

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной работе и инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»

\_\_\_\_\_ В.С. Пузин

20 » мая 2022 г.

### ОТЗЫВ

#### ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

на диссертацию Ю.Д. Кутумова

#### **«Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

#### **Актуальность темы диссертации, цель работы**

В настоящее время через электрические кабельные сети среднего напряжения 6–35 кВ распределяется порядка 50% вырабатываемой в стране электроэнергии, при этом около 95% их суммарной протяженности составляют кабельные сети напряжением 6–10 кВ. Поэтому надежное электроснабжение потребителей в значительной мере определяется эффективностью функционирования кабельных сетей напряжением 6–10 кВ.

В кабельных сетях среднего напряжения преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), составляющие 70–90% общего числа электрических повреждений и часто являющиеся первопричиной нарушений электроснабжения потребителей, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. В целях повышения надежности электроснабжения потребителей распределительные кабельные сети среднего напряжения, как правило, работают с режимами заземления нейтрали, обеспечивающими малые токи ОЗЗ и возможность работы сети в течение достаточно длительного времени с замыканием фазы на землю. Защита от ОЗЗ питающих и распределительных кабельных линий электропередачи (ЛЭП) в таких сетях выполняется, как правило, с действием на сигнал.

К режимам заземления нейтрали, обеспечивающим возможность работы сети с замыканием фазы сети на землю, относятся, прежде всего, режимы работы с изолированной нейтралью и резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР) для компенсации емкостных токов ОЗЗ. В настоящее время в России

примерно 20% кабельных сетей 6–10 кВ работают с компенсацией емкостных токов ОЗЗ и около 80% – с изолированной нейтралью.

Тема диссертации и решаемые задачи актуальны, так как в настоящее время не в полной мере проработаны вопросы полной компенсации всех составляющих тока однофазного замыкания на землю (ёмкостной, активной, высших гармонических) в кабельных сетях 6–10 кВ, необходимой для обеспечения самопогасания электрической дуги, а также вопросы дистанционного определения зоны повреждения при полной компенсации.

Решаемые задачи входят важной составляющей в комплекс мероприятий, повышающих надёжность существующих кабельных сетей: мониторинг и диагностика развивающихся повреждений, определение места повреждения на трассе и др.

**Цель диссертации** формулируется как исследование и разработка методов повышения эффективности компенсации токов ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ в условиях влияния на ток замыкания высших гармонических составляющих.

### **Оценка содержания диссертации и ее основных выводов**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, соответствующих поставленным автором задачам работы, заключения по работе, списка литературы из 255 наименований и приложений.

В *главе 1* дан аналитический обзор методов и устройств компенсации ёмкостной составляющей основной частоты тока ОЗЗ (КЕС), компенсации активной составляющей тока ОЗЗ (КАС), а также методов и устройств компенсации высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ (КВГ) и опыта их эксплуатации и применения. Автор справедливо показывает, что необходимость в применении КАС дополнительно к КЕС практически возникает только в кабельных сетях 6–10 кВ с большими значениями ёмкостного тока сети более 150–200 А, доля которых в общем числе кабельных сетей составляет в России около 5%. Обоснованной представляется позиция автора, заключающаяся в том, что основной причиной не всегда высокой эффективности КЕС в кабельных сетях 6–10 кВ с ёмкостными токами менее 100 А даже при резонансной настройке ДГР являются высшие гармоники (ВГ). На основе обзора автор даёт общую оценку состояния проблемы компенсации составляющих основной частоты и высших гармоник в токе ОЗЗ и обосновано ставит задачи исследования.

Обращение автора к значительному количеству источников делает представленный им аналитический обзор полным и заслуживающим внимания при разработке различных решений в области полной компенсации различных составляющих тока ОЗЗ.

В *главе 2* на основе анализа опубликованных в различных источниках данных получены оценки среднего и максимального уровней ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, диапазона частот гармоник, требующих компенсации, и мощности источника, необходимого для их компенсации. Автором показано, что при предельном для кабельных сетей 6–10 кВ уровне высших гармоник в токе устойчивого ОЗЗ до 50% от ёмкостного тока сети мощность вспомогательного источника, необходимого для их

компенсации, не превышает 5% от мощности ДГР, что существенно упрощает решение задачи компенсации ВГ в токе устойчивого ОЗЗ.

