

Научная статья / Research Article

УДК 537.612.2

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-10 кВ**И.С. Макаров***Красноярский государственный аграрный университет, Россия, 660049, Красноярск, пр. Мира, 90*

Аннотация. Представлен анализ современных методов диагностики частичных разрядов (ЧР) в кабельных линиях среднего напряжения (6-10 кВ). Рассмотрены физические основы возникновения дефектов, приведена классификация методов детектирования. Выполнен сравнительный анализ электрических (емкостные датчики, HFCT, катушка Роговского, направленные ответвители), акустических, оптических и новых методов, таких как PD-эхо и корреляционная обработка сигналов. На основе анализа зарубежных и российских источников последних десятилетий выявлены преимущества и ограничения каждого подхода, а также обозначены перспективные направления развития диагностического оборудования, включая применение пассивных оптоволоконных систем и измерение параметров затухания эхо-сигналов для оценки остаточного ресурса изоляции.

Ключевые слова: частичный разряд (ЧР), кабельная линия 6-10 кВ, сшитый полиэтилен (XLPE), HFCT-датчик, направленный ответвитель, акустическая эмиссия, PD-эхо, рефлектометрия, кажущийся заряд.

ANALYSIS OF MODERN DIAGNOSTIC METHODS FOR 6-10 kV CABLE LINES**I.S. Makarov***Krasnoyarsk State Agrarian University, Russia, 660049, Krasnoyarsk, pr. Mira, 90*

Abstract. Analysis of modern methods of partial discharge (PR) diagnostics in medium voltage (6-10 kV) cable lines is presented. Physical basis of defects occurrence is considered, classification of detection methods is given. A comparative analysis of electrical (capacitive sensors, HFCT, Rogowski coil, directional couplers), acoustic, optical and new methods such as PD echo and correlation signal processing was performed. Based on the analysis of foreign and Russian sources of recent decades, the advantages and limitations of each approach have been identified, as well as promising directions for the development of diagnostic equipment, including the use of passive fiber optic systems and the measurement of echo attenuation parameters to assess the residual insulation life.

Keywords: *partial discharge (PR), 6-10 kV cable line, cross-linked polyethylene (XLPE), HFCT sensor, directional coupler, acoustic emission, PD echo, reflectometry, apparent charge.*

Введение. Кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) классов напряжения 6-10 кВ являются основой распределительных сетей мегаполисов и промышленных предприятий. Старение изоляции под воздействием тепловых, электрических и механических нагрузок, а также дефекты монтажа соединительных муфт и оконцеваний являются основными причинами отказов. Именно частичные разряды (ЧР) играют определяющую роль в процессе электрического старения органических диэлектриков [1].

Мировой опыт показывает, что наиболее информативным методом раннего обнаружения дефектов, предотвращающего каскадные аварии, является регистрация именно ЧР [2, 3]. Своевременное выявление ЧР позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию. Однако классические методы, регламентированные стандартом IEC 60270 [4], часто неприменимы в условиях эксплуатации on-line (без отключения кабеля) из-за высокого уровня электромагнитных помех, особенностей распространения высокочастотного сигнала в XLPE-изоляции и конструктивных ограничений кабелей 6-10 кВ. Существует фундаментальная проблема отделения полезного сигнала ЧР (единицы-десятки пКл) от фоновых поверхностных разрядов (единицы-десятки нКл), возникающих на электродах диагностического оборудования (ГОСТ 20074-83) [5]. В данной работе проведен системный анализ современных подходов к диагностике, основанных на регистрации различных физических проявлений ЧР.

Физические основы возникновения и регистрации частичных разрядов. Частичный разряд представляет собой локализованный пробой участка изоляции, обычно возникающий в газовых включениях. Согласно классическим представлениям, изложенным в монографии С.М. Коробейникова и А.Г. Овсянникова [6], развитие ЧР сопровождается генерацией наносекундного импульса тока, который инициирует высокочастотную электромагнитную волну, а также сопутствующие явления: локальный нагрев, ультразвуковые колебания и излучение света. Эти работы также подтверждают, что роль поверхностных зарядов на стенках газовых полостей во многом определяет процессы зажигания, погасания и повторения ЧР, что особенно важно для кабельной изоляции.

Классический подход (IEC 60270) основан на измерении кажущегося заряда (пКл) через измерительный импеданс, включенный последовательно с объектом. Однако для кабелей 6-10 кВ, особенно при диагностике без отключения напряжения (on-line), емкостная связь оказывается подвержена помехам со стороны заземлителей и соседних фаз. Критическое значение имеет частота среза: сигналы ЧР обычно лежат в диапазоне 1-30

МГц, в то время как промышленные помехи сосредоточены ниже 1 МГц. Фундаментальная физическая модель ЧР, разработанная А. Gemant и W. Philipproff (1932) и дополненная в последующих работах [1, 6], объясняет эти частотные характеристики через параметры эквивалентной трех-емкостной схемы замещения дефекта. Современная диагностика смещается в сторону регистрации не самого тока разряда, а его вторичных проявлений или высокочастотных компонент поля, что требует применения специализированных датчиков.

