



О. М. Шамшович



А. С. Бикмурзин

## Опыт реализации резистивного заземления нейтрали в ООО «Башкирэнерго»

ШАМШОВИЧ О. М., БИКМУРЗИН А. С.  
ООО «Башкирские распределительные электрические сети» (ООО «Башкирэнерго») 450096, г. Уфа, ул. Комсомольская, 126 bikmurzin-ac@yandex.ru

Исследовано влияние резистивного заземления нейтрали на уровни перенапряжений в эксплуатируемой сети 10 кВ, питающейся от ПС «Дёма» производственного отделения Уфимские городские электрические сети ООО «Башкирэнерго». Расчитаны уровни перенапряжений при существующем режиме заземления нейтрали, определён оптимальный способ заземления нейтрали, подготовлено техническое решение по переходу на новый способ заземления нейтрали, установлены резисторы на 1-й и 2-й секции шин ПС «Дёма». Проведены экспериментальные исследования по влиянию установленных резисторов на уровни перенапряжений в сети 10 кВ, питающейся от подстанции «Дёма», при существующем и новом режиме заземления нейтрали, обработаны полученные результаты. Проведён анализ повреждаемости кабельных линий рассматриваемой сети до и после установки резистора. Подтверждено положительное влияние резистора на работу исследуемой сети 10 кВ по результатам выполненных теоретических расчётов, экспериментов, а также эксплуатации комбинированного заземления нейтрали.

**Ключевые слова:** комбинированное заземление нейтрали, высокоомный резистор, уровни перенапряжений.

В конце 2000-х годов в ОАО «Башкирэнерго» рассматривался вопрос применения резистивного заземления в электрических сетях 6 – 35 кВ для снижения воздействия внутренних перенапряжений. В 2009 г. было принято решение о необходимости установки высокоомных резисторов параллельно дугогасящим реакторам (ДГР) на Уфимской ТЭЦ-3 с заменой имеющихся ступенчатых ДГР на ДГР с плавной регулировкой. В случае успешной эксплуатации резисторов на Уфимской ТЭЦ-3 планировали распространить опыт установки резисторов на подстанциях 35 – 110 кВ сетевых предприятий. К сожалению, внедрение резистивного заземления на сетевых предприятиях отодвинулось на более поздние сроки. В 2012 г. произошла реорганизация ОАО «Башкирэнерго» с разделением на генерирующую и сетевую компании. Также оставались вопросы по нормативной базе и подходам к выбору способа заземления нейтрали сети 6 – 35 кВ — до сих пор единого мнения нет как среди научных работников, так и среди сотрудников предприятий. Одни выступают за приоритет низкоомного заземления, другие — за комбинированное и т. д. [1, 2].

Однако работа по изучению оптимального способа заземления нейтрали и опыта эксплуатации резисторов в электрических сетях 6 – 35 кВ в ООО «Башкирэнерго» продолжалась. В 2015 г. были выполнены научно-исследователь-

ские работы возможности применения глухозаземлённой нейтрали либо нейтрали, заземлённой через резистор, в электрических сетях 6 – 10 кВ г. Кумертау. В декабре 2015 г. состоялась поездка специалистов ООО «Башкир-

энерго» в ПАО «Ленэнерго» в целях изучения практического опыта реализации низкоомного сопротивления нейтрали.

### Выбор сети для реализации резистивного заземления

В 2017 г. в ООО «Башкирэнерго» принято решение провести НИОКР по вопросу реализации резистивного заземления нейтрали в 2018 г. В ходе НИОКР предполагалось проведение теоретических расчётов и экспериментальное подтверждение полученных результатов. Объектом реализации резистивного заземления нейтрали выбрана ПС «Дёма» производственного отделения Уфимские городские электрические сети (ПО УГЭС) ООО «Башкирэнерго». По результатам измерений косвенным методом ёмкостные токи на 1-й секции шин подстанции составляли 101,19 А, на 2-й секции шин — 101,16 А. Для компенсации ёмкостного тока сети на секциях ЗРУ-10 кВ ПС «Дёма» через нейтралобразующие трансформаторы ТДК-1-10 и ТДК-2-10 типа ТТУ-А1-630/10 в нейтраль установлены параллельно по два ступенчатых ДГР (рис. 1). На 1-й секции шин установлены ДГР ЗРОМ-300/10 мощностью 300 кВА, на 2-й секции шин — РЗДСОМ-380/10 мощностью 380 кВА. Сеть 10 кВ, питающаяся от ПС «Дёма», — преимущественно кабельного исполнения, также имеются и воздуш-

