



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ежемесячный производственно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНЭНЕРГО РОССИИ, ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕЭС»,
КОРПОРАЦИЯ «ЕДИНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС», НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,
НП «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ ЕЭС»

10 Октябрь
2023

Издается с августа 1944 года

Москва, НТФ «Энергопрогресс»

СОДЕРЖАНИЕ

Проекты и исследования

- Агабабов В. С., Филиппов В. А., Корягин А. В.**
Основы методики определения эффективности
технологии взаимовостребованных установок 2
- Шульган В. И., Гнатюк В. И., Харитонов М. С.,
Кивчун О. Р.** Исследование проблемы нечув-
ствительности защит к однофазным коротким
замыканиям в воздушных сетях наружного
освещения 10
- Лукин С. В., Шестаков Н. И., Сурикова А. Н.**
Определение технико-экономических парамет-
ров многоступенчатых блоков разделения неф-
тешламов 18

Качество электроэнергии

- Степанов О. А., Чекардовский М. Н., Хма-
ра Г. А., Махмутова В. Р.** Исследование
влияния накопителей электрической энергии
на параметры качества переходных процессов
в гибридных энергосистемах с ветроэлектриче-
скими установками 25
- Ширковец А. И.** Гармонические искажения сиг-
налов тока и напряжения при замыканиях на
землю в электрической сети 6 – 10 кВ 34
- Жуйков А. В., Фролов М. В., Матвеев Д. А.,
Никулов И. И.** О возможностях применения
трансформаторов напряжения для регистрации
переходных процессов и контроля качества
электроэнергии 45

DOI: 10.34831/EP.2023.50.44.005

Гармонические искажения сигналов тока и напряжения при замыканиях на землю в электрической сети 6 – 10 кВ

Ширковец А. И., канд. техн. наук
ООО «Болид», г. Новосибирск

Представлены результаты практических исследований содержания высших гармоник (ВГ) в аналоговых сигналах тока и напряжения, зарегистрированных в действующих электрических сетях среднего напряжения с помощью современных цифровых осциллографов в относительно широком частотном диапазоне. Показано, что сравнительный анализ наиболее выраженных гармоник в токе однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и фазных напряжениях достаточно хорошо отражает их связь между собой в одном и том же режиме. Это может служить прямым подтверждением влияния гармонического искажения питающего напряжения на переходные процессы в контуре нулевой последовательности (НП). Следовательно, существует опасность развития однофазного повреждения в многоместные и короткие замыкания (КЗ) из-за повышенного содержания ВГ в напряжении сети электроснабжения 6 – 35 кВ. Отмечено, что релейные защиты от замыканий на землю на ВГ, предназначенные преимущественно для сетей с компенсацией емкостного тока, рекомендуется применять совместно с защитами на других принципах. Для снижения негативных последствий от воздействия гармоник предусматривается ряд технических решений, каждое из которых, во-первых, по отдельности не является универсальным, а во-вторых, предназначено либо для борьбы с искажением питающего напряжения в нормальном режиме, либо для подавления крайне ограниченного ряда гармоник в токе замыкания при однофазном повреждении в сети, которое может существовать длительное время. Мероприятия по снижению длительности существования ОЗЗ до значений выдержек времени релейных защит, действующих на отключение участка сети с однофазным повреждением, закреплены в новых ПТЭ электрических станций и сетей. Эти мероприятия, помимо защиты от перенапряжений, также служат надежным вариантом минимизации риска от влияния высших гармоник.

Ключевые слова: высшие гармоники, электрическая сеть 6 – 10 кВ, ток гармонического искажения, однофазное замыкание на землю, цифровое осциллографирование, датчик тока, делитель напряжения, компенсация емкостного тока, режим заземления нейтрали, релейная защита, активная составляющая тока.

Постановка задачи

Негативные эффекты от высших гармоник (ВГ) в питающем напряжении связаны как с дополнительными потерями мощности в линиях, силовых трансформаторах и электродвигателях, так и с возможным нарушением нормального функционирования устройств защиты, технологической и режимной автоматики. Во многом это объясняется невыполнением нормативных требований по качеству электроэнергии [1]. Фазные напряжения искажаются при работе преобразовательных устройств, систем плавного пуска и частотного регулирования, дуговых сталеплавильных печей, прокатных станов, инверторных установок и другого технологического оборудования промышленных предприятий. Для городских распределительных сетей 6 – 10 кВ задача подавления гармоник и ограничения несинусоидальных режимов также актуальна ввиду

широкого применения светодиодного освещения с блоками стабилизации, выпрямительной техники в электротранспорте, накопителей электроэнергии с литий-ионными аккумуляторами.

Нарушение качества электроэнергии в части ВГ напряжения оценивается коэффициентами гармонических составляющих, которые регламентируются ГОСТ 32144–2013 [2, пп. 4.2. 4.1]. Для корректных заключений требуется выполнять анализ целого ряда показателей качества электроэнергии в течение одной недели на каждом участке электрической сети. Традиционными мерами подавления ВГ в питающем напряжении в штатных эксплуатационных режимах являются устройства компенсации реактивной мощности, узкополосные резонансные фильтры, настроенные обычно на подавление 5, 7, 11, 13, 23 и 25-й гармоник, фильтро-компенсирующие устройства, активные фильтры гармоник и их комбинации [3, 4].

Влияние ВГ в токе замыкания на землю на развитие переходного процесса и его последствия также, несомненно, носит отрицательный характер. Это связано с подтвержденным увеличением времени гашения заземляющей дуги, уровня перенапряжений и результирующего значения тока в точке повреждения. Ситуация осложняется практически полным отсутствием компенсирующих ВГ устройств, включенных в нейтраль сети, что повышает риск перекрытия (прожигания) междуфазной изоляции кабельных линий или витков в обмотке трансформатора остаточным током ОЗЗ. Последний содержит нескомпенсированный реактивный ток промышленной частоты, на который наложены гармонический ток искажения и активная составляющая. В силу объективных причин выделить фактор воздействия гармонического искажения тока ОЗЗ и фазных напряжений (как одну из причин труднообъяснимых отказов оборудования) не представляется возможным. Для этого придется пренебречь накопительным эффектом целого ряда условий: естественного снижения электрической прочности из-за старения изоляции, влияния коммутационных и дуговых перенапряжений, электродинамических усилий и тепловых воздействий при коротких замыканиях в сети. Уровни ВГ в токе ОЗЗ изучаются давно [5], однако для практических целей зачастую приходится использовать их расчетные значения, что может приводить к ошибкам в силу ограничений любой компьютерной модели и сложности точного учета всех влияющих факторов. К последним можно отнести параметры кривой намагничивания трансформаторов напряжения, характеристики и режимы работы сложной преобразовательной техники, электропечных трансформаторов, устройств плавного пуска, частотно-регулируемых приводов и пр.