Методы электрической диагностики. *Емкостные датчики и HFCT.* Емкостные датчики (накладные конденсаторы) часто встраиваются в муфты для отбора высокочастотной составляющей потенциала. Чувствительность таких датчиков составляет 0.04-1.2 мВ/пКл, однако они страдают от «мертвых зон» и часто требуют нарушения металлической оболочки кабеля [7]. Более технологичным решением является использование высокочастотных трансформаторов тока (HFCT), надеваемых на заземляющий проводник экрана кабеля. HFCT обеспечивает гальваническую развязку и простоту монтажа. Однако, прямое использование HFCT в распределительных сетях 6-10 кВ затруднено низким соотношением сигнал/шум [8, 9]. Применение вейвлет-фильтрации и метода Бхаттачария (Bhattacharyya distance) позволяет повысить достоверность детектирования, но не решает проблему затухания сигнала в длинных линиях [10].

Катушка Роговского и направленные датчики. Для повышения помехозащищенности предложено использование катушек Роговского (Rogowski coil), которые интегрируют производную тока. Моделирование в ЕМТР-АТР показало, что датчик на основе катушки Роговского способен регистрировать уровни ЧР от единиц нано- до микрокулон и, что критически важно, позволяет с высокой точностью определять время прихода фронта импульса [11, 12]. Это свойство используется в рефлектометрических методах определения места повреждения.

Ключевым прорывом стала концепция «направленного ответвителя» (directional coupler). Физический принцип основан на измерении разности фаз между одновременно регистрируемыми прямыми и отраженными волнами. Направленный ответвитель позволяет отличить внутренний дефект кабеля от внешней короны на оконцевании [13]. Одна из методик определения направления потока мощности потока (PD+D), где графический анализ полярности сигнала на массиве датчиков позволяет точно указать, с какой стороны от точки измерения находится дефект, что критически важно для локализации с односторонним доступом [14].

Оптоволоконные системы без питания на объекте. Особую ценность для кабельных линий 6-10 кВ, которые часто проходят в труднодоступных коллекторах, представляют пассивные датчики, не требующие внешнего питания. Концепция, предложенная в [15], использует электрооптический модулятор (интерферометр Маха-Цендера). В данной системе направленный ответвитель наводит наведенный аналоговый сигнал ЧР на

электрооптический кристалл, изменяя фазу лазерного луча, передаваемого по оптоволокну. Отсутствие активных компонентов (транзисторов, микросхем) на кабеле обеспечивает беспрецедентную надежность. Несмотря на технические сложности, связанные с необходимостью поддержания поляризации излучения, эта технология считается наиболее перспективной для подземных линий 6-10 кВ.

Неэлектрические методы (Акустика). В ситуациях, когда электромагнитные помехи в кабельном отсеке или распределительном устройстве достигают критического уровня (сотни милливольт наводки), на помощь приходит акустическая эмиссия. Газовый пузырь при пробое расширяется, генерируя ультразвуковую волну. В работе [16] приведено развернутое сравнение акустического и электрического методов для кабельных оконцеваний. Преимущества акустики: полная нечувствительность к высокочастотным электромагнитным помехам, возможность объемной локализации дефекта путем перемещения датчика по поверхности муфты и поиска максимума сигнала. Ограничения: сильное затухание высокочастотных ультразвуковых волн (десятки-сотни кГц) в слоистых конструкциях муфт, что требует использования акустического геля и плотного прижима датчика. Также ограничена чувствительность при малых уровнях ЧР (менее 10-20 пКл). Тем не менее, для контроля состояния терминалов и соединительных муфт 6-10 кВ акустический метод рекомендован как верифицирующий для данных, полученных от HFCT [8, 16].

Современный метод: «PD-эхо». Расширением классического подхода является метод «парциального разряда-эхо» (Partial Discharge Echo — PDE). В отличие от традиционной рефлектометрии (TDR), использующей отражения пассивного зондирующего импульса, метод PDE использует специальную «рубленую» последовательность напряжения [17, 18]. При подаче прерывистого высокого напряжения (например, синусоида + пауза) на дефекте накапливается полуперманентный поверхностный заряд. В момент снятия внешнего поля (в бестоковую паузу) остаточное поле E_q разряжается через поверхность диэлектрика. Этот затухающий процесс инициирует серию повторных пробоев («эхо»), которые регистрируются в интервале, свободном от наводок питающей сети. Это позволяет достичь исключительно высокой чувствительности (единицы пКл). В работе [17] выявлены ключевые корреляции:

- Постоянная времени затухания эха τ_e напрямую связана с поверхностным сопротивлением изоляции и степенью ее деградации.
- У электрически состаренных образцов XLPE постоянная времени затухания эха τ_e уменьшилась с 10.42 мс до 1.04 мс.
- Для обмоточных проводов (имитация изоляции двигателя) τ_e упала с 33 мс (новый) до 6.1 мс (деградированный). Этот метод позволяет оценивать не просто наличие дефекта, а степень деградации материала, что является прорывом для оценки остаточного ресурса кабельных линий 6-10 кВ.

