

Диагностические обследования экранированных токопроводов

- Долин А. П.¹, канд. техн. наук, ООО НТЦ “Электроинжиниринг, диагностика и сервис” (ООО НТЦ “ЭДС”), Москва

Рассматривается методика диагностического обследования экранированных токопроводов с воздушной изоляцией. Приводятся характерные примеры дефектов токопроводов, выявленных при осмотрах и тепловизионном контроле, пофазно экранированных и с общим экраном для трёх фаз. Обсуждаются результаты лабораторных измерений и акустической локации частичных разрядов (ЧР) изоляторов с различными дефектами (трещинами, увлажнённой и загрязнённой поверхностью). Получены характерные амплитудно-частотные характеристики акустических сигналов ЧР при развитии дефектов изоляторов (образы дефектов). Приводятся результаты диагностирования генераторного токопровода с использованием электромагнитных и акустических приборов.

Ключевые слова: экранированные токопроводы, диагностическое обследование, частичные разряды.

Экранированные токопроводы с воздушной изоляцией предназначены для работы в сетях напряжением до 35 кВ и выполняются пофазно экранированными (например, генераторные токопроводы) и с общим экраном для трёх фаз. Далее рассматриваются методика обследования экранированных токопроводов, которая основана на опыте диагностирования более 500 токопроводов в действующих электроустановках, а также результаты лабораторных исследований и аналитических расчётов.

Экраны токопроводов, как правило, изготавливают из технического алюминия, шины – из электротехнических алюминиевых сплавов. Шины закреплены на опорных изоляторах. Проводники (шины и экраны) генераторных и некоторых других токопроводов имеют кольцевое сечение. Внешняя поверхность шин, а также внутренняя и внешняя поверхность экранов окрашиваются для увеличения теплоотдачи излучением. Цвет краски внешней поверхности экрана (белый или светло-серый), кроме того, обеспечивает наименьшее поглощение тепла от солнечной радиации в открытых электроустановках.

Экраны токопроводов защищают токоведущие шины от внешних воздействий, а наведённые токи в них снижают уровень напряжённости магнитного поля токопроводов. Конструкция токопроводов обеспечивает высокую надёжность передачи электроэнергии, и при использовании пофазного экранирования практически полностью исключает возникновение коротких замыканий (КЗ).

Экраны современных генераторных токопроводов выполняют непрерывными, электрически соединёнными у генератора и трансформатора и заземлёнными в одной точке (рис. 1, а). В этом

случае в экранах наводится ток, равный и противоположно направленный току в шине, поэтому напряжённость магнитного поля токопровода вне экранов практически равна нулю. Таким образом обеспечивается высокая электродинамическая стойкость токопроводов, полная электромагнитная безопасность для персонала и отсутствие воздействия магнитных полей на оборудование, в том числе автоматики и защиты.

У токопроводов, изготовленных примерно до 1980 г., “разомкнутые” экраны. Секции экранов (длиной, как правило, до 10 м) изолированы и заземлены в одной точке (рис. 1, б). Такие токопроводы имеют меньшие потери (а следовательно, тепловыделение) по сравнению с токопроводами с непрерывными экранами при одинаковых размерах и материалах проводников. Основные недостатки токопроводов с “разомкнутыми” экранами: экранирование (снижение напряжённости) магнитного поля шин только на 40 – 60% и наличие резиновых (в настоящее время заменяются силиконовыми) изоляционных уплотнений между секциями экранов.

Диагностирование экранированных токопроводов в процессе эксплуатации включает в себя осмотр токопроводов, тепловизионный контроль, проведение обследований или испытаний для оценки состояния опорных изоляторов.

При осмотре токопроводов прежде всего контролируются отсутствие повреждений экранов, состояние штатной изоляции, а также окраска экранов. При обследованиях токопроводов установлено, что иногда имеют место нарушения герметичности их экранов в результате повреждений алюминиевых оболочек, компенсаторов, износа изоляционных уплотнений секций и др. Такие нарушения могут приводить к попаданию влаги и за-

¹ Долин Анисим Петрович: apdol@mail.ru

грязнений в экранируемое пространство, что в итоге провоцирует развитие дефектов изоляторов.