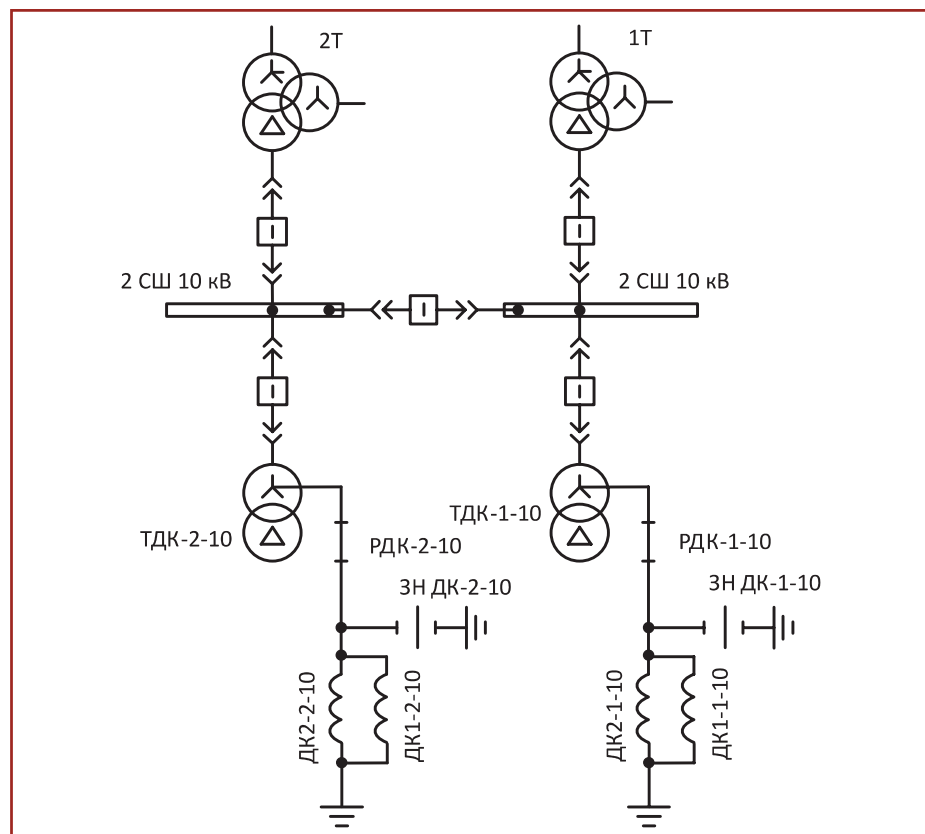


Рис. 1. Схема подключения ДГР на ПС «Дёма»

но-кабельные линии. Выбор данной подстанции — не случаен. В последние годы в сети 10 кВ, запитанной от ПС «Дёма», наблюдался рост повреждаемости кабельных линий (КЛ). Достаточно часто дуговые замыкания на землю в сети 10 кВ приводили к повреждениям 2-х и более кабелей, множественным повреждениям изоляции, что затягивало время восстановления нормальной схемы сети и электроснабжения потребителей, требовало больших человеческих ресурсов и эксплуатационных затрат на устранение последствий.

Наибольший пик повреждений пришёлся на 2017 г. — произошло 43 случая повреждения КЛ, в том числе 13 случаев одновременного повреждения двух и более КЛ. При этом количество повреждённых КЛ в случае одновременного повреждения 2-х и более КЛ составило 29.

Проведение НИОКР по исследованию влияния установки резистивного заземления на уровни перенапряжений в сети 10 кВ, запитанной от подстанции «Дёма» ПО УГЭС ООО «Башкирэнерго», состояло из двух этапов — теоретического и экспериментального. Работу выполняло ООО «Болид», г. Новосибирск.

