рекомендаций, можно заключить, что диссертация Д.Г. Сафонова соответствует п. 6, п. 7, п. 9 и п. 13 паспорта специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

## 2. Актуальность темы исследования и ее связь с запросами практики

Наиболее часто встречающимся видом повреждений в электрических сетях среднего напряжения (6-35 кВ) являются ОЗЗ, при возникновении которых наблюдаются значительные перенапряжения на неповрежденных фазах, что может приводить к выходу из строя электрооборудования и электротравматизму. Таким образом, в случае появления ОЗЗ требуется отключение поврежденной линии, что ведет к перерыву электроснабжения потребителей. Эта проблема эффективно может быть решена путем применения компенсированной нейтрали с помощью дугогасящего реактора (ДГР).

Согласно Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации ДГР должны иметь резонансную настройку. Допускается настройка с перекомпенсацией, при которой степень расстройки составит не более 5 %, иначе теряются все основные преимущества компенсированной нейтрали. Поскольку изменение емкостного тока происходит в соответствии с режимом работы сети (изменением конфигурации), то необходимо применение автоматических систем управления настройкой ДГР с возможностью плавного регулирования.

В данной работе исследованы современные типы ДГР и способы их управления, которые часто обсуждаются в научном сообществе в связи с появлением новых технических решений. Один из наиболее важных результатов, полученных в работе, состоит в повышении точности расчета параметров настройки ДГР. При этом быстродействие и точность настройки являются ключевым фактором повышения надежности и качества функционирования электрических сетей среднего напряжения. Таким образом, актуальность темы диссертационной работы Д.Г. Сафонова сомнений не вызывает.

Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой, утвержденной постановлением Правительства России № 1096 «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».



### **3. Научная новизна диссертационной работы**

состоит в следующем:

3.1. Предложена математическая модель распределительной сети среднего напряжения с компенсированной нейтралью в различных режимах, включая ОЗЗ, позволяющая учесть взаимные индуктивности и емкости линий при наличии естественной несимметрии электрической сети и наряду с этим повысить точность определения напряжения смещения нейтрали.

3.2. Разработан алгоритм системы управления индуктивностью реактора, в основе которого лежат два способа настройки, а именно: «частотный» для предварительной настройки с применением вейвлет преобразования и «экстремальный» для контроля настройки в резонансный режим.

3.3. Создана имитационная модель распределительной сети, отличительной особенностью которой является блок управления ДГР, а также возможность изменения конфигурации электрической сети и характера динамически изменяющейся нагрузки.

### **4. Практическая значимость работы**

заключается в следующем:

4.1. Создана программа расчета установившихся режимов распределительной сети с ДГР, позволяющая сократить время и повысить точность определения начальных условий для настройки реактора.

4.2. Разработан опытный образец ДГР с изменяемым воздушным зазором магнитопровода с электрогидроприводом.

4.3. Полученные в работе результаты использованы ООО «Объединенная сетевая компания», что подтверждено соответствующим актом внедрения.

### **5. Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка из 112 источников и пяти

приложений. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, содержащих 55 рисунков и 6 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** изложены теоретические аспекты компенсации емкостных токов в распределительных сетях среднего класса напряжения при ОЗЗ. Произведен анализ характеристик, достоинств и недостатков, особенностей эксплуатации различных типов ДГР, обоснован выбор ДГР с регулируемым зазором магнитопровода (плунжерный) для использования с разрабатываемой системой управления.

Представлено описание способов автоматической компенсации емкостных токов, областей их применения, достоинств и недостатков. Согласно таким критериям как погрешность настройки, сложность технической реализации, величина напряжения смещения нейтрали, тип используемого ДГР и др. установлено, что целесообразно разработать систему управления на основе двух способов: частотного и экстремального.

**Во втором разделе** представлена математическая модель распределительной сети 35 кВ в режиме ОЗЗ (металлического и через переходное сопротивление), составленная для схемы замещения распределительной сети 35 кВ с компенсированной с помощью ДГР нейтралью. Емкости воздушных линий и взаимные индуктивности определены с учетом естественной несимметрии, емкости определены на основе обращения матрицы потенциальных коэффициентов.

Математическая модель системы управления ДГР по экстремальному способу представлена двумя блоками: моделью определения расчетной емкости электрической сети и уравнением настройки индуктивности ДГР на емкость сети.