На основе теорий дуговых прерывистых ОЗЗ, разработанных W. Petersen'ом, Беляковым Н.Н., с применением имитационной модели кабельной сети 6 кВ в программном комплексе Matlab установлено, что ВГ при большом уровне по отношению к суммарному емкостному току сети могут оказывать существенное влияние на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги, приводящее к увеличению времени горения дуги и кратности максимальных перенапряжений на неповрежденных фазах до 16%. Исследования выполнены как при резонансной настройке ДГР, так и при возможных в реальных условиях эксплуатации расстройках компенсации.

В *главе 3* исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП 6–10 кВ при наличии в токе замыкания на землю высших гармонических составляющих с целью определения опасного уровня ВГ в токе ОЗЗ и области применения их компенсации.

Автором разработан комплекс имитационных моделей, обеспечивающий решения задач, возникающих при исследовании процессов нагрева кабельной ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ), проложенной в грунте, токами высших гармоник при различных видах ОЗЗ в компенсированных сетях 6–10 кВ, что, несомненно, отражает научную новизну рассматриваемой диссертационной работы.

На основе вычислительных экспериментов, выполненных с применением указанных имитационных моделей, определены условия, при которых становится возможным переход ОЗЗ различных типов в междуфазное КЗ. Следует отметить оригинальность подхода, используемого автором для решения данной задачи, которая состоит в использовании различных моделей для расчёта электромагнитных и электротепловых переходных процессов в кабельных ЛЭП при ОЗЗ, а также в классификации видов ОЗЗ в соответствии с особенностями тепловых процессов при каждом из них. Достоверность результатов, полученных с применением указанных имитационных моделей, подтверждается их физической непротиворечивостью и результатами верификации.

Разработанные автором принципы построения и методика применения комплекса математических моделей для исследования процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ могут быть использованы для исследования электротепловых процессов при ОЗЗ и других видах повреждений (например, КЗ) в кабельных линиях другого типа (например, с изоляцией из сшитого полиэтилена), другого класса напряжения или в сетях с другими режимами заземления нейтрали.

В *главе 4* для электрической сети с заземлением нейтрали через ДГР с использованием комплексной схемы замещения по методу симметричных составляющих автором получено общее математическое описание условий полной компенсации тока в месте ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие и составляющие переходного тока, с применением вспомогательного источника компенсирующего тока, включенного в нейтраль сети. На основе общего математического описания условий полной компенсации тока ОЗЗ разработан алгоритм и предложен способ компенсации разрядной и зарядной составляющих переходного тока.

Отметим, что в работе не исследовано влияние на эффективность компенсации параметров и рабочих характеристик импульсного источника компенсирующего тока.

Также в главе 4 для сети с заземлением нейтрали через ДГР получено математическое описание условий компенсации потенциала поврежденной фазы, обеспечивающих подавление повторных пробоев изоляции после первого гашения заземляющей дуги, т.е. подавление дуговых прерывистых и дуговых перемежающихся замыканий, с применением вспомогательного источника тока, включенного в нейтраль сети.

Автор показал, что система компенсации потенциала поврежденной фазы для подавления дуговых замыканий и компенсации активной составляющей тока ОЗЗ, разработанная научной школой В.К. Обабкова (ООО ВП «НТБЭ»), неэффективна при значительных расстройках компенсации. Метод компенсации потенциала поврежденной фазы, предложенный ООО НПП «Бреслер», также исследованный в работе, таких недостатков не имеет и способен устойчиво поддерживать уровень напряжения поврежденной фазы стремящимся к нулю даже при наличии расстройок компенсации.

Автором показано также, что алгоритм компенсации ВГ в токе устойчивого ОЗЗ, реализованный в указанной выше разработке ООО НПП «Бреслер» и основанный на формировании тока компенсирующего источника с использованием производной высших гармоник напряжения, измеряемого на нейтрали сети, в достаточной степени эффективен.