В связи с этим актуальной задачей является количественная оценка гармонических искажений тока замыкания в действующих электрических сетях 6 – 10 кВ на основе экспериментальных измерений [6]. Отметим, что суб- и интергармоники, также наличествующие в сигналах тока и напряжения, но не кратные 50 Гц, в рамках настоящей статьи не рассматриваются.

Количественная оценка параметров высших гармоник

Исходя из факта гармонического искажения тока ОЗЗ, необходимо выделять в полном

сигнале гармоники 50 Гц и вычислять их значения. В противном случае действующее значение сигнала будет рассчитано с учетом шумовых компонентов непромышленной частоты и не позволит достоверно определить емкостный ток и ток ДГР первой гармоники, что является основной задачей натуральных измерений [7, пп. 571, 621]. Для электрических сетей различного напряжения уровни ВГ в токе замыкания могут существенно различаться, но в целом их содержание не регламентируется.

В ряде случаев токи гармонического искажения могут составлять весьма значительную долю от тока замыкания промышленной частоты. Например, при изолированной нейтрали для секций КРУ-6 кВ ТЭЦ при емкостном токе 50 Гц на каждой секции 18,6 А гармонический ток искажения практически достигал половины этого значения (8,9 – 9,1 А), а наиболее выраженные гармоники, включая четные 28-ю, 30, 32, 34 и 36-ю, находились в диапазоне 1400 – 1850 Гц. Этот случай не является типовым и проиллюстрирован на рис. 1. Объяснить содержание нехарактерных ВГ в токе (рис. 2) можно наличием большого количества асинхронных приводных электродвигателей мощностью до 1600 кВт в сети собственных нужд станции, что приводит к искажению синусоидальной формы кривой тока в контуре нулевой последовательности (КНП) за счет вращающихся роторов электрических машин.

Выраженное гармоническое искажение тока ОЗЗ в схемах 6 – 10 кВ ТЭЦ — это тривиальное явление, связанное как с составом силового оборудования самой станции, включая специфические схемы заземления нейтрали с несколькими включенными параллельно ДГР (в ряде случаев с силовыми устройствами наложения тока 25 Гц), так и с разнообразием питаемой нагрузки (городские сети с бытовыми потребителями, промышленные сети с инверторами, технологическими электроприводами, частотными преобразователями и пр.).

В опытах искусственного ОЗЗ, проводимых по предписанию Ростехнадзора, в сети ГРУ-6 кВ электростанции был измерен полный емкостный ток промышленной частоты. Действующее значение первой гармоники этого тока составило 102,1 А. При этом выявлено, что остаточный емкостный ток промышленной частоты при включенных ступенчатых ДГР составляет 14 А, а 2-я и 7-я гармоники в нем — 4,2 А и 6 А соответственно. Очевидно, что расстройка компенсации примерно в 3 раза

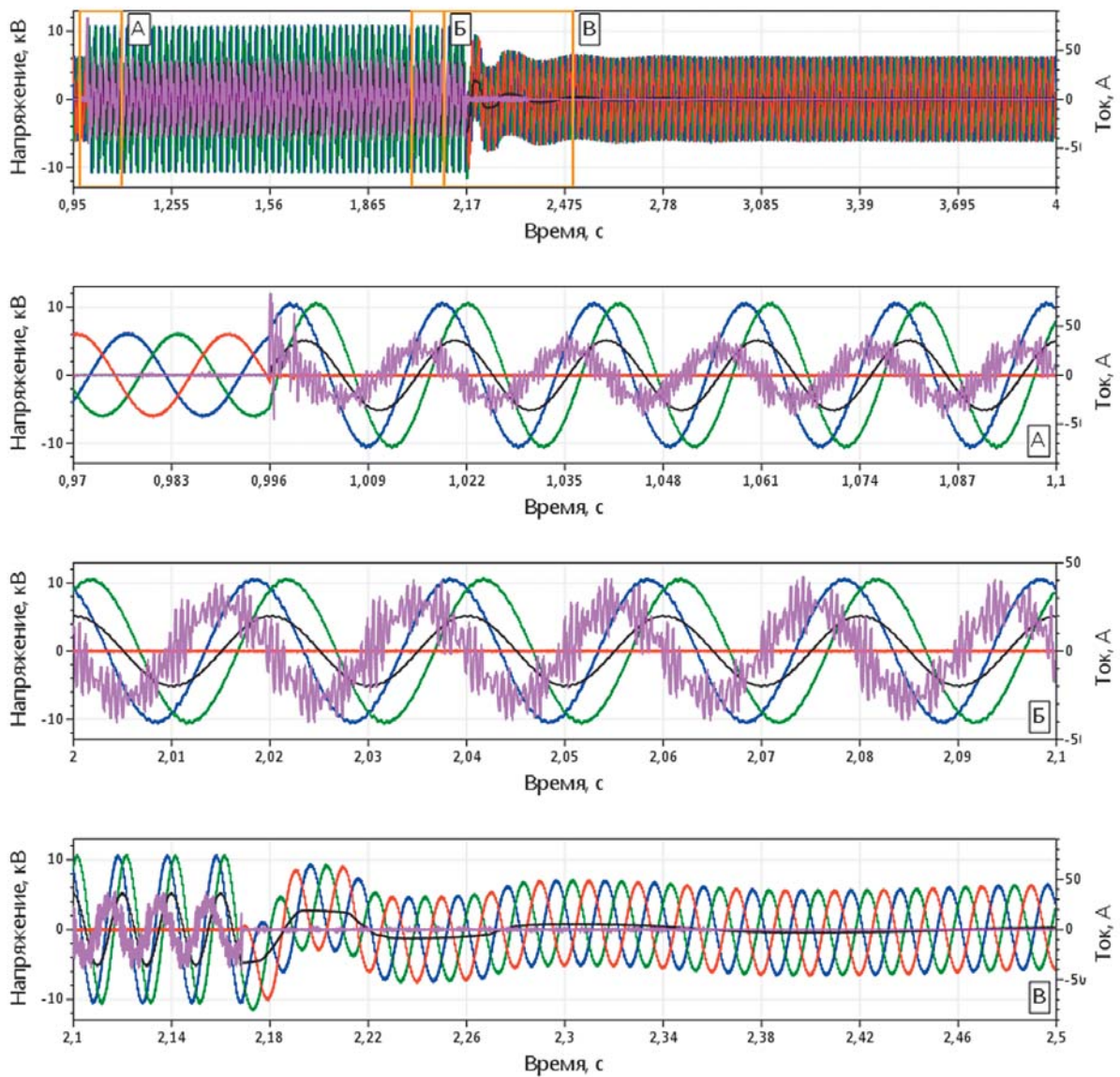


Рис. 1. Натурные осциллограммы тока ОЗЗ (сиреневый цвет) и фазных напряжений (синий — напряжение фазы *A*, зеленый — напряжение фазы *B*, красный — напряжение фазы *C*), а также напряжения на нейтрали (черный цвет) в процессе искусственного замыкания на КРУ-6 кВ ТЭЦ