Для определения начальных условий составлена математическая модель установившегося режима сети с ДГР, на основе которой реализован алгоритм и



программа расчета, позволяющие повысить точность определения параметров режима сети, в том числе напряжения смещения нейтрали.

**Третий раздел** посвящен разработке алгоритма системы управления ДГР, реализованной на основе двух способов: частотного (для предварительной настройки) и экстремального (для контроля настройки в резонансный режим).

В частотном способе задача гармонического анализа частоты свободных колебаний напряжения контура нулевой последовательности (КНП) решена с помощью пакетного вейвлет преобразования, высокочастотные компоненты и шумы при этом отфильтрованы программным способом алгоритмами вейвлет фильтрации.

Параметром настройки ДГР в резонансный режим при экстремальном способе является напряжение смещение нейтрали.

Для оценки компенсации емкостных токов в приложении Simulink программного комплекса MATLAB создана имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью, в которой ДГР представлен как управляемый источник тока.

**В четвертом разделе** приведен расчет магнитной части ДГР с целью создания опытного образца для стендовых испытаний. В программе ELCUT выполнено моделирование стационарного магнитного поля методом конечных элементов. На действующей подстанции проведены стендовые испытания опытного образца ДГР на напряжение 35 кВ и его системы управления в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний. Полученные при моделировании и в результате эксперимента кратность изменения индуктивности ДГР имеют достаточно хорошее совпадение.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

По каждой из глав представлены лаконичные и содержательные выводы. Исходя из анализа содержания работы в разрезе ее структуры и последовательности изложения, можно констатировать хорошее внутреннее единство, целостность и практическую направленность работы.

## **6. Степень достоверности результатов и обоснованности выводов исследования**

Достоверность и обоснованность выводов диссертационной работы подтверждается использованием общеизвестных методов теоретических основ электротехники, теории электромагнитного поля, корректным применением для полученных выводов математического аппарата; качественным совпадением результатов имитационного и численного моделирования с результатами физических экспериментальных данных, полученных при стендовых испытаниях.

## **7. Апробация работы и подтверждение опубликования ее основных положений и результатов**

Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных и российских научно-технических конференциях, а также научных семинарах Омского государственного технического университета.

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 5 печатных работ в рецензируемых изданиях из Перечня, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в материалах конференций индексируются в международных базах данных: одна в базе Scopus, одна в базе Web of Science, имеется одно свидетельство о регистрации электронного ресурса.

Аннотация диссертации и публикации достаточно полно отражают основное содержание диссертационной работы и полученные автором научные результаты.

## **8. Основные замечания по работе**

В целом содержание диссертационной работы Д.Г. Сафонова, ее основные положения, выводы и результаты возражений не вызывают. Однако, можно сделать следующие замечания:



8.1. На режим ОЗЗ оказывает существенное влияние сопротивление грунта. Каким образом это может быть учтено в приведенной в разделе 2.1 диссертации математической модели?

8.2. 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).

8.3. 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.

8.4. Для выделения свободной составляющей контура нулевой последовательности автор в разделе 3.2 применяет вейвлет Добеши, при этом не приводится обоснование выбора данного типа вейвлета.

8.5. 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.

8.6. По тексту диссертации встречаются опечатки, стилистические погрешности.

## **9. Общее заключение**

Диссертационная работа по актуальности темы и объему выполненных автором исследований является в достаточной мере законченной научно-квалификационной работой, направленной на решение актуальной практической задачи – повышение точности настройки дугогасящего реактора с регулируемым воздушным зазором для компенсации емкостных токов в распределительных сетях электроэнергетических систем. От предыдущих работ в данной области диссертация Д.Г. Сафонова отличается более глубокой

проработкой определения параметров настройки индуктивности реактора с применением вейвлет анализа.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Д.Г. Сафонова соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции от 01.10.2018 г.). Ее автор, Сафонов Дмитрий Геннадьевич, вполне заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Отзыв на диссертацию работу Д.Г. Сафонова обсужден и утвержден на заседании кафедры «Систем электроснабжения предприятий» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», протокол № 12 от «05» декабря 2019 г.

Заведующий кафедрой «Систем электроснабжения предприятий» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,  
кандидат технических наук, доцент

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел. (383) 346-15-51

E-mail: pavlyuchenko@corp.nstu.ru

 Д.А. Павлюченко

Профессор кафедры «Систем электроснабжения предприятий» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

доктор технических наук, профессор

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел. (383) 346-15-51

E-mail: manusov@corp.nstu.ru

 В.З. Манусов



