

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВЫХ СИГНАЛОВ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2024 г. Гуовэй Ли^{1,*}, Симин Цзэн¹, Цинь Ван¹, Чжэньвэй Чжан¹

¹Государственный научно-исследовательский институт электроэнергетики Хэбэйской системы электро-снабжения, Шижэчжуан 050021, Хэбэй, Китай

*E-mail: lgwexe@163.com

Поступила в редакцию 21.12.2023; после доработки 31.12.2023

Принята к публикации 12.01.2024

Наличие влаги в кабелях высоковольтных распределительных сетей может стать причиной серьезной угрозы безопасности, однако эффективных средств для контроля и анализа внутренней влажности кабелей не существует. Поэтому существует необходимость в разработке нового неразрушающего метода контроля для оценки водонепроницаемости кабелей распределительных сетей и их соединителей. Внутренняя структура кабеля представляет собой многослойную структуру, состоящую из проводов, изоляционного слоя из сшитого полиэтилена и изоляционной оболочки из силиконовой резины. С помощью отраженного терагерцового импульсного сигнала определяется внутреннее состояние кабеля, а по эхолокационным характеристикам можно судить о наличии в нем водяных пятен. Кроме того, путем сканирования в цилиндрических координатах были получены объемные данные, а терагерцовые изображения были реконструированы на основе информации о характеристиках, которые соответствовали распределению водяных пятен между изоляционной оболочкой кабеля и изоляционным слоем из сшитого полиэтилена. Результаты показывают, что терагерцовая методика позволяет с высокой чувствительностью определять состояние влажности кабеля, что имеет большое значение в энергетике и при передаче электроэнергии.

Ключевые слова: терагерц, импульс во временной области, время полета, силовой кабель, состояние влажности.

DISTRIBUTION NETWORK CABLE DETECTION BASED ON TERAHERTZ PULSE AND IMAGING

© 2024 Guowei Li^{1,*}, Siming Zeng¹, Qing Wang¹, Zhenwei Zhang¹

¹State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei China

*E-mail: lgwexe@163.com

Moisture of high voltage distribution network cables will cause major safety hazard, but there is no effective means to detect and analyze the internal humidity state of the cables. Therefore, it is urgent to develop a new non-destructive detection method to evaluate the waterproof performance of distribution network cables and their connectors. The internal structure of the cable is a multi-layer structure composed of wires, cross-linked polyethylene insulation layer, and silicone rubber insulation sheath. We used the reflective terahertz pulse signal to detect the internal states of the cable, and judge whether it contains water stains according to the echo characteristics. In addition, three-dimensional data was obtained through cylindrical coordinate scanning and terahertz images were reconstructed based on feature information, which were consistent with the distribution of water stains between the cable insulation sheath and cross-linked polyethylene insulation layer. The results show that the terahertz technology can realize the high sensitivity detection of cable moisture state, which is of great significance in the power and transmission industry.

Keywords: terahertz, time-domain pulset, time-of-flight, power cables, moisture state.

DOI: 10.31857/S0130308224020046

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности эксплуатации высоковольтных электрических сетей имеет решающее значение для экономики и жизни людей. В высоковольтных электросетях широко используются изоляционные материалы, проводящие материалы и композитные элементы, такие как клеммы, кабели из сшитого полиэтилена и т.д. [1, 2]. Под действием электрических полей возникают дефекты сплошности этих материалов, включая микропоры, примеси, дефекты вследствие напряжений, влажность и т.д., изделия постепенно разрушаются и представляют потенциальную угрозу безопасности [3—6]. Различия в составе сырья, производственных процессах, длительных высоковольтных нагрузках, а также сложные условия окружающей среды могут вызывать повреждение и деградацию материалов и конструкций, приводя к появлению внутренних дефектов и создавая угрозу безопасности. Кроме того, различия в строении дефектов, материалах и физических свойствах приводят к различным откликам на электрические, оптические или акустические сигналы.

С помощью соответствующих методов контроля размер, форма и расположение дефектов в изоляционном слое могут быть обнаружены или визуализированы путем анализа изменения сигнала. Обычно традиционные методы, такие как регистрация частичных разрядов [7], ультразвуковая дефектоскопия [8—10], рентгеновская дефектоскопия [11,12] и т.д., требуют высокого напряжения, большой силы тока и интенсивного излучения в экспериментальной среде во время проведения контроля, что является относительно сложным и громоздким в эксплуатации и предъявляет повышенные требования к безопасности. Поэтому существует актуальная необходимость в разработке новой технологии неразрушающего контроля и оборудования для безопасной оценки дефектов кабелей распределительных сетей.