При осмотре токопроводов проверяется состояние окраски, а в наружных установках соответствие цвета экранов токопроводов требованиям заводской документации. Следует отметить, что окраска шин и экранов токопроводов обеспечивает снижение их температуры в рабочих режимах за счёт увеличения теплоотдачи излучением по сравнению с неокрашенными проводниками. Кроме того, в наружных установках при изменении цвета окраски экранов меняется уровень поглощаемой солнечной радиации (при сохранении теплового потока излучением) [1].

По методике [1] с помощью программы EKРАН EDS V2 [2] при различной окраске экранов были рассчитаны температуры проводников пофазно экранированных токопроводов. При номинальных токах токопроводов в наружных установках температура экранов и шин, например, при окраске экранов красным цветом по сравнению с окраской белым цветом, увеличивается на 7 – 12% соответственно. В качестве иллюстрации в таблице приведены температуры нагрева проводников пофазно экранированного токопровода типа ТЭНЕ-20-10000-300У1 с экранами, окрашенными белой (штатной) и красной (например, фаза С) красками, в летний период в средней и южной полосе России при температуре воздуха 40°С.

Необходимо подчеркнуть, что неоднократно сопоставлялись температуры проводников пофазно экранированных токопроводов, определённые при расчётах, с данными испытаний и полученные результаты подтвердили высокую точность аналитического метода.

Как следует из данных таблицы, изменение цвета окраски экранов токопроводов по сравнению с заводским приводит к увеличению температуры нагрева проводников в рабочих режимах, а следовательно, и при КЗ. В ряде случаев это может привести к тому, что температуры нагрева проводников превысят допустимые значения.

У токопроводов с непрерывными экранами (рис. 1, а) контролируются также наличие и правильность выполнения закороток экранов. При проведении ремонтных работ были случаи установки закороток меньшего сечения и даже демонстрация закороток экранов. При использовании закороток экранов меньшего сечения повышается их нагрев, который можно проконтролировать при тепловизионном обследовании. Были зафиксированы случаи нагрева в рабочих режимах закороток с уменьшенной площадью поперечного сечения до температуры 150°С.

Отсутствие одной из штатных закороток вызывает появление потенциала на экранах токопровода. Например, на токопроводе ТЭКН-20/60-160, у которого была установлена только одна закоротка, рост потенциала по длине составлял 0,5 В/м при

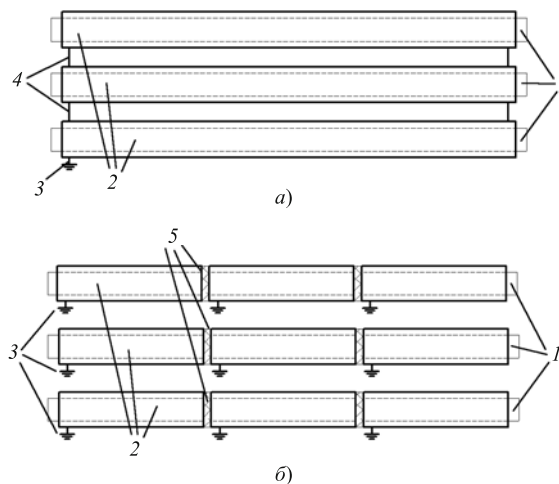


Рис. 1. Схемы соединения экранов генераторных токопроводов:

а – электрически соединённые и заземлённые в одной точке; б – изолированные; 1 – шины; 2 – экраны; 3 – заземление; 4 – закоротки экранов; 5 – изоляционные уплотнения

рабочем токе более 6000 А. При длине токопровода 180 м напряжение относительно земли достигало 90 В, что подтверждено расчётами по методике [1, 2], а также прямыми измерениями.

Тепловизионное обследование при нагрузке токопроводов позволяет также выявить повышенный нагрев в зоне опорных элементов токопроводов при потере штатной изоляции. В качестве примера на рис. 2 показаны зоны крепления экранов с дефектами изоляции относительно опорных конструкций пофазно экранированных токопроводов и термограммы этих зон.