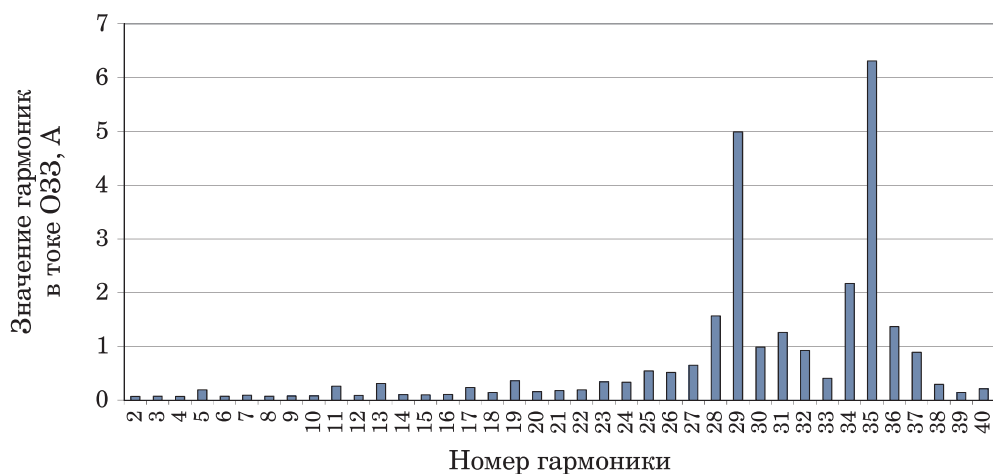


Рис. 2. Гистограмма гармонического состава тока замыкания КРУ-6 кВ ТЭЦ

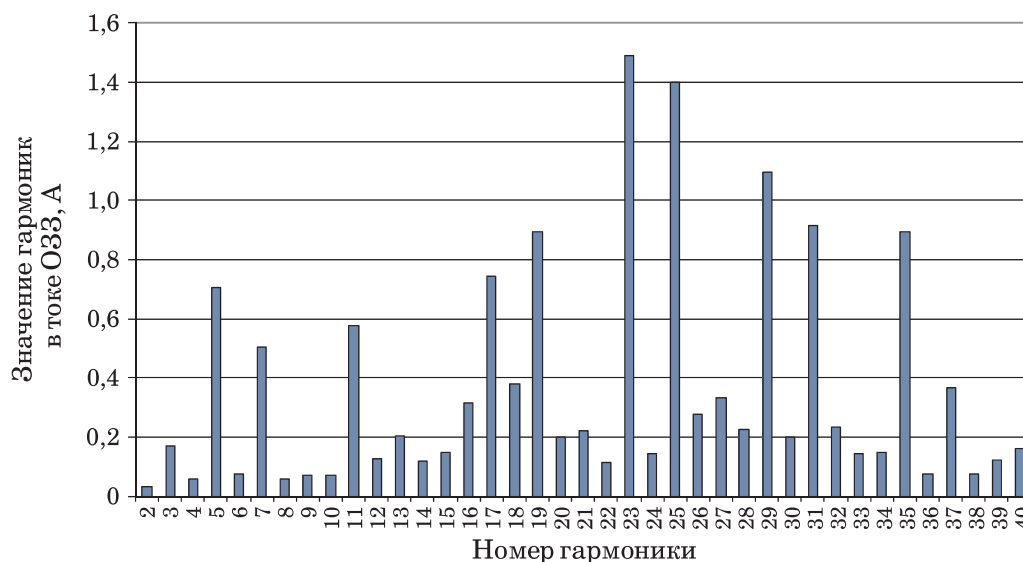


Рис. 3. Гармонический состав остаточного тока O33 при работе системы компенсации, настроенной на основную гармонику, в сети 10 кВ металлургического предприятия

превышает нормированное в ПТЭ электрических станций и сетей РФ значение 5 % [7, п. 623]. Также показано, что в этой сети ток гармонического искажения составляет примерно 70 % от остаточного тока O33 в месте повреждения.

Еще более показателен другой пример. При обследовании сети ГРУ-6 кВ (4 секции объединены, полный емкостный ток — 273 А, компенсация выполнена с помощью ступенчатых реакторов) другой ТЭЦ было зафиксировано следующее: в одном из экспериментов при «металлическом» O33 ток 11-й гармоники составил 79,2 А и превысил некомпенсированный ток основной гармоники в 2,6 раза. Такое усиление 11-й гармоники тока могло быть вызвано либо резонансом в контуре нулевой последовательности (НП) на частоте из диапазона 500 – 600 Гц, либо влиянием работы 12-пульсного выпрямителя в составе высоковольтной нагрузки химического предприятия группы «Азот».

Поскольку токи ВГ не компенсируются с помощью ДГР традиционной конструкции, в ряде случаев из-за специфической нагрузки предприятия токи ВГ могуткратно превышать остаточный ток замыкания промышленной частоты. Например, в сети 10 кВ сортопрокатного цеха металлургического комбината при работе ДГР был зарегистрирован ток 50 Гц в месте замыкания всего 0,85 А (полный емкостный ток сети, измеренный в предшествующем опыте, равен 21,8 А), а вот гармонический ток искажения, практически не отличающийся

составом и амплитудой разных гармоник при включенном и отключенном ДГР, составил в серии экспериментов 3,0 – 3,8 А (рис. 3). При этом ток искажения самого реактора гармониками не превышает 0,2 А, что свидетельствует о линейности вольт-амперной характеристике ДГР. С другой стороны, при таких уровнях ВГ говорить об удовлетворительной компенсации емкостного тока и эффективном гашении заземляющей дуги в таких условиях, разумеется, невозможно.

Результаты натурных измерений электромагнитных процессов при замыканиях на землю в **городских электрических сетях** (таблица), имеющих на балансе сопоставимое, если судить по протяженности трасс, количество кабельных и воздушных линий 6 – 10 кВ, подтвердили общее правило: наиболее выраженные ВГ в токе O33 — это 5, 7, 11, 13, а гармонический ток искажения может в среднем составлять 30 – 40% от составляющей промышленной частоты.