Особенно кабели распределительных сетей подвержены проникновению влаги или воды в промежуточных соединениях. Под воздействием высоких электрических полей легко происходит старение водного триинга, что снижает характеристики изоляции кабелей и в конечном итоге приводит к разрушению кабеля, который является слабым звеном в распределительной сети. Несмотря на постоянное совершенствование вышеупомянутых традиционных методов контроля, они все еще не могут удовлетворить требования по контролю влажности промежуточных соединений в кабелях распределительных сетей, ограниченных материальными и техническими дефектами. Поэтому необходимо разработать новую неразрушающую технологию и оборудование для безопасной оценки герметичности и водонепроницаемости промежуточных соединений в кабелях распределительных сетей. В последние годы терагерцовая методика предлагает значительные преимущества в неразрушающем контроле, такие как обнаружение дефектов водяного дерева в слоях изоляции [13], коррозионных дефектов в металлическом защитном слое [14], дефектов обрыва в проводниках [15], дефектов старения в слое изоляции [16], дефектов воздушного зазора в слое изоляции [17, 18], дефектов проникновения влаги [19]. Однако случаи выявления и анализа состояния влажности в кабельных соединениях распределительных сетей немногочисленны.

В данном материале на основе параметров материала и структурных параметров кабелей в сочетании с теорией распространения терагерцового излучения создана цилиндрическая координатно-отражательная терагерцовая сканирующая система визуализации и получены трехмерные данные. На основе стандартных образцов были определены особенности сигналов терагерцовых импульсов для кабельных соединений в условиях влажности или проникновения воды, которые затем были использованы для реконструкции терагерцовых изображений. Результат интуитивной визуализации соответствовал фактическому распределению пятен воды и может быть применен для оценки качества внутренней структуры кабельного соединения.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Принцип распространения по системе воздух—среда—металл

Терагерцовый импульс проходит через границу раздела между воздухом и средой (защитный слой или изоляционный слой), а затем передается через диэлектрический слой к границе раздела между средой и металлом (металлический кабель или высокоотражающий материал, например вода), что соответствует физической модели, изображенной на рис. 1. Позиция 0 соответствует границе раздела воздух—среда, которая может быть точно определена с помощью измерительного зажима в экспериментах. Терагерцовый импульс E перпендикулярно падает на поверхность среды, при этом частично отраженный сигнал обозначим как E_{r0} . После передачи через среду на расстояние d прошедший импульс внутри отражается на границе среда—металл (отражательная способность составляет примерно 1). После прохода через среду обратно на расстояние d часть импульса возвращается, пока другая часть передается дальше и обозначается как E_{r1} . Теоретически вышеупомянутый процесс внутренних прохождений и отражений сигнала может продолжаться бесконечно долго. Однако на практике на сигнал влияют поглощение и рассеяние сигнала, а E_m будет приближаться к нулю после нескольких серий прохождения эхосигналов, что приводит к невозможности регистрации этих эхосигналов. Распространение терагерцового импульса в образце проявляется в виде временной задержки при достижении детектора. E_{r0} , E_{r1} , E_m и E_r могут быть соответственно представлены таким образом:

$$E_{r0} = E_{r_{as}}; \quad (1)$$

$$E_{r1} = E t_{as} r_{sm} t_{sa} T_s^2(d); \quad (2)$$

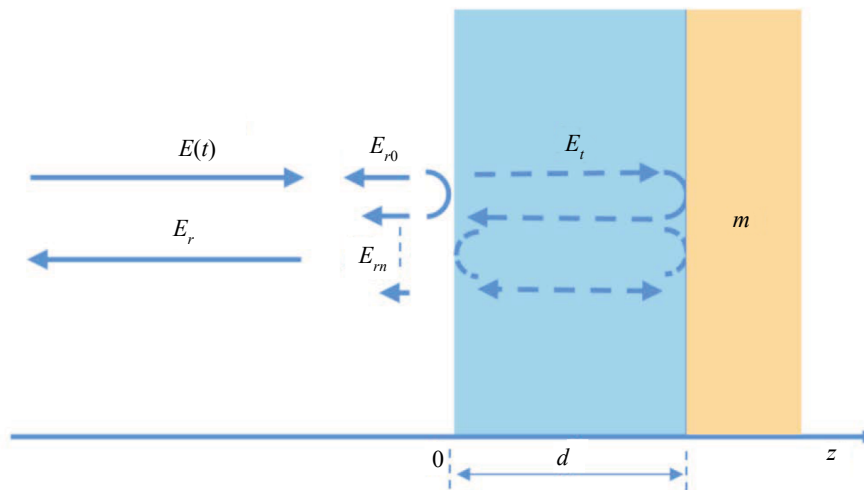


Рис. 1. Схематическое изображение модели прохождения терагерцовой волны по системе воздух—среда—металл.

$$E_{rn} = Et_{as}r_{sa}^{n-1}r_{sm}^n t_{sa} T_s^{2n}(d); \quad (3)$$

$$E_r = \left\{ r_{as} + \frac{t_{as}t_{sa}}{r_{sa}} \sum_{l=1}^n [r_{sm}r_{sa} T_s^2(d)]^l \right\} E, \quad (4)$$

где r_{as} — коэффициент отражения на границе воздух—среда; r_{sm} — коэффициент отражения на границе среда—металл; t_{as} и t_{sa} — коэффициент прохождения на границе воздух—среда и среда—воздух соответственно; $T_s(d)$ — коэффициент пропускания через образец толщиной d .