### Расчёты и выбор резистора

В ходе проведения первого этапа НИОКР в первой половине 2018 г. выполнялись работы по сбору и анализу исходных данных, расчёты ёмкостных токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ); определение уровней перенапряжений при существующем режиме заземления нейтрали; оценка возможности перехода к резистивному заземлению нейтрали; расчёт, анализ и выбор необходимого сопротивления резистора; определение наиболее целесообразного способа заземления нейтрали; оценка экономического эффекта от применения выбранного режима заземления нейтрали; определение уровней перенапряжений для выбранного режима заземления нейтрали расчётным способом.

В результате для исследуемой сети 10 кВ получено следующее:

- в существующем режиме заземления нейтрали через ДГР кратность перенапряжений при ОЗЗ на «здоровых» фазах возрастает до значения  $3,15U_{\text{Фmax}}$  ( $U_{\text{Фmax}}$  — амплитуда наибольшего фазного напряжения сети);
- использование режима заземления нейтрали через низкоомный и высокоомный резисторы для данной сети представляет определённые технические и экономические сложности;

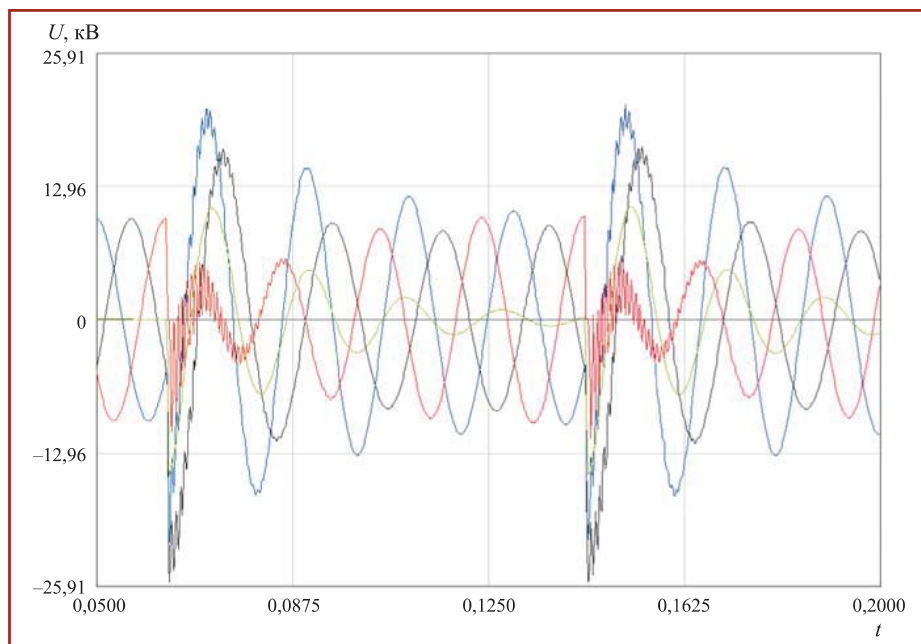


Рис. 2. Осциллограммы фазных напряжений и напряжение нейтрали в месте замыкания при ОЗЗ в сети 2-й секции шин 10 кВ ПС «Дёма» при установке в нейтраль параллельно ДГР резистора с сопротивлением 690 Ом:

кривые синего цвета — напряжение фазы А; чёрного цвета — напряжение фазы В; красного — напряжение фазы С; светло-зелёного — напряжение нейтрали.

- расчётные ёмкостные токи сети на 1-й секции шин составили 87,677 А, на 2-й секции — 93,78 А;

- способом заземления нейтрали, позволяющим обеспечить компенсацию ёмкостного тока ОЗЗ и ограничение перенапряжений при расстройках компенсации, рекомендован комбинированный режим заземления нейтрали, при котором параллельно ДГР подключается высокоомный резистор;

- оптимальный вариант — установка резистора сопротивлением 690 Ом на каждой секции шин 10 кВ параллельно

ДГР, что позволит ограничить перенапряжения в сети до значений не более  $2,65U_{\text{Фmax}}$  при расстройках компенсации ДГР примерно до 18 % (рис. 2).

Выбор комбинированного заземления нейтрали обусловлен следующими факторами:

- Согласно Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации при токах более 20 А в сети 10 кВ требуется компенсация ёмкостного тока. Данное условие исключает применение высокоомного заземления без подключения



Рис. 3. Монтаж резисторов на ПС «Дёма»



ДГР и нормативно недопустимо для сети 10 кВ, запитанной от ПС «Дёма».