В главе 5 автором показано, что для обеспечения достоверности и высокой точности расчетов параметров переходных токов и напряжений, необходимой для решения задачи дистанционного определения места замыкания (ДОМЗЗ), должны использоваться частотно-зависимые модели линий.

Предложена модификация способа ДОМЗЗ, основанного на измерении параметров переходного напряжения поврежденной фазы, обеспечивающая повышение точности определения место (зоны) повреждения на кабельных ЛЭП 6–10 кВ. Отличительной особенностью предложенной автором модификации способа ДОМЗЗ является использование алгоритмической модели кабельной сети, содержащей кабели с частотно-зависимыми продольными параметрами, а также меньшее количество вычислительных операций по сравнению со способом-прототипом, что позволит увеличить точность метода.

Автором показано, что в целях уменьшения в микропроцессорных терминалах РЗА сетей среднего напряжения, работающих с различными режимами заземления нейтрали, числа отдельных функций защиты от ОЗЗ целесообразно применить разработанную совместно ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальную (для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ) мультислотную адмиттансную защиту, дополнив ее разработанным в диссертации блоком фиксации однократных пробоев изоляции, работающим по принципу направленной импульсной защиты.

### **Значимость результатов работы для науки и производства**

На наш взгляд, к наиболее значительным результатам диссертационной работы, обуславливающим её научную новизну и практическую значимость, следует отнести следующие:

– результаты исследований на имитационных моделях ОЗЗ через перемежающуюся дугу в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, позволяющие оценить степень влияния высших гармоник в токе замыкания на кратность дуговых перенапряжений в сети и действующее значение тока в месте повреждения;

– принципы построения и методика применения комплекса математических моделей для исследования процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ при ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, которые могут быть использованы для исследования электротепловых процессов при замыканиях на землю в кабельных линиях другого типа (например, с изоляцией из сшитого полиэтилена), другого класса напряжения или в сетях с другими режимами заземления нейтрали;

– результаты исследований на имитационных моделях электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ при различных видах ОЗЗ, позволяющие определить опасный уровень высших гармоник в токе замыкания на землю, время нагрева кабелей до критической по условиям термической стойкости междуфазной изоляции температуры и обосновать необходимость и область применения компенсации высших гармоник в кабельных сетях 6–10 кВ;

– математическое описание условий полной компенсации тока ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие, и подавления дуговых замыкания на землю с применением вспомогательного источника тока, подключенного к нейтрали сети, в кабельных сетях 6–10 кВ;

– способ компенсации переходных токов ОЗЗ, обеспечивающий уменьшение в несколько раз действующего значения тока в месте повреждения и ограничение перенапряжения при замыканиях через перемежающуюся дугу в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР;

– рекомендации по выбору параметров имитационных моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ для исследований переходных процессов при ОЗЗ, позволяющие повысить точность расчетов и исключить грубые ошибки при определении параметров переходных токов и напряжений;

- варианты модификации разработанной ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальной (для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ) мультисквадратной адмиттансной защиты для обеспечения возможности ее применения в сетях, работающих с полной компенсацией тока ОЗЗ.

Научная и практическая значимость вышеуказанных результатов обусловлена также тем, что автор не только различными способами обосновывает необходимость применения устройств полной компенсации тока ОЗЗ (в особенности высших гармонических составляющих), но и предлагает комплекс взаимодополняющих друг друга решений, позволяющих обеспечить повышение эффективности функционирования компенсированных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ,

Таким образом, научная и практическая значимость диссертации не вызывает сомнений.

### Достоверность результатов работы

Достоверность полученных автором результатов обусловлена следующим:

- корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов;
- физической непротиворечивостью результатов исследований;
- сходимостью результатов, полученных с применением различных аналитических методов и на математических моделях, с результатами исследований других авторов, опубликованными в авторитетных источниках, приведенных в списке литературы диссертации.