Терагерцовые сигналы могут проходить внутрь контролируемого объекта, особенно в случае многослойных диэлектрических структур, в которых терагерцовый сигнал отражается от границ раздела между слоями с различными показателями преломления. Анализируя эхосигналы от каждой границы раздела, можно охарактеризовать внутреннюю структуру границы раздела и особенности целевых дефектов в объекте. Субпикосекундная длительность импульса терагерцовых сигналов позволяет получить разрешение соседних границ на микронном уровне. Более того, при распространении между границами микроскопические структурные и компонентные различия в материале могут привести к макроскопическим изменениям в широкополосном терагерцовом сигнале. Для облегчения количественного анализа в системе используется метод вертикального падения, а толщина между границами раздела может быть представлена как

$$d = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (5)$$

Δt — время задержки; n — показатель преломления материала в терагерцовом диапазоне. На практике, когда $2n \cdot d$ больше, чем ширина временной области терагерцовых сигналов, различные эхосигналы легко разделяются с помощью временного стробирования. В соответствии с формулой (5), когда $2n \cdot d$ больше ширины временной области терагерцовых сигналов, разные эхосигналы легко разделяются с помощью временного стробирования на практике. $2nd$ — это путь оптического сигнала, который проходит через переднюю поверхность и отражается от задней поверхности образца обратно на переднюю поверхность.

Формулы (1)—(4) достоверно выражают соответствующие эхосигналы. С другой стороны, эхосигналы разных порядков накладываются друг на друга, и отдельные эхосигналы трудно разделить. Поэтому невозможно напрямую определить временное положение каждого эхосигнала, и формула (5) не может быть использована напрямую. Только формула (4) может быть использована для выражения суммарного эха, а затем можно попытаться проанализировать параметры материала. В данной статье рассматривается только первый.

2.2. Подготовка образцов и описание эксперимента

Образец представляет собой кабель распределительной сети с изоляцией из сшитого полиэтилена, который обладает такими преимуществами, как простота конструкции, малый вес, отличная теплостойкость, высокая несущая способность, неплавкость, устойчивость к химической коррозии и высокая механическая прочность, как показано на рис. 2а. Кабель состоит из трех основных частей: токопроводящей жилы, изоляционного слоя и защитного слоя. Внешний диаметр составляет 19, 28 и 48 мм соответственно, а структура поперечного сечения показана на рис. 2б.

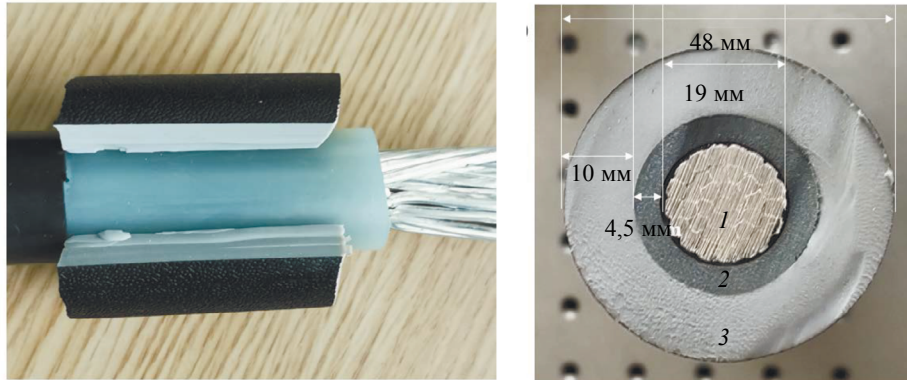


Рис. 2. Образцы кабеля: изображение кабеля (а); поперечное сечение (1 — токопроводящая жила; 2 — изоляционный слой из сшитого полиэтилена; 3 — защитный слой) (б).

На рис. 3 представлена система терагерцовой спектроскопии с временной разверткой на отражение. Она состоит из волоконного фемтосекундного импульсного лазера, волоконносвязанного терагерцового фотопроводящего излучателя и приемника, волоконносвязанного устройства временной задержки, элементов передачи сигнала по волокну, синхронного блока управления и блока регистрации сигнала. Выход фемтосекундного лазера через волокно разделяется на два пучка. Один луч напрямую подключается к фотопроводящей антенне, соединенной с волокном, а другой подключается к высокоскоростной линии задержки и затем к другой фотопроводящей антенне. Антенна-излучатель интегрирована в модуль вертикального отражения. Через этот модуль излучаемый терагерцовый сигнал вертикально падает на исследуемую цель, а отраженная последовательность эхосигналов возвращается по тому же пути.