- В настоящее время в случае низкоомного заземления нейтрали возможности отключать присоединения при каждом замыкании не существует в связи с отсутствием автоматического ввода резерва (АВР) по стороне 0,4 кВ на трансформаторных подстанциях (ТП) 10/0,4 кВ. Кроме того, для реализации низкоомного заземления необходимы дополнительные затраты на организацию селективной релейной защиты от ОЗЗ с действием на отключение повреждённого присоединения. Также в сети 10 кВ, питающейся от ПС «Дёма», имеются ТП и распределительные пункты (РП) сторонних организаций, что может вызвать трудности при внедрении низкоомного заземления нейтрали, связанные с организацией АВР 0,4 кВ и РЗА. Немаловажным фактом при низкоомном заземлении являются повышенные требования по величине сопротивления заземляющего устройства в соответствии с п. 3.2 ГОСТ 12.1.030.

В начале сентября 2018 г. по рассчитанному номиналу сопротивления на 1-й и 2-й секции шин 10 кВ ПС «Дёма» смонтированы резисторы (рис. 3).

#### Проведение опытов замыкания на землю

21 сентября 2018 г. проведены экспериментальные исследования металлических и дуговых ОЗЗ в сети 10 кВ, запитанной от ПС «Дёма». Эксперименты проводили с организацией искусственных ОЗЗ (рис. 4). Дуговое ОЗЗ создавалось с помощью специального искрового промежутка с вращающимися шаровыми медными электродами определённого диаметра. При этом один электрод, на который подаётся потенциал замыкаемой фазы, является неподвижным, а второй, заземлённый электрод, может совершать вращательно-поступательное движение. Металлическое замыкание создавалось с помощью того же промежутка при однократно создаваемом плотном контакте электродов.

Устройство для замыкания на землю было смонтировано возле опоры № 9 ВЛ 10 кВ Ф-86-14 ПС «Дёма» (рис. 5). В экспериментах замыкали фазу В. Во время проведения опытов организации металлических и дуговых ОЗЗ регистрировали осциллограммы тока ОЗЗ, токов, протекающих через ДГР и резистор, а также фазных напряжений для 2-й секции шин. Для варианта с объединением 1-й и 2-й секций шин регистрировали осциллограммы перенапряжений при дуговом ОЗЗ с включёнными ДГР и резисторами. Экспериментальные исследования на 2-й секции шин с организацией искусственных металли-