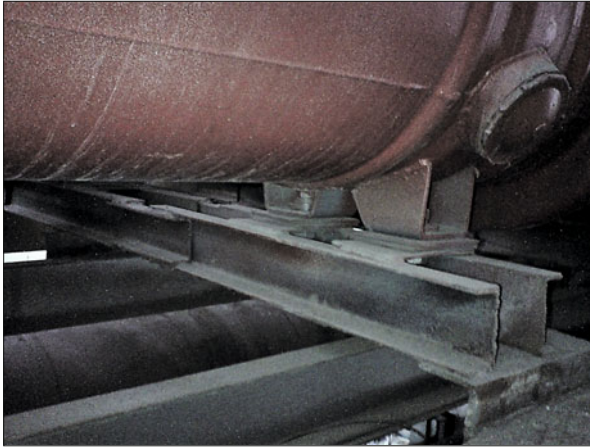
Наиболее “проблемным” узлом экранированных токопроводов являются опорные изоляторы, в процессе эксплуатации которых возможны образование трещин, разрушения, загрязнения поверхности и, как следствие, перекрытие изоляторов. замыкание на землю по повреждённому (или загрязнённому) изолятору может потребовать отключения цепи (прежде всего генераторов).

Контроль состояния опорных изоляторов экранированных токопроводов согласно [3] проводится повышенным напряжением промышленной частоты, и предусмотрен при вводе токопроводов

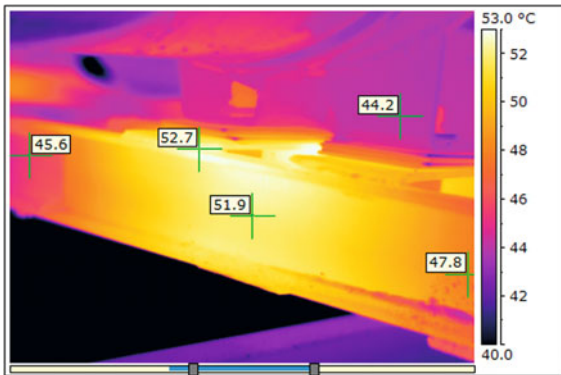
Расчётные температуры нагрева проводников токопровода ТЭНЕ-20-10000-300У1 при номинальном токе

Цвет окраски экранов	Расчётная температура нагрева, °С	
	шин	экранов
Белый	104/105,8	69,5/71,4
Красный	103,9/113,3	69,3/79,9

Примечания: 1. Числитель – температура нагрева в закрытом распределительном устройстве (ЗРУ); знаменатель – открытом (ОРУ). 2. Допустимая температура нагрева шин 105°С, экранов – 80°С.



а)



б)

Рис. 2. Зона крепления экранов токопровода (а) и термограмма этой зоны в рабочем режиме (б) при потере изоляции

в эксплуатацию и при капитальных ремонтах. Подобное испытание – разрушающий метод контроля. Между тем опыт эксплуатации экранированных токопроводов свидетельствует о необходимости периодического контроля состояния их изоляторов особенно после 15 – 20 лет эксплуатации.

Испытания повышенным напряжением требуют вывода токопровода из работы и “расшиновки” в точках присоединения (в том числе выводов ге-



Рис. 3. Повреждённый изолятор

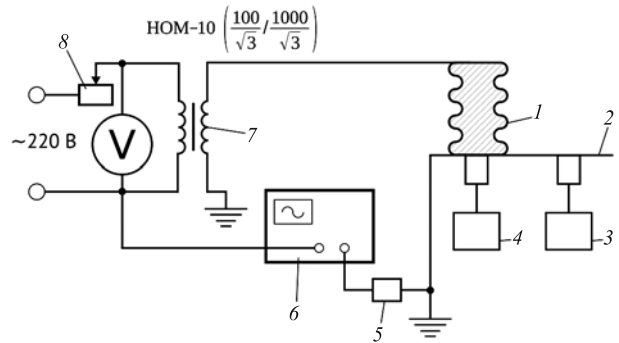


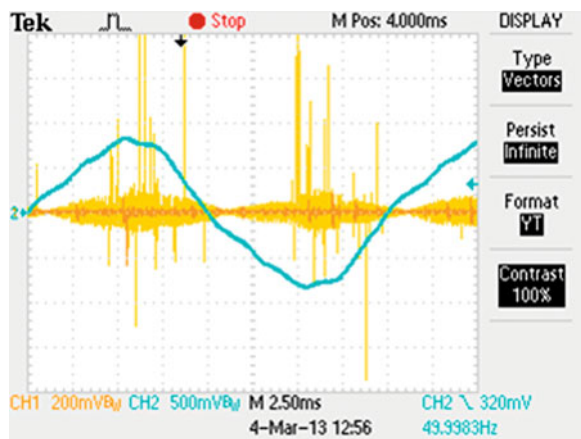
Рис. 4. Схема испытаний

нераторов, коммутационных аппаратов, силовых и измерительных трансформаторов). При пробое изоляторы должны быть заменены до ввода токопровода в работу. Продолжительность таких испытаний, включая подготовительные и восстановительные ремонтные работы, может потребовать несколько рабочих смен. Кроме того, в ряде случаев при испытаниях повышенным напряжением не удавалось локализовать место дефекта и своевременно заменить дефектные изоляторы.