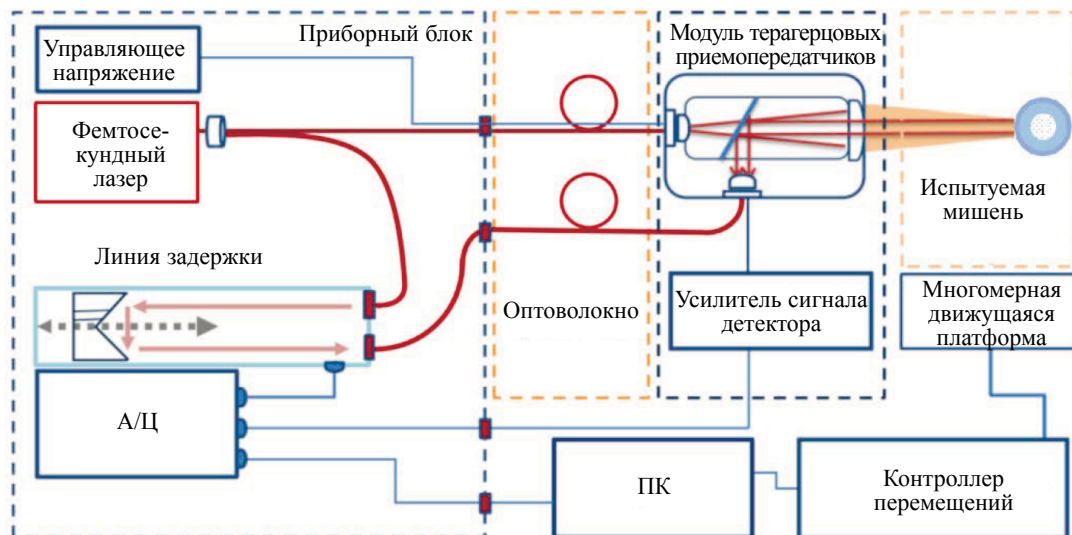


Рис. 3. Схема установки для терагерцовой спектроскопии.

Когда терагерцовый сигнал и зондирующий фемтосекундный импульс длительностью 100 фс и частотой повторения 100 МГц одновременно поступают на фотопроводящую детекторную антенну, терагерцовое электрическое поле приводит в движение фотогенерируемые носители, формируя ток, который регистрируется после фильтрации и усиления. Устройство временной задержки регулирует относительную фазу между терагерцовым сигналом и зондирующим импульсом, чтобы получить терагерцовую временную форму волны с частотой 10 Гц за 600 пс. Полная ширина на половине максимума волны составляет около 1 пс с шагом дискретизации 0,06 пс. Диапазон частот излучения составляет от 0,1 до 2 ТГц с центральной частотой 0,5 ТГц.

3. ИЗМЕРЕНИЕ И АНАЛИЗ

3.1. Измерение изоляционного слоя из сшитого полиэтилена

Отраженные сигналы были измерены как для жилы проводника, так и для изоляционного слоя из сшитого полиэтилена с плотным контактом, как показано на рис. 4а. Структура образца представляет собой металлические провода, обернутые изоляционным материалом из сшитого полиэтилена, как показано на рис. 4б. Толщина слоя сшитого полиэтилена составляет 4,5 мм. Терагерцовый импульс, отраженный от образца, показан на рис. 4в, временные значения эхоимпульсов, генерируемых на двух границах сшитого полиэтиленового слоя, составляют 62,2 пс (R0) и 107,7 пс (R1). Согласно формуле (5), рассчитанный показатель преломления сшитого полиэтилена составляет около 1,52.

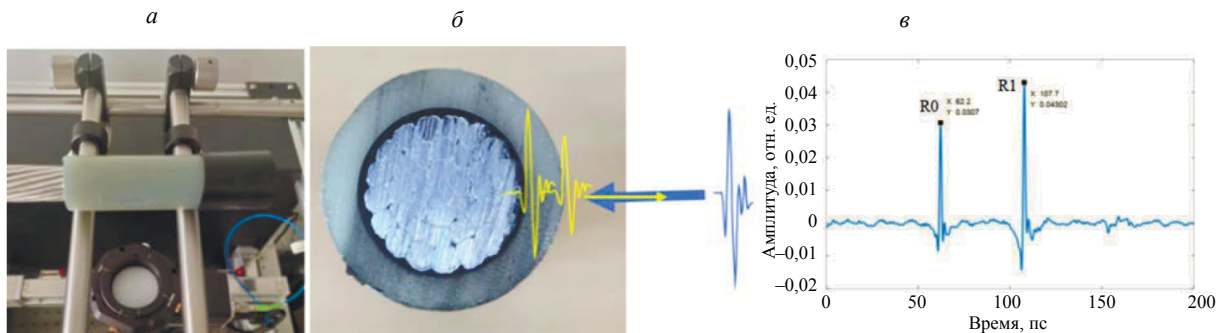


Рис. 4. Измерение изоляционного слоя из сшитого полиэтилена: измерение (а); поперечное сечение (б); отраженный терагерцовый импульс (в).