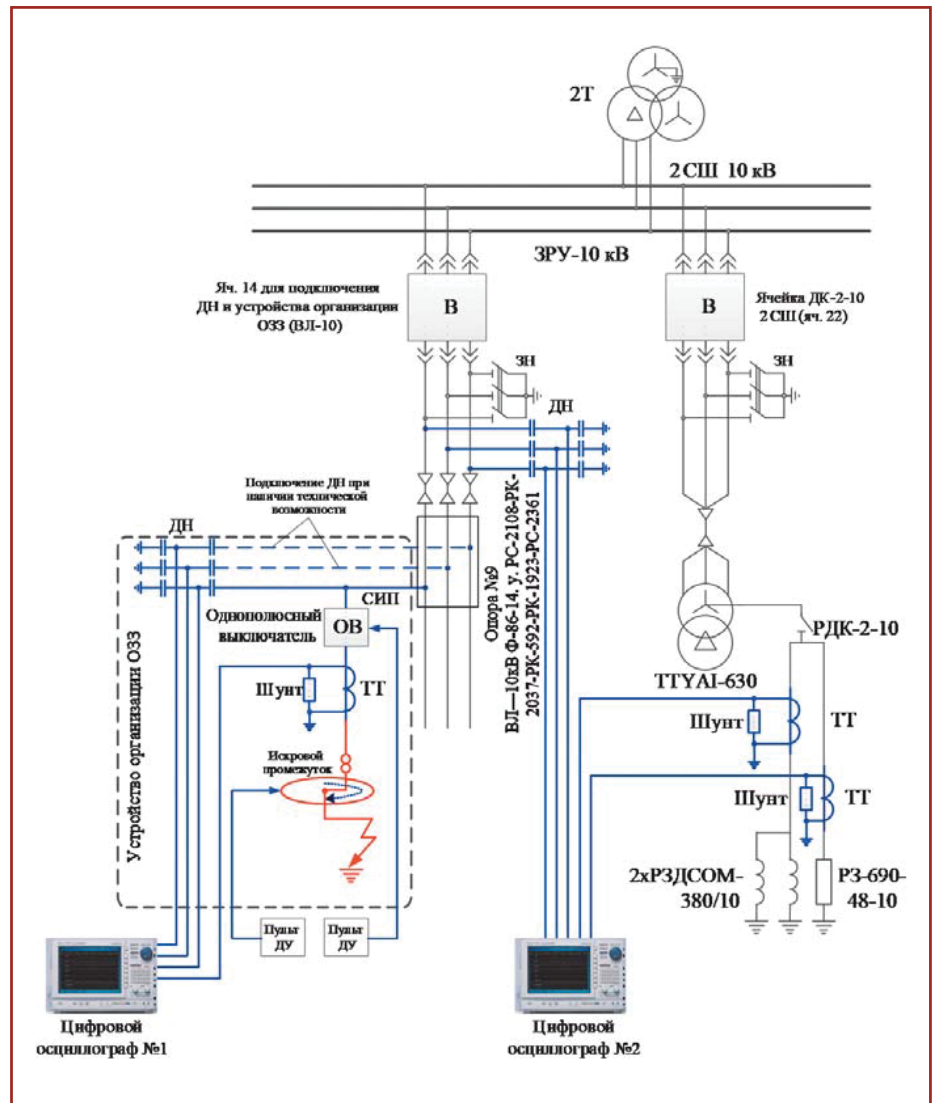


Рис. 4. Принципиальная схема подключения измерительной аппаратуры при проведении экспериментов



Рис. 5. Внешний вид устройства для организации и контроля параметров искусственного ОЗЗ с однополюсным вакуумным выключателем