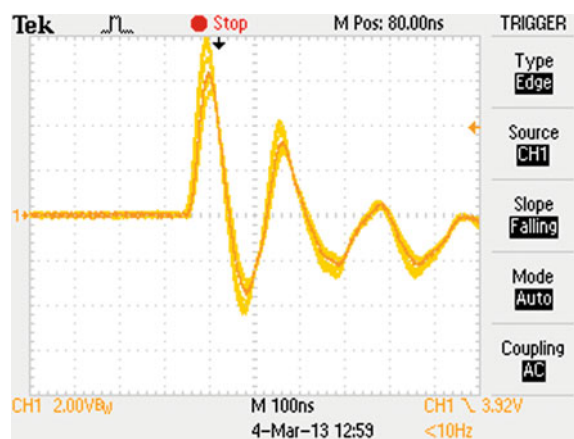
В последние годы альтернативой испытаниям повышенным напряжением в период эксплуатации стал контроль частичных разрядов в изоляции токопроводов. Это – неразрушающий способ диагностического контроля, не требующий вывода оборудования из работы, для которого применяются индукционный и/или акустический методы. Однако при локации ЧР фиксируются различные помехи, а также сигналы, не связанные с дефектами опорных изоляторов (разряды плавающих потенциалов, внешние разряды, акустические “шумы”, вызванные вибрациями, и др.), которые затрудняют идентификацию развивающихся дефектов

Для накопления опыта определения характера и уровня развития дефектов изоляторов экранированных токопроводов, а также идентификации образа дефектов были проведены испытания на модели токопровода с изолятором, имеющим трещину в фарфоровом теле (рис. 3), и с неповреждённым изолятором при сухой, увлажнённой и загрязнённой поверхности. На рис. 4 показана принципиальная схема экспериментальной установки.

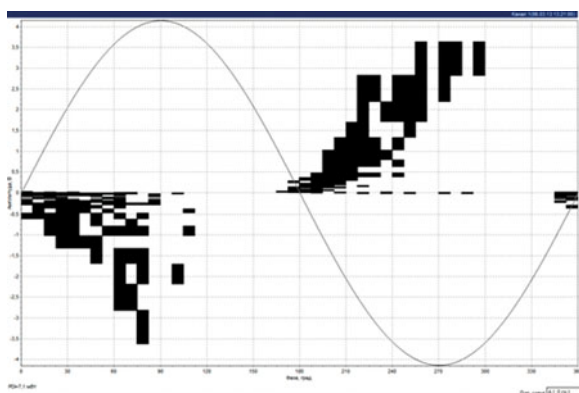
На испытуемый изолятор 1 подавалось напряжение до $10/\sqrt{3}$ кВ (относительно земли) через трансформатор напряжения 7 типа НОМ-10. Регулирование напряжения производилось с помощью реостата 8. Контроль напряжения выполнялся по стороне низшего напряжения. На изолятор крепилась алюминиевая пластина 2 толщиной 5 мм, имитирующая экран токопровода. Пластина 2 заземлялась. Контроль разрядных явлений проводился с помощью осциллографа 6 и датчика 5 (высокочастотного трансформатора тока). Кроме того, локация разрядных явлений осуществлялась с по-



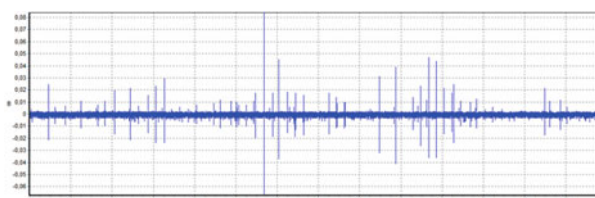
а)



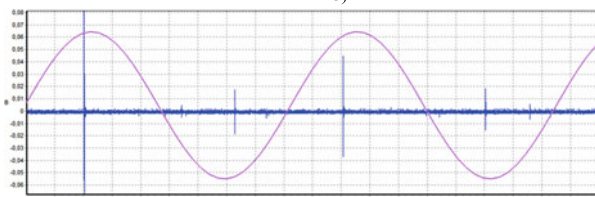
б)



в)



з)



д)

Рис. 5. Осциллограммы электрических и акустических сигналов на увлажнённом и загрязнённом изоляторе (без трещин)

мощью акустического датчика 3 и прибора типа AR200, а также электромагнитного (индукционного) датчика 4 и прибора R400.