Натурные осциллограммы электромагнитного процесса замыкания на землю для визуализации опытов O33 на 2С-10 кВ ПС № 1 показаны на рис. 4.

Следует подчеркнуть, что подавление ВГ в токе замыкания на землю актуально с позиции электробезопасности, особенно для воздушных и смешанных сетей. Это связано с тем, что гармонические искажения приводят к увеличению действующего значения тока в месте однофазного замыкания (действующее значение гармонического тока искажения мо-

Измеренные значения тока ОЗЗ и гармонические токи искажения для двух электросетевых городских ПС 110/10 кВ, нейтраль сети изолирована

Участок сети	Промышленная составляющая тока ОЗЗ, А	Суммарное содержание гармоник тока ОЗЗ (со 2-й по 40-ю)	
		А	% от тока 1-й гармоники
<i>ПС № 1</i>			
Секция 1С-10	13,0	3,71	28,50
Секция 2С-10	77,48	26,14	33,73
Секция 3С-10	78,52	26,88	34,35
Секция 4С-10	13,85	4,10	29,60
<i>ПС № 2</i>			
Секция 1С-10	36,07	12,73	35,3
Секция 2С-10	21,15	6,25	29,54
Секция 3С-10	20,97	6,57	31,35
Секция 4С-10	40,49	16,53	40,84

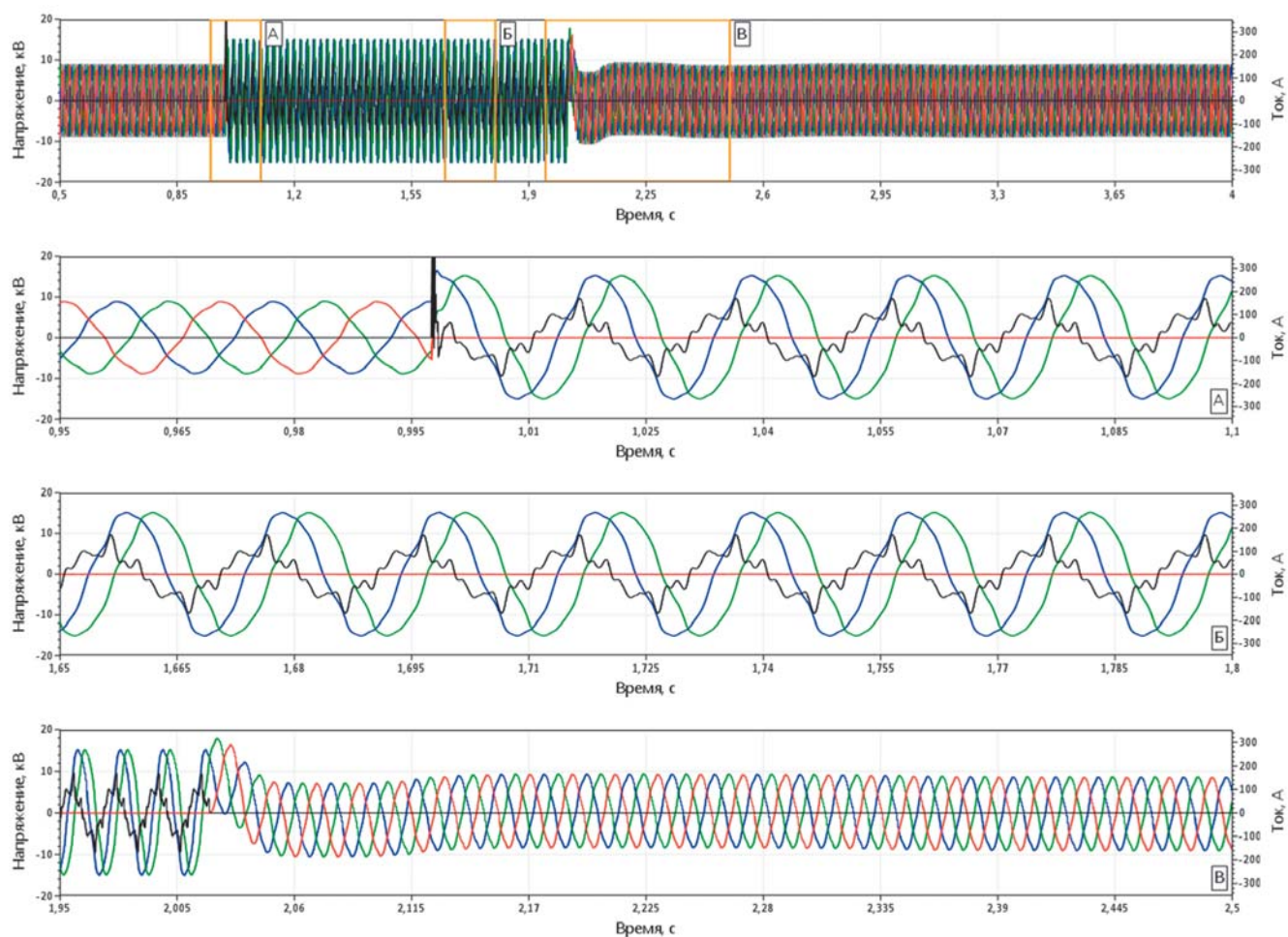


Рис. 4. Натурные осциллограммы фазных напряжений и тока замыкания на землю в сети 10 кВ городской ПС 110/10 кВ: емкостный ток 50 Гц составляет 77,5 А, ток гармонического искажения — 26,1 А