3.2. Измерение защитного слоя

Отраженные сигналы были измерены в случае модели с металлическим стержнем и защитным слоем с плотным контактом (рис. 5а). Структура образца представляет собой металлический стержень, обернутый кремниевой резиной (рис. 5б). Толщина слоя силиконовой резины составляет 10,5

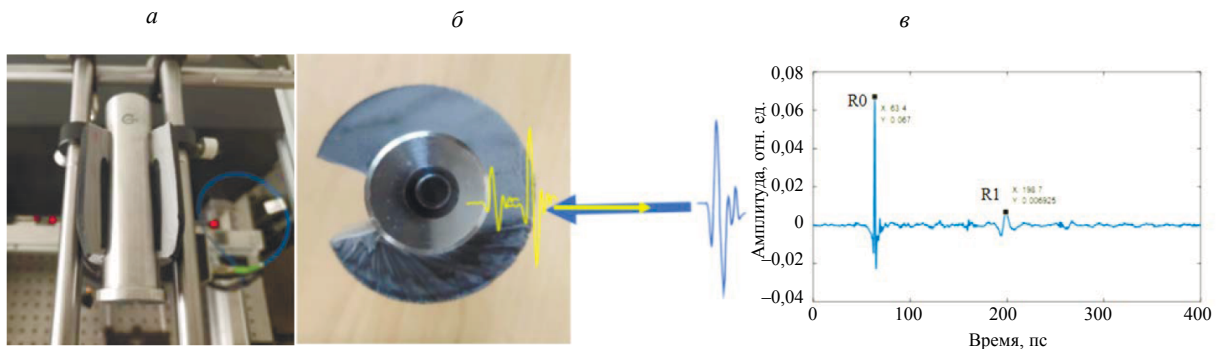


Рис. 5. Измерение защитного слоя: измерение (а); поперечное сечение (б); отраженный терагерцовый импульс (в).

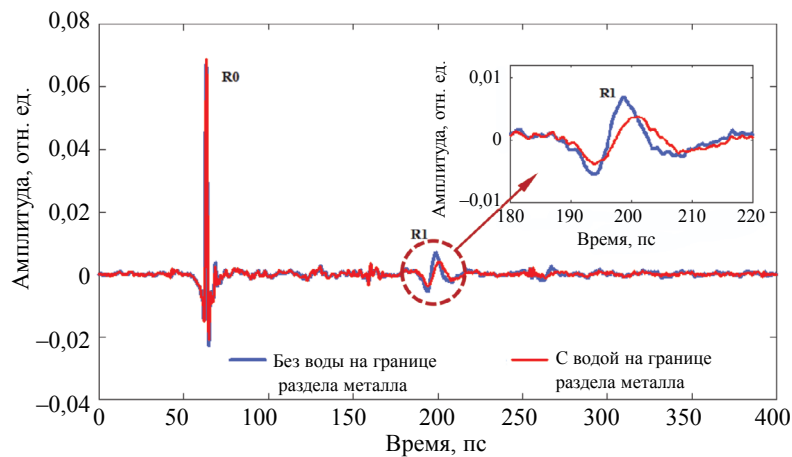


Рис. 6. Сравнение терагерцевых сигналов с/без погружения в воду в модели образца металл—стержень.

мм. Терагерцовый импульс, отраженный от образца, представлен на рис. 5в. Временные значения эхосигналов, генерируемых на двух границах раздела слоев силиконовой резины, составляют 63,4 пс (R0) и 198,7 пс (R1). Согласно формуле (5), рассчитанный показатель преломления кремниевой резины составляет около 1,93.

В случае модели металлического стержня в качестве мембраны с жидкой водой использовался лист влажной бумаги, который помещался между слоем силиконовой резины и металлическим стержнем. Терагерцовый импульс, отраженный от слоя жидкой воды, был измерен и сравнен с сигналом образца с плотным контактом без мембраны, как показано на рис. 6. Красная кривая представляет эхосигнал с погружением в воду на границе раздела, а синяя кривая — отраженный сигнал от границы раздела между металлической подложкой и оболочкой без погружения в воду (см. рис. 5в). Эхоимпульсы на двух границах раздела защитного слоя из силиконовой резины по-прежнему расположены на 63,4 и 198,7 пс. В частности, положение и амплитуда основного импульса (R0), скорее всего, останутся неизменными, в то время как амплитуда эхоимпульса (R1) немного уменьшится, а его положение сместится назад из-за поглощения и фазовой задержки, вызванной погружением в воду, между защитным слоем и металлическим стержнем.