Прикладывалось напряжение, составляющее 0,5, 0,75 и 1,0 номинального напряжения изолятора. Параллельно использовались три системы измерения ЧР – прямое измерение с датчика 5, с акустического датчика 3 и индукционного датчика 4. В результате были получены образы характерных дефектов изоляторов. Уровень развития дефекта в определённой степени можно принять пропорциональным уровню приложенного напряжения.

В качестве примера на рис. 5 изображены осциллограммы разрядной активности на развёртке 2,5 мс/дел (а) и 100 нс/дел (б); амплитудно-фазовые распределения импульсов сигналов в режиме накопления, зарегистрированных прибором R400 с электромагнитным датчиком (в), и акустический сигнал, полученный прибором AR200 на развёртке 50 мс/дел (з) и 2 мс/дел (д). Периодически изменяющиеся кривые на рис. 5, а, в, д – рабочее напряжение.

На рис. 6 проиллюстрированы амплитудно-частотные характеристики акустических сигналов частичных разрядов испытываемых в лаборатории изоляторов при различных дефектах, связанных с ув-

лажнением и загрязнением поверхности, развитием увлажнённой (загрязнённой) и сухой трещин и др.

В результате испытаний получены следующие данные.

На сухом изоляторе без повреждений разрядные явления не зафиксированы.

На увлажнённом и загрязнённом изоляторе без трещин были зарегистрированы разрядные явления (рис. 5, а, б), которые по результатам обработки сигнала прибором R400 достигали 3,7 В (рис. 5, в). Акустическим датчиком фиксировались разряды с преобладающим уровнем сигнала 20 – 40 мВ. В редких случаях уровень сигнала достигал более 100 мВ. Амплитудно-частотная характеристика акустического сигнала (с наибольшей амплитудой рис. 5, з, д) обладает широкой полосой спектра (рис. 6, а) с максимумом в области 110 – 120 кГц.

На сухом изоляторе с трещиной разрядные явления фиксировались всеми методами на всех уровнях испытательного напряжения. Акустическим датчиком зарегистрирован большой уровень сигнала с периодом, равным 10 мс, что соответствует времени полупериода сетевого напряжения. Следует отметить амплитудно-частотную характеристику акустического сигнала с явным пиком в