### Рекомендации по использованию результатов работы

Разработанные в диссертации рекомендации по параметрированию математических моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ; имитационные модели, предназначенные для исследования электромагнитных и электротепловых переходных процессов в кабельных ЛЭП; условия полной компенсации токов ОЗЗ в кабельных сетях с заземлением нейтрали через ДГР; условия компенсации потенциала поврежденной фазы в целях подавления дуговых перемежающихся замыканий; предложенные алгоритм и способ компенсации переходных токов ОЗЗ, а также результаты усовершенствования способов селективной сигнализации и ДОМЗЗ могут быть рекомендованы для применения в научно-исследовательских работах организаций и вузов, занимающихся исследованиями и разработками в области полной компенсации токов ОЗЗ и устройств локации замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ, а также в учебном процессе электроэнергетических специальностей ВУЗов.

### Замечания по диссертации

1. Во введении автор утверждает, что показатели эффективности кабельных сетей с резонансным заземлением нейтрали в настоящее время могут быть сравнимы или даже ниже показателей эффективности показателей эффективности кабельных сетей с изолированной нейтралью. При этом не указывается, какие конкретно показатели имеются в виду.
2. При исследованиях процессов нагрева кабельной ЛЭП при дуговых ОЗЗ используется упрощенная модель дуги (рис. 3.27). Какими соображениями обосновывалась расчетная форма и параметры дуги в месте ОЗЗ?
3. В главе 3 в числе прочего исследуется нагрев кабельных ЛЭП при устойчивом дуговом ОЗЗ; для расчёта мощности, которая выделяется в канале пробоя, используется упрощенная вольт-амперная характеристика электрической дуги. Не приведет ли использование упрощенной вольт-амперной характеристики к существенным погрешностям в оценке мощности, которая выделяется в канале пробоя?
4. В главе 4 отсутствует заключение о принципиальной реализуемости источника компенсирующего тока, предназначенного для компенсации составляющих пере-

ходного процесса в токе ОЗЗ и о требуемой импульсной мощности такого источника.

5. Каковы перспективы внедрения предлагаемой полной компенсации тока ОЗЗ в каком-либо электросетевом предприятии?

Приведенные выше замечания не снижают общей положительной оценки работы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, основные результаты работы своевременно и полно опубликованы.

Результаты диссертации отражены в 20 печатных работах. Основные научные результаты опубликованы в 7 статьях изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации материалов диссертационных работ, и 5 статьях, входящих в международные системы цитирования Scopus, одном патенте на изобретение РФ.

Из двадцати публикаций по теме диссертации две написаны лично автором (без соавторов).

### **Заключение по диссертации**

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». *В части формулы специальности:* «... В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономического и надежного производства электроэнергии ...». *В части области исследования:* – п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствует разработка комплекса имитационных моделей для решения задач, связанных с исследованиями влияния ВГ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и электро-тепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ токами высших гармоник при различных видах замыканий на землю; – п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки нового способа автоматической компенсации составляющих переходного процесса при ОЗЗ и усовершенствованных алгоритмов локации ОЗЗ на кабельных ЛЭП в сетях, работающих с полной компенсацией тока замыкания на землю.

Диссертация Ю.Д. Кутумова «Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи разработки методов повышения эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю за счет учета влияния их высших гармонических составляющих, имеющей значение для соответствующей отрасли знаний – электроэнергетики, что соответствует критериям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, имеет научную и практическую значимость и может быть оценена положительно, а ее автор Кутумов

Юрий Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Диссертационная работа обсуждена и отзыв, составленный д.т.н., профессором Засыпкиным А.С., к.т.н., доцентом Пирожником А.А., к.т.н., доцентом Сарры С.В., к.т.н., доцентом Березкиным Е.Д., одобрен на расширенном заседании кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» «12» мая 2022 г., протокол № 9.

Заведующий кафедрой «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», доктор технических наук, профессор

Иванович Владимир Иванович

Подпись Нагая Владимира Ивановича заверяю:

Ученый секретарь Совета вуза

Холодкова Нина Николаевна



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (ЮРГПУ(НПИ))  
346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132  
Тел.: (8635) 255-448, E-mail: [rektorat@npi-tu.ru](mailto:rektorat@npi-tu.ru)  
Тел.: (8635) 255-211, E-mail: [estesrza@mail.ru](mailto:estesrza@mail.ru)