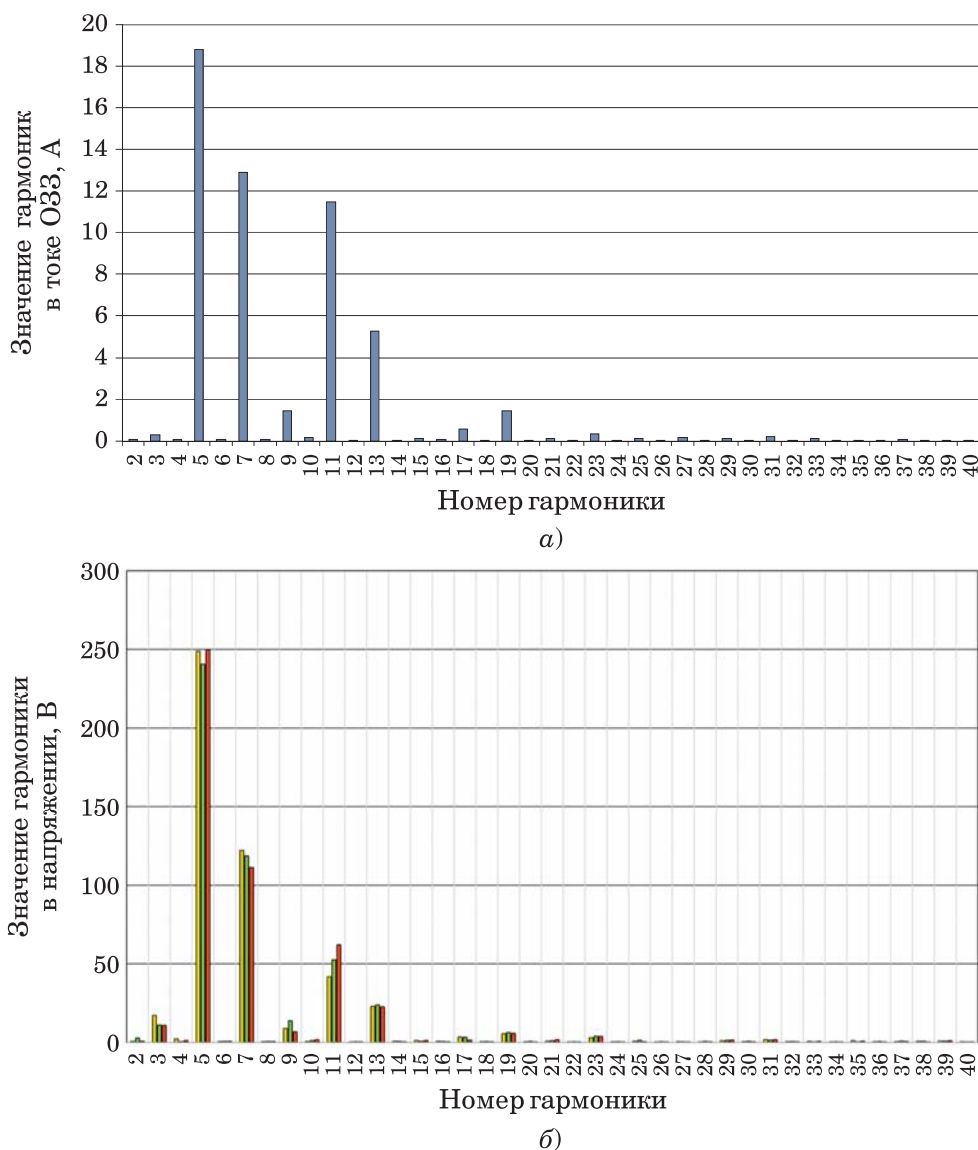


Рис. 5. Действующие значения гармоник тока ОЗЗ (а) и фазных напряжений (б) для ряда гармоник 2 – 40 при ОЗЗ

жет быть сопоставимо с составляющей 50 Гц даже при соблюдении нормативной расстройки компенсации). Это значит, что повышается опасность для человека при попадании его под шаговое напряжение, например вблизи обрыва провода ВЛ.

Выполненные для ряда городских распределительных сетей исследования позволяют отметить, что наиболее заметным в фазных напряжениях на всех секциях шин является практически тот же набор гармоник, что и для тока ОЗЗ (чаще это нечетный ряд 5, 7, 11, 13), но в напряжении обычно присутствует еще и 3-я гармоника, вызванная влиянием на процессы в цепи замыкания на землю заземленных магнитопробов силовых трансформаторов.

На рис. 5 приведены спектрограммы ВГ фазных напряжений со стандартной цветовой индикацией желтый–зеленый–красный для фаз А – В – С, а также тока замыкания на землю в сети той же 2С-10 кВ ПС № 1 для сопоставления состава гармоник в сигналах тока и напряжения. Можно показать, что в соответствии с законом Ома для комплексных сопротивлений контура НП и на высших гармониках жесткая связь гармонического искажения фазных напряжения и тока ОЗЗ прослеживается и для других распределительных сетей 6 – 10 кВ.

Максимальное значение в напряжении имеет 5-я гармоника, достигающая 240 – 260 В, т.е. около 4 % от значения гармоники 50 Гц $I_C = 77,5$ А, а суммарное искажение составляет

4,3 – 4,8 % от напряжения промышленной частоты $U_{\Phi} = 5700$ В. Суммарное содержание гармоник в фазных напряжениях составляет 4,4 – 4,7 % от основной гармоники.

Таким образом, при замыкании на землю в частотном спектре сигнала тока всегда наблюдаются высшие гармоники, но их уровень и фазовые характеристики различаются преимущественно в зависимости от мощности и степени нелинейности трансформаторной, выпрямительной и двигательной нагрузки (с учетом искажения от систем ее управления, если говорить о технологическом приводе).

Если анализировать только составляющие, кратные 50 Гц, то чаще других выражены гармоники № 5, 7, 11, 13. В зависимости от назначения электрической сети в токе ОЗЗ фиксируются гармоники с другими порядковыми номерами, например для сетей собственных нужд электростанций это № 35, 37, 39, 43, 45, 47. В сетях, питающих промышленные предприятия, не исключено появление заметных в общем сигнале гармоник четного ряда, включая достаточно нехарактерные № 2, 26, 28, 30, 32.

Анализ результатов многочисленных натурных измерений сигналов тока ОЗЗ и фазных напряжений свидетельствует, что фазные напряжения нормального режима содержат в основном те же гармоники, что и ток ОЗЗ. Но если доля ВГ в токе замыкания на землю может быть сопоставима с уровнем первой гармоники, а для режимов с компенсацией емкостного тока – кратно превышать остаточный ток частотой 50 Гц, то для напряжения фаз речь идет о малых амплитудах ВГ, которые в относительных значениях составляют не более 5 %.

Релейная защита от замыканий на землю на высших гармониках

Технические аспекты использования ВГ в токах НП для релейной защиты достаточно подробно изложены в [8, 9]. Различают токовые защиты, использующие амплитудные характеристики ВГ, на основе абсолютного и относительного замеров. В настоящее время наиболее распространенными являются централизованные защиты от ОЗЗ, действующие на основе сопоставления суммарного тока гармонического искажения в разных присоединениях. К ним можно отнести разработки предприятий «Радиус-Автоматика» (Сириус-ОЗЗ), «ЧЭАЗ» (УСЗ-3 и УСЗ-3М), «Микропроцессор-

ные технологии» (ГЕУМ), «НПП «Бреслер» (Бреслер-0107.080), «НПП ЭСТРА» (МКЗП-6-35-К) и некоторые другие. Поскольку датчиком тока $3I_0$ является кабельный трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), угловая и амплитудная погрешности которого не нормируются, для корректной работы таких защит рекомендуется как минимум использовать неразъемные датчики. Важно отметить, что промышленностью налажен выпуск ТТНП, которые включены в реестр средств измерения и имеют классы точности 5Р, 10Р [10].