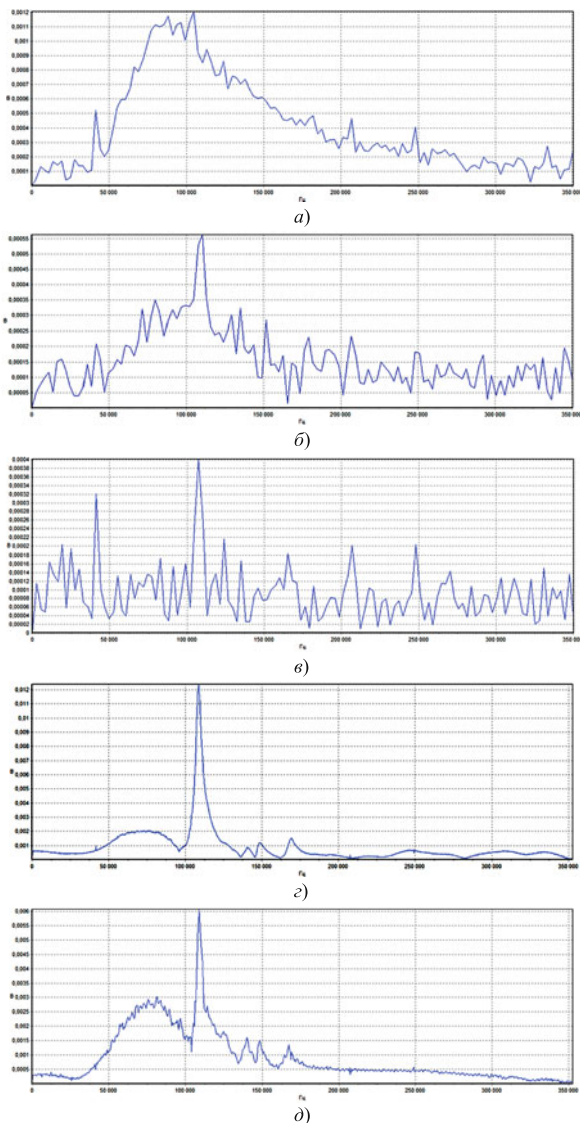


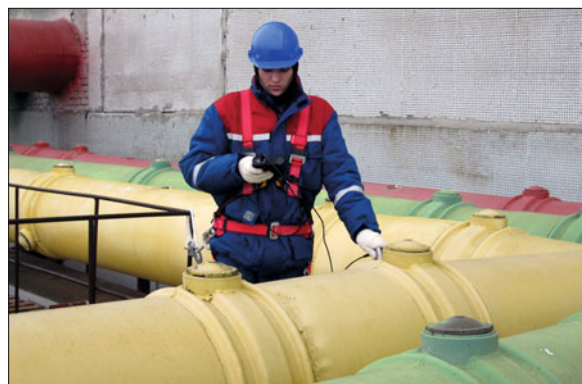
Рис. 6. Характерные амплитудно-частотные характеристики (образы) акустических сигналов при развитии дефектов изоляторов, сопровождающиеся частичными разрядами:

a – по увлажнённой и загрязнённой поверхности; *б* – по развивающейся увлажнённой (загрязнённой) трещине; *в* – по развивающейся сухой трещине; *г* – по сухой развитой трещине; *д* – по развитой, увлажнённой и загрязнённой трещине

области 120 кГц (рис. 6, *г*), а также высокий уровень электромагнитного сигнала, зафиксированный прибором R400.

Наиболее важными являются результаты испытаний загрязнённого и увлажнённого изолятора с трещиной. Акустический сигнал представляет собой нерегулярные импульсы, но явно прослеживается интервал 10 мс между ними. Спектр данного сигнала имеет два явно выраженных пика примерно на частотах 75 и 120 кГц (рис. 6, *г*).

Экспериментальные результаты позволили с большой уверенностью трактовать данные измерений, полученные на действующем электрооборудовании. Опыт обследования более 500 экранированных токопроводов подтвердил, что акустиче-



a



б

Рис. 7. Локация ЧР электромагнитным (*a*) и акустическим (*б*) датчиками при диагностике экранированных токопроводов

ский метод является основным и даёт возможность идентифицировать характер и уровень развития дефекта. Электромагнитный метод – дополнительный, позволяет подтвердить периодичность и интенсивность электрических разрядов. Критерием развития дефекта, сопровождающегося электрическим (частичным) разрядом, является акустический сигнал с основным спектром, лежащим в областях частот от 80 до 130 кГц. При уровне сигнала более 150 мВ (в градуировке прибора AR200) уровень дефекта требует проведения периодического контроля (например, при увлажнении) или ремонтных работ (при наличии трещины).

При осуществлении таких обследований акустический и индукционный датчики последовательно устанавливаются в каждом поясе изоляторов (рис. 7). Зафиксированные сигналы обрабатываются. При этом анализируется периодичность возникновения сигналов, их амплитуда, амплитудно-частотные и амплитудно-фазовые распределения сигналов.

В качестве примера на рис. 8 представлены результаты акустических и индукционных измерений с помощью приборов AR200 и R400, полученные при диагностике генераторного токопровода. Эти сведения однозначно интерпретировались как