3.3. Измерение изоляционного слоя и защитного слоя

В случае с кабельным разъемом в качестве мембраны для жидкой воды выступает лист влажной бумаги, который помещается между защитной оболочкой и сшитым полиэтиленом, а на границе раздела фаз устанавливается оловянная фольга, как показано на рис. 7.

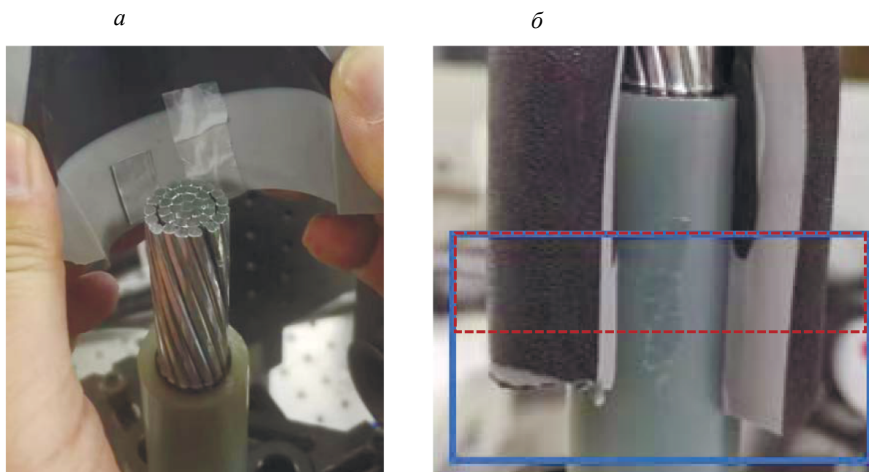


Рис. 7. Измерение изоляционного слоя и защитного слоя: образец, обернутый в подготовленную влажную бумагу и оловянную фольгу (а); измеряемая площадь (б).

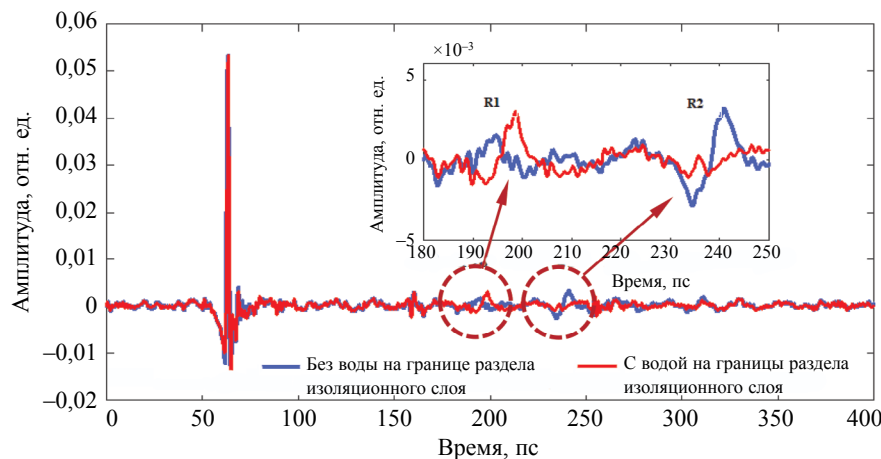


Рис. 8. Сравнение характеристик терагерцовых импульсов с погружением и без погружения в воду образца кабельного коннектора.

Форма отраженных терагерцовых волн при наличии воды в образце кабельного разъема показана на рис. 8. Красная и синяя кривые показывают отраженные сигналы с погружением и без погружения в воду на границе раздела. Эхоимпульс (R1) мал, а относительная отражательная способность между сшитым полиэтиленом и оболочкой очень низка. Затем сигнал, проникающий в слой изоляции из сшитого полиэтилена, достигает границы раздела проводников, и отраженный сигнал (R2) от металлического проводника можно четко наблюдать. В случае погружения в воду отраженный сигнал на границе раздела оболочки и сшитого полиэтилена усиливается по сравнению с погружением в безводную среду, но ослабляется импульс, проникающий в сшитый полиэтилен, что значительно ослабляет отраженный сигнал на металлическом проводнике.

Образец помещается в сканирующую систему с цилиндрическими координатами, состоящую из одномерной подъемной ступени и поворотной ступени. Терагерцовые импульсы вертикально падают на поверхность образца и выстраиваются по центру кабеля, а центр вращения поворотной ступени совпадает с осью кабеля. Шаг и диапазон поворота (φ) поворотного стола составляют 1 и 0—360°, шаг и диапазон перемещения (z) подъемного стола — 1 и 0—40 мм, интервал и диапазон дискретизации (t) терагерцового сигнала во временной области — 0,02 и 0—600 пс соответственно. Регистрируемые терагерцовые сигналы представляют собой трехмерный набор данных ($\varphi \times z \times t$). Область контроля, соответствующая образцу, показана на рис. 7б.