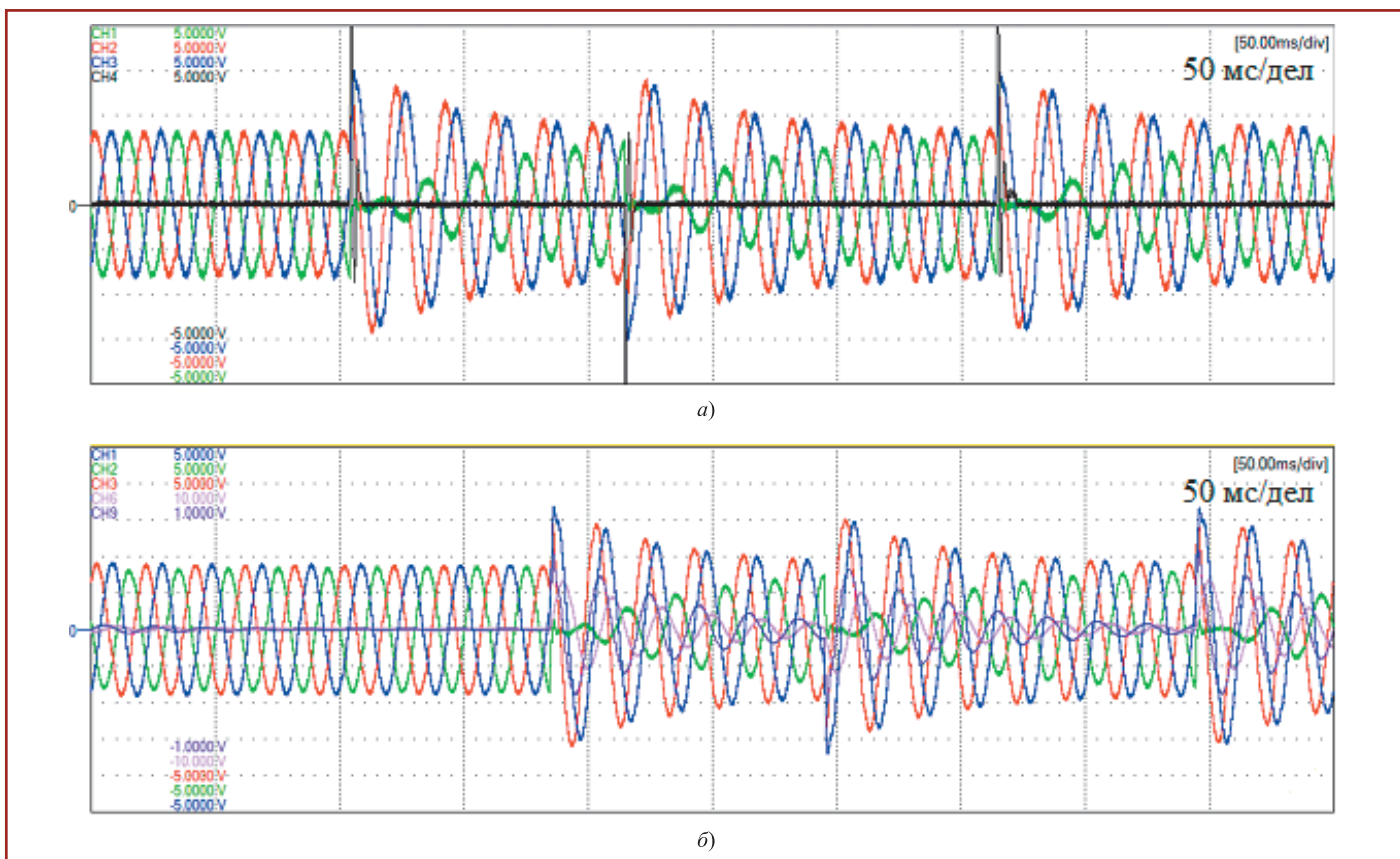


Рис. 6. Осциллограмма фазных напряжений и тока дугового ОЗЗ в сети 2-й секции шин ПС «Дёма» при включённом ДГР и резисторе: а — у опоры № 9 ВЛ-10 кВ Ф-86-14; б — на ПС «Дёма»; кривые синего цвета — напряжение фазы А; зелёного цвета — напряжение фазы В; красного — напряжение фазы С; розового — ток ДК1-2-10 и ДК2-2-10; фиолетового — ток Р3-2-10; чёрного — остаточный ток ОЗЗ.

ческих и дуговых ОЗЗ проводили при различных режимах заземления нейтрали — изолированной нейтралью с отключённым ДГР и резистором, с новым режимом заземления нейтрали при включённых резисторах параллельно ДГР и с существующим режимом заземления нейтрали через ступенчатые ДГР (при отключённом резисторе).

В момент проведения опытов схема сети отличалась от нормальной. Полученные в результате экспериментов осциллограммы обработаны с помощью специального программного обеспечения.

В результате проведения экспериментов получены следующие результаты:

- Несоответствие реальных измеренных токов ДГР 2-й секции шин их паспортным значениям. Ожидаемый суммарный ток от двух ДГР должен составить 97 А, а по факту соответствует 84,89 А.

- На момент измерения для текущего состояния сети 10 кВ 2-й секции шин ПС «Дёма» зафиксирована достаточно точная компенсация ёмкостного тока ОЗЗ — перекомпенсация в пределах 5 %.

- Расчётные и измеренные значения полного ёмкостного тока сети 10 кВ, питающейся с ПС «Дёма», отличаются

в связи с отклонением схемы исследуемой сети от нормальной эксплуатационной схемы и отсутствием исчерпывающей информации по участкам кабельных и воздушных линий разветвлённой сети потребителей.

- Длительность единичных пробоев при наличии в сети резисторов в абсолютном большинстве случаев заметно ниже (в 70 % случаев — менее 10 мс), чем в случае их отсутствия и заземления нейтрали только через ДГР. При

опытах в режиме заземления нейтрали через ДГР наблюдаются случаи относительно устойчивого горения дуги. При наличии резисторов происходит быстрое погасание дуги и восстановление напряжения повреждённой фазы до напряжения нормального режима.

- Скорость восстановления напряжения повреждённой фазы в бестоковые паузы при наличии резисторов определена в диапазоне от 67,2 до 115,5 кВ/с. При отсутствии резисторов



Рис. 7. Статистика повреждений КЛ





Рис. 8. Статистика повреждаемости КЛ сети, запитанной от ПС «Дёма», с 2014 г. по 15.03.2019 г.

скорость восстановления напряжения уменьшается относительно указанной в (2,1 – 3,1) раза.