Следует признать, что если превалирующие в токе искажения гармоники можно условно классифицировать, выделив характерные частоты для электросетевых подстанций, схем ГРУ и РУСН, то действующие значения отдельных гармоник и результирующий ток искажения являются нестабильными величинами, которые затруднительно оценить расчетным путем. Отдельные способы оценки ВГ в токе ОЗЗ на основе имитационного моделирования, ограниченные, правда, областью применения (кабельные сети с компенсацией емкостного тока), предлагаются в работах ИГЭУ [11].

Следовательно, при построении централизованных защит, основанных исключительно на принципе контроля ВГ, возникают объективные сложности, ввиду чего метод не является универсальным для сетей различного назначения. Некоторые устройства защиты от ОЗЗ позволяют задать весовые коэффициенты для каждой из гармонических составляющих с целью оптимальной отстройки от ложных срабатываний, но из-за «плавающего» уровня ВГ это тоже не дает гарантии их селективного действия.

Справедливости ради следует отметить, что уровень ВГ в токе поврежденного фидера всегда превышает гармонические токи НП в неповрежденных фидерах и поэтому для электрических сетей с явно выраженными гармониками сравнительный анализ тока гармонического искажения представляется достаточно надежным способом выявления присоединения с однофазным замыканием. Оптимально такие защиты следует применять в сетях промышленных предприятий, где ток в КНП искажен за счет особенностей технологической нагрузки, однако они могут оказаться неселективными в распределительных сетях с изолированной нейтралью. Поэтому производители микропроцессорной релейной защи-

ты, как правило, включают в состав терминалов РЗА присоединений функцию защиты на ВГ наряду с защитами, реализующими иные принципы выявления ОЗЗ (на основе сравнения полярностей первых полуволн $3I_0$ и $3U_0$ в переходном процессе, анализа значения первой гармоники $3I_0$, контроля угла между $3I_0$ и $3U_0$ и др.).

Следует подчеркнуть, что перечень нормативно закрепленных в настоящее время режимов заземления нейтрали электрических сетей 6 – 35 кВ в России расширен за счет высокоомного и низкоомного резистивного заземления [7, пп. 619, 621]. При этом последний вариант предусматривает необходимость селективного отключения ОЗЗ с минимальными выдержками времени в ориентировочном диапазоне 0,1 – 3,0 с. Этот же способ действия релейной защиты в сети с изолированной нейтралью указан в [7, п. 620]. Очевидно, речь идет не только о сбережении ресурса изоляции и оборудования в целом за счет быстрой «ликвидации нарушений нормального режима», но и об обеспечении более высокого уровня электробезопасности. Организация быстродействующих защит на участках распределительной сети является одним из эффективных мероприятий сокращения времени ОЗЗ и снижения негативного влияния гармонического искажения тока и напряжения как на срок службы, так и на рабочие параметры эксплуатируемого оборудования.

Разработки устройств компенсации емкостного тока с учетом высших гармоник

Гармоническое искажение тока замыкания зависит от множества переменных факторов (режим и оборудование заземления нейтрали, количество и параметры силовых и измерительных трансформаторов, вид, мощность и режимы работы нелинейной нагрузки и т.д.) и поэтому содержание гармоник в токе ОЗЗ не нормируется. ВГ в токе замыкания на землю негативно влияют на процесс горения заземляющей дуги в циклах ее зажигания и погасания, поскольку стимулируют развитие канала пробоя, препятствуют гашению дуги и тем самым в значительной мере нивелируют эффект компенсации емкостного тока [12]. Это связано с тем, что ВГ в токе ОЗЗ, как правило, не компенсируются дугогасящими реакторами (ДГР) за исключением опциональных решений по инверторному подавлению гармоник 3,

5, 7 в статических аппаратах с конденсаторным управлением [13, 14].

Работа статических реакторов при настройке в режим компенсации характеризуется процессом заряда и разряда конденсаторов с трансформацией их емкостного тока через магнитную связь в первичную силовую обмотку ДГР. При этом ток в емкости (конденсаторах управления) в отличие от индуктивности (плунжерный ДГР) изменяется скачком. Следовательно, объективным недостатком любых статических аппаратов с конденсаторами являются броски тока в начальный период ОЗЗ при каждом из последовательных пробоев из-за заряда подключенных к вторичной обмотке конденсаторов. За счет бросков тока происходит увеличение времени горения заземляющей дуги (в ряде случаев до нескольких периодов промышленной частоты), что существенно снижает эффективность дугогашения. Эффект «затягивания» процесса дугогашения из-за подпитки током конденсаторов во вторичной обмотке был зарегистрирован в эксплуатируемых сетях 10 кВ со статическими реакторами российского производства [15].

Достижения силовой электроники и микропроцессорной техники позволяют создавать и налаживать системы компенсации емкостного тока с учетом необходимости подавления не только емкостного тока промышленной частоты, но и активного тока и ряда ВГ гармоник в нем [16]. Но это решение требует особого подхода. Функция ликвидации активной составляющей тока ОЗЗ с помощью статических реакторов — это дискуссионный вопрос:

во-первых, возникает проблема определения поврежденного фидера релейными защитами, поскольку существующие алгоритмы неработоспособны при малых и сверхмалых значениях остаточного тока в месте повреждения;

во-вторых, ликвидация активной составляющей, обусловленной активной проводимостью эквивалентной сети и играющей стабилизирующую роль в переходных режимах, в принципе нецелесообразна, так как приводит к снижению демпфирования свободных колебаний. Согласно [17] при отсутствии активных потерь система длительно сохраняет потенциалы, соответствующие моментам погасания заземляющей дуги. Более того, перекомпенсация активной составляющей приведет к отрицательному демпфированию и росту напряжения смещения нейтрали, а значит, к увеличению перенапряжений — до момента огра-

ничения амплитуды колебаний за счет насыщения стали ДГР.

Для создания эффективной системы подавления искажений нужны индивидуальные решения: следует точно знать, какие именно гармоники в токе ОЗЗ преобладают в данной сети, каковы их амплитудные и частотные характеристики. Наилучшим способом прогнозирования ВГ и подбора характеристик инверторов в системе компенсации тока замыкания на землю, несомненно, является обследование сети с цифровым осциллографированием сигналов тока ОЗЗ, тока ДГР, напряжения на нейтрали и фазных напряжений сети с помощью датчиков, позволяющих записывать сигналы тока и напряжения в широком диапазоне частот: по току — не менее, чем от 50 Гц до 5 кГц, по напряжению — от 50 Гц до 500 кГц.