Терагерцовое изображение сначала восстанавливается по максимальному значению временной формы волны, можно четко наблюдать границу оболочки из силиконовой резины, что соответствует реальному образцу, как показано на рис. 9а. В местах, покрытых оболочкой, φ колеблется от 0 до 200° и от 300 до 360°, z колеблется от 28 до 40 мм. В областях без оболочки четко видны провода внутри сшитого полиэтилена, можно визуальным образом определить форму возмущения. На рис. 9б показаны характеристики эхосигналов от области, обернутой оболочкой, при $z = 28$ мм. Основной импульс и эхоимпульс, отраженный от передней поверхности и границы раздела, локализируются на 135,3 и 314 пс соответственно. Однако по эхосигналам во временной области трудно напрямую определить, содержит ли граница раздела влажную бумагу или оловянную фольгу. Эхосигналы от границы раздела в точках А и В, показанные на рис. 9в, свидетельствуют о наличии и отсутствии влажной бумаги (или фольги) в оболочке соответственно. Эхосигнал в точке В явно меньше, чем в точке А. Далее терагерцовое изображение на границе раздела восстанавливается по максимальному значению эхосигнала на границе раздела, как показано на рис. 9г. Можно выделить непокрытую область, область с защитными покрытиями в виде влажной бумаги и фольги.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обнаружения и оценки состояния увлажнения кабеля применяется методика терагерцовых импульсов и визуализации. Между защитным слоем и металлическим стержнем добавляется водяная пленка, амплитуда эхоимпульса на границе раздела среды и металла немного уменьшается. Когда между защитным слоем и сшитым полиэтиленом добавляется жидкая водяная

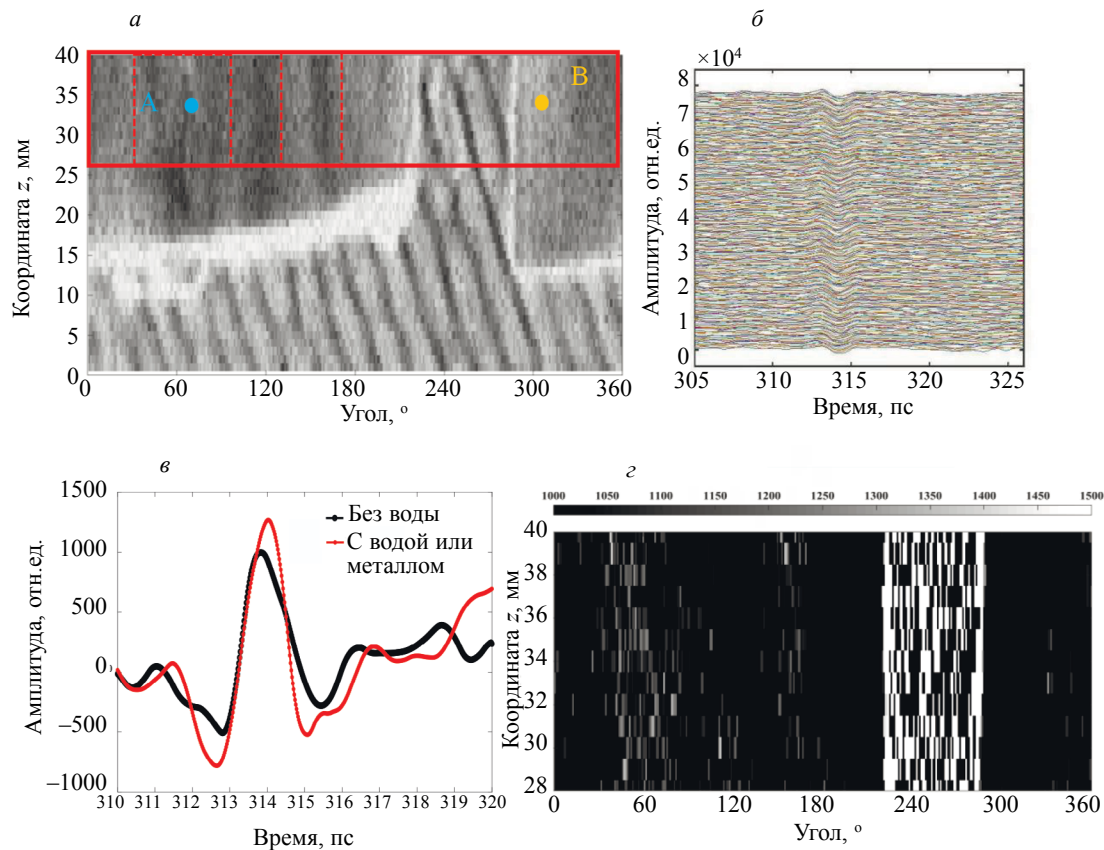


Рис. 9. Терагерцовое изображение при погружении в водную и безводную среду: терагерцовое изображение измеряемой области (а); эхо при $z = 28$ мм (б); эхо на границе раздела в точках А и В (в); терагерцовое изображение области, завернутой в оболочку (г).