• Уровень перенапряжений при дуговых ОЗЗ при наличии резисторов и ДГР (рис. 6) зафиксирован в диапазоне  $(1,76 \div 2,00)U_{Ф\max}$ , при отсутствии резисторов и включённых ДГР —  $(1,73 \div 2,03)U_{Ф\max}$ . Полученные невысокие кратности перенапряжений при дуговых ОЗЗ свидетельствуют о достаточной точной компенсации (0,7 ÷ 1,7 %) в момент проведения экспериментов.

#### Результаты эксплуатации резисторов

За период эксплуатации резисторов с 21.09.2018 г. по 15.03.2019 г. в сети 10 кВ, питающейся с ПС «Дёма», произошло 9 случаев повреждения КЛ при возникновении ОЗЗ (рис. 7). При этом полностью отсутствуют случаи повреждения двух или более КЛ при ОЗЗ на одной КЛ. Для сравнения за период с 21.09.2017 г. по 15.03.2018 г. произошло 12 случаев повреждения КЛ с ОЗЗ на одной КЛ, из них в четырёх случаях повреждались две или более КЛ.

Статистика повреждений КЛ в рассматриваемой сети 10 кВ за последние 5 лет указывает на снижение повреждаемости КЛ после установки высокоомного резистора параллельно ДГР (рис. 8).

Необходимо отметить, что подключение высокоомного резистора к нейтрали сети 6 – 10 кВ также должно положительно влиять на корректную работу устанавливаемых в последние годы индикаторов короткого замыкания (ИКЗ) с функцией определения ОЗЗ для выявления участков с замыканием на землю. Принцип определения ОЗЗ у разных производителей реализован по-разному [3]. ИКЗ одних производи-

телей в режиме определения ОЗЗ реагируют на установившийся ток замыкания, у других — на бросок тока нулевой последовательности в начальный период ОЗЗ и т. д. Уставки срабатывания для обнаружения ОЗЗ тоже разные — у одних ИКЗ уставка тока нулевой последовательности от 2 А и более, у других — 4 – 6 А и более. В последнее время начали появляться индикаторы, обладающие большей чувствительностью к низким токам нулевой последовательности, которые позволяют определять участки ЛЭП с замыканием на землю при токах ОЗЗ от 0,5 А. Соответственно, в сетях с малыми токами замыкания на землю или в сетях с резонансной компенсацией ёмкостного тока ИКЗ могут работать некорректно либо не работать. Устанавливая высокоомное заземление в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью и увеличивая ток нулевой последовательности в месте повреждения ориентировочно до 10 А, возможно повышение точности работы ИКЗ за счёт активного тока резистора, протекающего по повреждённой линии.

#### Выводы

На основании опыта реализации резистивного заземления нейтрали в сети 10 кВ, запитанной от ПС «Дёма», можно сделать следующие выводы:

1. В существующих сетях 6 – 10 кВ наиболее предпочтительным является высокоомное заземление нейтрали с ёмкостными токами, не превышающими нормативных значений, и комбинированный способ заземления нейтрали для сетей с ёмкостными токами, превышающими нормативные значения.

2. Экспериментальные результаты подтверждают существенное увеличе-

ние скорости восстановления напряжения повреждённой фазы до напряжения нормального режима и снижение длительности горения заземляющей дуги при включении резистора параллельно ДГР на ПС «Дёма».

3. Результат эксплуатации исследуемой сети после перехода на комбинированный режим нейтрали показывает снижение количества замыканий на землю и отсутствие случаев одновременного повреждения двух и более кабельных линий в сети при однофазных замыканиях на землю.

4. Подключение резисторов в нейтраль сети позволит улучшить работу индикаторов короткого замыкания для точного выявления участка сети с ОЗЗ даже при использовании индикаторов с порогом чувствительности единицы ампер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали / Л. И. Сарин, М. В. Ипных, А. И. Ширковец и др. // Энергоэксперт. 2008. № 1.
2. Комбинированное заземление нейтрали. Фактор повышения эксплуатационной надежности сетей 6 – 35 кВ / А. И. Ширковец, М. А. Козлачков, В. Н. Сазонов и др. // Новости электротехники. 2016. № 5 (101), № 6 (102).
3. Ахметов Р. Ф., Чекмарев А. А. Резистивное заземление нейтрали как эффективное средство повышения достоверности работы ИКЗ при ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ // Сб. докл. молодежной науч.-техн. конф. «VIII Слет молодых энергетиков Башкортостана» — Уфа: Информреклама, 2018. — 448 с.