Также важным вопросом является в принципе необходимость удержания ОЗЗ и компенсации емкостного тока в некоторых сетях. Например, исследования более, чем на 15 участках сетей электроснабжения 10 кВ крупного металлургического завода показали, что практически во всех режимах эксплуатации в токе ОЗЗ проявляется широкий спектр гармоник № 7, 15, 17, 19, 25, 35, 37, действующие значения которых составляют единицы и десятки ампер. Доля максимально заметных 19-й и 25-й гармоник — 8 – 25 % от основной гармоники 50 Гц (до 25 А), а эквивалентный гармонический ток искажения — от 1,5 А до 25,6 А. Очевидно, решение по компенсации гармонических составляющих тока ОЗЗ, штатно предусматривающее подавление гармоник частотой не выше 350 Гц, в этой сети не станет средством для снижения аварийности. В этом случае проработка схем резервирования (АВР и БАВР) с автоматическим селективным отключением участка с ОЗЗ на основе резистивного заземления нейтрали позволит обеспечить эффективную защиту электрооборудования — в первую очередь благодаря кардинальному сокращению времени существования однофазного повреждения.

Обоснованность применения известных способов фильтрации гармоник в питающем напряжении для выполнения норм ГОСТ 32144–2013 [2] не подвергается сомнению. Однако высокое количество замыканий на землю (в среднем 70 – 80 %) среди всех видов повреждений позволяет констатировать, что правильный выбор режима нейтрали сети актуален

для электрической сети с любым уровнем гармонических искажений напряжения и тока.

Выводы

1. Регистрируемый методами цифрового осциллографирования ток ОЗЗ всегда содержит высшие гармоники, частота и уровень которых определяются мощностью и первичными параметрами нелинейной нагрузки, насыщением стали и физическим состоянием заземленных магнитопроводов силовых и измерительных трансформаторов, а также (в меньшей степени) наличием, видом и характеристиками устройств компенсации емкостного тока в нейтрали сети (особенно при наличии блоков наложения тока частотой 25 Гц в контур нулевой последовательности).

2. Минимизация гармоник позволит снизить потери мощности и уменьшить риски ложной работы технологической автоматики, релейной защиты и микропроцессорных систем управления. Решение этого вопроса, с одной стороны, лежит в области выполнения действующих нормативов по качеству электроэнергии (коэффициенты несинусоидальности и гармонических составляющих), с другой — в ограничении уровня ВГ с помощью специализированного оборудования, включая фильтрацию гармоник питающего напряжения в штатных режимах и гармоник тока ОЗЗ в переходных режимах.

3. Результаты осциллографических измерений для разных участков электрической сети позволят, помимо верификации компьютерных моделей, более точно прогнозировать уровни и частоты наиболее выраженных гармоник и за счет оптимизации режима нейтрали (в том числе решений по компенсации ВГ) снижать риски перехода однофазных в междуфазные и многоместные повреждения, обеспечивая требуемый уровень эксплуатационной надежности.

4. Условия эффективной компенсации ВГ в токе ОЗЗ ввиду зависимости уровня гармоник и диапазонов частот от ряда переменных факторов требуют глубокой проработки. Мощность, алгоритм и настройки системы управления инверторами, которые будут использоваться для подавления ВГ тока в составе дугогасящих реакторов нового типа, рекомендуется выбирать для конкретной сети по результатам ее инструментального обследования.

5. Универсального решения по ликвидации ВГ в токах и напряжениях при замыкании на землю пока не найдено, но справедливым представляется следующее заключение: оптимальные для каждой сети способы аппаратной «реакции» на гармонические искажения должны быть подобраны индивидуально.

6. Надежным вариантом, отвечающим условию снижения количества и длительности перерывов электроснабжения потребителей, количественно определяемых индексами SAIDI и SAIFI — всюду, где это возможно, является переход от принципа удержания к быстрому отключению ОЗЗ. Это потребует внедрения решений по автоматической локализации участка с однофазным повреждением, разработки схем АВР и БАВР на секциях с электроприводами.

Список литературы

1. Вагин, Г. Я. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля / Г. Я. Вагин, А. Л. Куликов // Электрические станции. — 2019. — № 6 (1055) — С. 54 – 59.
2. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Данник, Т. А. Эффективность различных мероприятий по повышению качества электрической энергии / Т. А. Данник, В. А. Дубровская // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2022. — № S1 (24). — С. 42 – 48.
4. Замула, К. В. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии / К. В. Замула, Ю. В. Соколов, А. В. Карманов // Энергия единой сети. — 2018. — № 2 (37). — С. 22 – 32.
5. Вайнштейн, В. Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю / В. Л. Вайнштейн // Промышленная энергетика. — 1986. — № 1. — С. 39 – 40.
6. Валов, В. Н. Определение тока однофазного замыкания на землю на основе натурального эксперимента с осциллографированием / В. Н. Валов, А. И. Ширковец, М. В. Ильиных и др. // Релейная защита и автоматизация. — 2021. — № 3(44). — С. 104 – 113.
7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утв. Приказом Минэнерго России от 04.10.2022 № 1070, введены в действие с 06.03.2023 г.
8. Кискачи, В. М. Устройства сигнализации замыканий на землю // В. М. Кискачи, С. Е. Сурцева, Н. М. Горшенина, Б. И. Панфилов // Электрические станции. — 1972. — № 4. — С. 69 – 72.
9. Шуин, В. А. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших

гармоник для компенсированных кабельных сетей 6 – 10 кВ / В. А. Шуин, В. Л. Мартынов, Е. С. Шагурина, Т. Ю. Шадрикова // Электротехника. — 2018. — № 1. — С. 62 – 72.