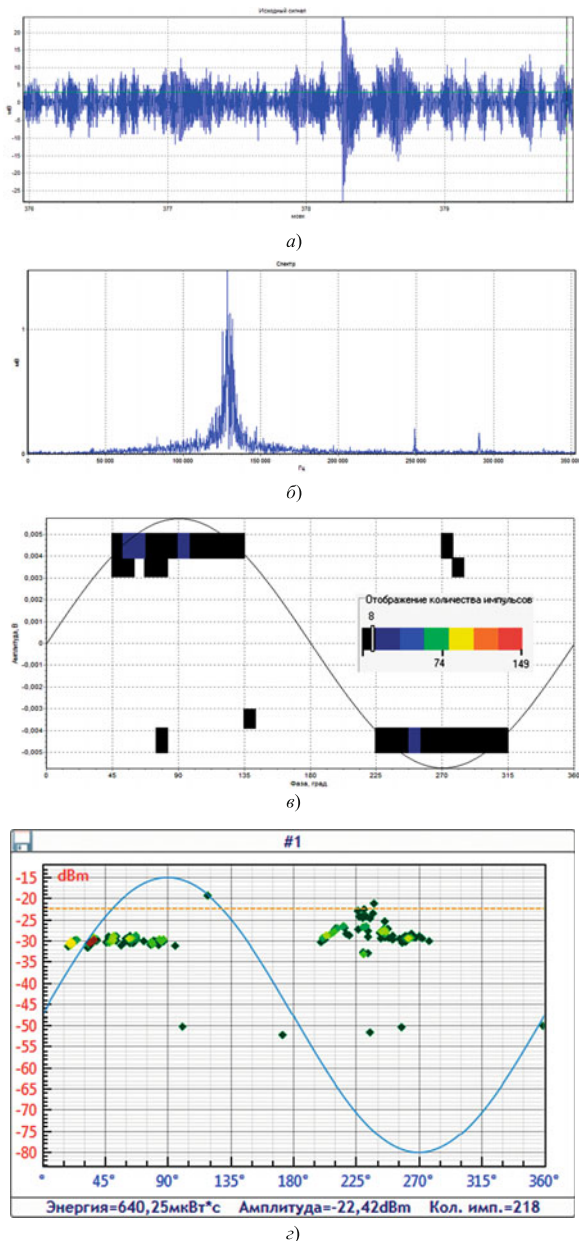


Рис. 8. Осциллограмма (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) акустического сигнала, амплитудно-фазовое распределение импульсов электрического сигнала в зависимости от базового напряжения частотой 50 Гц при использовании электромагнитного датчика RFCT-6 (в) и направленной СВЧ-антенны (г)

дефект, обусловленный трещиной изолятора. При диагностике данного токопровода дополнительно использовался прибор DimLoc с направленной СВЧ-антенной. Результаты измерения этим прибором подтвердили высокий уровень разрядной активности в зоне дефектного изолятора.

Следует отметить, что дважды проведённые до измерения ЧР высоковольтные испытания токопровода не позволили выявить дефектный изолятор. Периодически пробой по изолятору приводил к замыканию на землю в цепи генератора и необходимости вывода его из работы.

Амплитуда обнаруженных акустических сигналов достигала 35 – 45 мВ. “В шуме” зафиксированного сигнала точно установить периодичность было затруднительно. Однако спектр сигнала (рис. 8, б) указывает на электрический характер источника. Кроме того, образ сигнала характерен для дефектов изоляторов с трещиной (с сухой, незагрязнённой поверхностью). Обнаруженный дефект зафиксирован двумя индукционными методами: с помощью приборов R400 (рис. 8, в) и DimLoc с направленной СВЧ-антенной (рис. 8, г).

Выводы

1. Основным методом контроля технического состояния изоляторов экранированных токопроводов является акустическая локация электрических разрядов, дополнительным – индукционный метод, в том числе при необходимости с применением направленных антенн. Для оценки уровня и характера развития дефектов необходимо использовать приведённые в данной статье характерные образы акустических сигналов, а также их уровень и уровень сигналов, зафиксированный индукционным методом.

2. Для нормально работающих токопроводов измерение ЧР оправдано выполнять после 15 – 20 лет эксплуатации, а далее с периодичностью, например, 1 раз в 5 лет. После 30 лет работы результаты измерения ЧР оправдано использовать как основание для продления срока эксплуатации экранированных токопроводов. Внеочередной контроль следует проводить после возникновения самоустранившегося замыкания на землю в токопроводе.

Список литературы

1. Долин, А. П. Нагрузочная способность пофазно экранированных токопроводов [Текст] / А. П. Долин // Известия Академии наук. Энергетика. – 1993. – № 6. – С. 106 – 118.
2. Программа расчёта пофазно экранированных токопроводов с воздушной изоляцией (EKRA.No. EDS V2). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010611517, дата рег. 24.02.2010.
3. Объём и нормы испытаний электрооборудования [Текст]: СТО 34.01-23.1-001-2017.