пленка, погружение в воду усиливает эхосигнал на границе раздела между защитной оболочкой и сшитым полиэтиленом.

Создана терагерцовая сканирующая система визуализации с цилиндрическим координатным отражением. Влажная бумага и оловянная фольга были предварительно помещены в резиновую оболочку и намотаны на поверхность сшитого полиэтилена, после чего были получены трехмерные данные. Согласно характеристикам эхосигналов, терагерцовая визуализация собранных данных может показать структуру области листа мокрой бумаги и области листа оловянной фольги с защитной оболочкой. Это показало, что терагерцовая визуализация позволяет не только проводить неразрушающий контроль состояния влажности, но и судить о качестве внутренней структуры кабельных соединений.

Работа поддержана Фондом государственного научно-исследовательского института электроэнергетики Хэбэйской системы электроснабжения (№ гранта kj2022-064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du B., Li Z., Yang Z. et al. Application and Research Progress of HVDC XLPE Cables // High Volt Eng. 2017. V. 43 (2). P. 14—24.
2. Salah Khalil M. International research and development trends and problems of HVDC cables with polymeric insulation // IEEE Electr. Insul. Mag. 1997. V. 13 (6). P. 35—47.
3. Densley R.J. An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation // IEEE Trans. Elect. Insul. 1979. EI-14 (3). P. 148—58.
4. Dissado L.A. Predicting electrical breakdown in polymeric insulators from deterministic mechanisms to failure statistics // IEEE Trans Dielect Electr. Insul., 2002. V. 9(5). P. 860—875.
5. Chen G., Tham C. Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2009. V. 16 (1). P. 179—88.
6. Du B.X., Ma Z.L., Gao Y. et al. Effect of ambient temperature on electrical treeing characteristics in silicone rubber // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2011. V. 18 (2). P. 401—7.

7. *Laurent C., Mayoux C.* Analysis of the propagation of electrical treeing using optical and electrical methods // IEEE Trans. Elect. Insul. 1980. EI-15 (1). P. 33—42.
8. *Watanabe E., Moriya T., Yoshizawa M.* Ultrasonic visualization method of electrical trees formed in organic insulating materials // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 1998. V. 5 (5). P. 767—773.
9. *Ueno H., Walter P., Cornelissen C., Schnettler A.* Resolution evaluation of ultrasonic diagnosis tools for electrical insulation devices and the detection of electrical Trees // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2007. V. 14 (1). P. 249—256.
10. *Thomas G., Flores-Tapia D., Pistorius S.* et al. Synthetic aperture ultrasound imaging of XLPE insulation of underground power cables // IEEE Electr. Insul. Mag. 2010. V. 26 (3). P. 24—34.
11. *Reid A.J., Zhou C., Hepburn D.M.* et al. Withers P. Fault location and diagnosis in a medium voltage EPR power cable // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2013. V. 20 (1). P. 10—8.
12. *Schurch R., Rowland S., Bradley R.* et al. Imaging and analysis techniques for electrical trees using x-ray computed tomography // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2013. V. 21 (1). P. 53—64.
13. *Sato R., Komatsu M., Ohki Y.* et al. Observation of water trees using terahertz spectroscopy and yime fomain imaging // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2011. V. 18 (5). P. 1570—1577.
14. *Komatsu M., Sato R., Mizuno M.* et al. Feasibility study on terahertz imaging of corrosion on a cable metal shield // Jpn. J. Appl. Phys. 2012. V. 51 (12). P. 122405.
15. *Takahashi S., Hamano T., Nakajima K.* et al. Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging // NDT E. Int. 2014. V. 61. P. 75—79.
16. *Yan Z., Shi W., Hou L.* et al. Investigation of aging effects in cross-linked polyethylene insulated cable using terahertz waves // Mat. Res. Express. 2017. V. 4 (1). P. 015304.
17. *Lee I.S., Lee J.W.* Nondestructive internal defect detection using a CW-THz imaging system in XLPE for power cable insulation // Appl. Sci. 2020. V. 10 (6). P. 2055.
18. *Xie S., Yang F., Huang X.* et al. Air gap detection and analysis of XLPE cable insulation based on terahertz time domain spectroscopy // Trans. China Electrotech. Soc. 2020. V. 35 (12). P. 10.
19. *Li S., Cao B., Kang Y.* et al. Nonintrusive inspection of moisture damp in composited insulation structure based on terahertz technology // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2021. V. 70. P. 1—10.