10. Трансформаторы тока ТЗРЛ. Руководство по эксплуатации ИГ.766.014 РЭ. ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.cztt.ru/catalog/transformatory-toka/transformatory-toka-vnutrenney-ustanovki/nizkovoltnye/tzrl-dlya-zashchity>.
11. Тютиков, В. В. Условия полной компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор / В. В. Тютиков, Ю. Д. Кутумов, Т. Ю. Шадрикова, В. А. Шуин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2022. — № 5. — С. 24 – 32.
12. Шуин, В. А. Влияние высших гармоник на переходные процессы при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью / В. А. Шуин, О. А. Добрягина, Ю. Д. Кутумов, Т. Ю. Шадрикова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2020. — № 2. — С. 30 – 40.
13. Winter, Klaus. The RCC (Residual Current Compensation) Ground Fault Neutralizer — a Novel Scheme for Fast Earth-Fault Protection / Klaus Winter // In Proc. 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Turin, Italy, June 6 – 9, 2005.
14. Бульчев, А. В. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6 – 10 кВ / А. В. Бульчев, Ю. А. Дементий, В. Н. Козлов // Вестник Чувашского государственного университета. — 2018. — № 1. — С. 24 – 35.
15. Брыкин, В. П. Системы компенсации емкостного тока замыкания на землю. Соответствие требованиям нормативных документов / В. П. Брыкин, Н. В. Дроздов, Ю. Г. Корчмарик // Новости ЭлектроТехники. — 2018. — № 4(112). — С. 38 – 41.
16. Кутумов, Ю. Д. Повышение эффективности компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ в условиях влияния на ток повреждения высших гармонических составляющих. Дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. — Иваново, ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2022.
17. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. / Пер. с англ. под ред. Д. В. Разевига. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 414 с.

References

1. Vagin G. Ya., Kulikov A. L. *Elektricheskie stantsii* (Electrical stations), 2019, No. 6 (1055), pp. 54 – 59.
2. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* (State Standard 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment).

- Power quality limits in the public power supply systems).
3. **Dannik T. A., Dubrovskaya V. A.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* (Electricity. Transmission and Distribution), 2022, No. S1 (24), pp. 42 – 48.
 4. **Zamula K. V., Sokolov Yu. V., Karmanov A. V.** *Energiya edinoi seti* (Energy of Unified Grid), 2018, No. 2 (37), pp. 22 – 32.
 5. **Weinstein V. L.** *Promyshlennaya energetika* (Industrial power engineering), 1986, No. 1, pp. 39 – 40.
 6. **Valov V. N., Shirkovets A. I., Ilyinykh M. V.** *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* (Relay Protection and Automation), 2021, No. 3(44), pp. 104 – 113.
 7. **Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei Rossiiskoi Federatsii** (Rules for the technical operation of power plants and networks of the Russian Federation), approved By Order of the Ministry of Energy of Russia dated October 4, 2022, No. 1070, put into effect from March 6, 2023.
 8. **Kiskachi V. M., Surtseva S. E., Gorshenina N. M., Panfilov B. I.** *Elektricheskie stantsii* (Electrical stations), 1972, No. 4, pp. 69 – 72.
 9. **Shuin V. A., Martynov V. L., Shagurina E. S., Shadrikova T. Yu.** *Elektrotehnika* (Electrical engineering), 2018, No. 1, pp. 62 – 72.
 10. **Transformatory toka TZRL. Rukovodstvo po ekspluatatsii 1GG.766.014 RE. OAO «Sverdlovskii zavod transformatorov toka»** (Current transformers TZRL. Operating manual 1GG.766.014 RE. OJSC Sverdlovsk Current Transformer Plant), [Electronic resource]. — URL: <https://www.cztz.ru/catalog/transformatory-toka/transformatory-toka-vnutrenney-ustanovki/nizkovoltnye/tzrl-dlya-zashchity>.
 11. **Tyutikov V. V., Kutumov Yu. D., Shadrikova T. Yu., Shuin V. A.** *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University), 2022, No. 5, pp. 24 – 32.
 12. **Shuin V. A., Dobryagina O. A., Kutumov Yu. D., Shadrikova T. Yu.** *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University), 2020, No. 2, pp. 30 – 40.
 13. **Winter Klaus.** The RCC (Residual Current Compensation) Ground Fault Neutralizer — a Novel Scheme for Fast Earth-Fault Protection, In Proc. 18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Turin, Italy, June 6 – 9, 2005.
 14. **Bulychev A. V., Demytyu Yu. A., Kozlov V. N.** *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Chuvash University), 2018, No. 1, pp. 24 – 35.
 15. **Brykin V. P., Drozdov N. V., Korchmarik Yu. G.** *Sistemy kompensatsii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu. Sootvetstvie trebovaniyam normativnykh dokumentov* (Capacitive ground fault current compensation systems. Compliance with the requirements of regulatory documents), *Electrical Engineering News*, 2018, No. 4 (112), pp. 38 – 41.
 16. **Kutumov Yu. D.** *Povyshenie effektivnosti kompensatsii tokov odnofaznogo zamykaniya na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6 – 10 kV v usloviyakh vliyaniya na tok povrezhdeniya vysshikh garmonicheskikh sostavlyayushchikh* (Increasing the efficiency of compensation for single-phase ground fault currents in 6 – 10 kV cable networks under the influence of higher harmonic components on the damage current), Abstract of the thesis for the degree of Cand. of Tech. Scien., Ivanovo, ISEU named after V. I. Lenina, 2022.
 17. **Wilgeim R., Uoters M., Razevig D. V.** *Zazemlenie neutrali v vysokovol'tnykh sistemakh* (Neutral grounding in high-voltage systems), Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, 414 p.

shirkovets@pnpbolid.com

Harmonic distortion of current and voltage signals upon ground faults in a 6 – 10 kV electrical network

Shirkovets A. I.

The results of practical studies of the content of higher harmonics (HH) in analog current and voltage signals in operating medium voltage electrical networks are presented. Data were recorded using modern digital oscilloscopes in a relatively wide frequency range. It is shown that a comparative analysis of the most pronounced harmonics in the single-phase-to-ground fault (SGF) current and phase voltages rather well reflects the relation between them in the same mode. This can be considered a direct confirmation of the impact of harmonic distortions of the supply voltage on transients in the zero sequence (ZS) circuit. Consequently, there is a danger of single-phase damage developing into multiple and short circuits (SC) due to an increased HH content in 6 – 35 kV power supply networks. It is noted that HH-based relay protection against ground faults, intended primarily for networks with capacitive current compensation, is recommended to be used in combination with protections based on other principles. To reduce the negative consequences of HH impact, a number of technical solutions are provided. However, each of them is not a universal one and is intended either to combat supply voltage distortion in a normal mode, or to suppress an extremely limited series of harmonics in the fault current upon a single-phase fault in the network which can exist for a long time. Measures to be used to reduce the duration of single-phase-to ground faults to the values of the time delay of relay protections acting for disconnecting a section of the network with a single-phase fault are vested in the new regulations for operation of power plants and networks. These measures, in addition to protection against overvoltage are also a reliable option for minimizing the risk attributed to the impact of higher harmonics.

Keywords: higher harmonics, 6 – 10 kV electrical network, harmonic distortion current, single-phase-to-ground fault, digital oscillography, current sensor, voltage divider, capacitive current compensation, neutral grounding mode, relay protection, active current component.