Анализ проблем и критика методов. Важно отметить, что эффективность любого метода диагностики резко снижается при наличии производственных дефектов или особенностей контроля. Экспериментально доказано, что при сквозном (проходном) контроле кабельных изделий высоким напряжением (метод «искрового теста») уровень поверхностных разрядов на электродах установки (сотни пКл — единицы нКл) превышает уровень ЧР от мелкого дефекта (единицы-десятки пКл) более чем в 1000 раз [5]. Даже с использованием частотной фильтрации это соотношение удастся снизить лишь до 100 крат. Это означает, что на стадии экструзионного производства кабелей 6-10 кВ диагностика внутренних воздушных включений по уровню ЧР электрическими методами «на проход» практически невозможна. Данный факт необходимо учитывать, разграничивая заводской контроль качества и эксплуатационный мониторинг проложенных линий.

Сравнительный анализ и обсуждение. На основании проведенного анализа составлена сводная таблица применимости методов для кабельных линий 6-10 кВ.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов диагностики ЧР для КЛ 6-10 кВ

Метод / Датчик	Чувствительность (теор.)	Локализация дефекта	Главные ограничения
HFCT (Классический)	5-10 пКл	Требуется 2 датчика	Низкое отношение сигнал/шум, помехи заземлителя
Направленный ответвитель	0.1-1 пКл	Да (по полярности фронта)	Сложность настройки и калибровки
Катушка Роговского	~100 пКл	По времени пробега	Сложность интеграции для кабелей 6-10 кВ
Электроопт. модулятор	~10 пКл	Да (по корреляции)	Высокая стоимость оптоволоконных компонентов
Акустическая эмиссия	10-20 пКл	Да (по максимуму сигнала)	Затухание в муфте, требует контакта
PD-Эхо	0.05-0.1 пКл	Нет (оценка ресурса)	Требуется отключения линии (off-line)

Заключение. Проведенный анализ современных отечественных и зарубежных источников позволил сделать следующие выводы относительно диагностики кабельных линий 6-10 кВ:

1. Ни один из существующих методов не является универсальным. Оптимальной стратегией является гибридный подход: первичный скрининг выполняется направленными датчиками или HFCT, а верификация критических участков — акустическим методом или высокочувствительным PD-эхо в off-line-режиме.

2. Наиболее перспективным направлением для подземных кабелей является создание пассивных оптоволоконных систем, позволяющих осуществлять мониторинг в реальном времени без источника питания на объекте. Это требует дальнейших исследований в области интеграции электрооптических модуляторов непосредственно в кабельные муфты.

3. Цифровая обработка сигналов (вейвлет-фильтрация, расстояние Бхаттачария) является обязательным условием для отделения ЧР от импульсных помех тиристорных преобразователей и силовой электроники, широко распространенных в распределительных сетях.

4. Метод «PD-эхо» открывает возможность оценки не только наличия дефекта, но и степени деградации материала по постоянной времени затухания эхо-сигнала, что крайне актуально для продления ресурса кабельных линий 6-10 кВ.

5. Необходимо различать методы заводского контроля (где доминируют помехи от высоковольтных электродов) и методы эксплуатационного мониторинга, где ключевой проблемой является отстройка от работы смежного оборудования.

Список литературы

1. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях /Г. С. Кучинский// Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние. - 1979. - 224 с.
2. Коробейников С. М. Физические механизмы частичных разрядов : монография /С. М. Коробейников, А. Г. Овсянников// Новосибирск : Изд-во НГТУ. - 2022. - 266 с.
3. Овсянников А. Г. Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения : монография /А. Г. Овсянников// Новосибирск : Изд-во НГТУ. - 2023. - 256 с.
4. Редько В. В. Выявление дефектов изоляции кабельных изделий, приводящих к возникновению частичных разрядов, электроискровым методом контроля /В. В. Редько, А. П. Леонов, Л. Б. Бурцева, Л. А. Редько// Известия Томского политехнического университета. - 2013. - Т. 322. - № 4. - С. 64-69.
5. ГОСТ 20074-83 (IEC 60270). Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М. : Изд-во стандартов, 1984.

6. Florkowski M. Partial discharge echo measurement approach for high voltage insulation assessment / M. Florkowski// Collection: Instrumentation and measurement techniques for high voltage applications. - 2025. - DOI: 10.1007/s13320-014-0146-7.
7. Tian Y. Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints /Y. Tian, P. L. Lewin, A. E. Davies// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2002. - Vol. 9. - No. 4. - P. 604-615.
8. Chambela P. P. Comparison of On-Line Partial Discharge Detection Techniques for High Voltage Power Cable Joints and Terminations /P. P. Chambela, A. T. Mushi// Tanzania Journal of Engineering and Technology. - 2023. - Vol. 42. - No. 1. - P. 146-154.
9. Ruan J. Study on sensitivity characteristic of capacitive coupler for PD detection in HV cable joint /J. Ruan, et al.// IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. - 2019. - Vol. 14. - No. 10. - P. 1442-1449.
10. Ghaedi A. Detection of online PD signals in XLPE cables using the Bhattacharyya distance /A. Ghaedi, M. Moeini-Aghaie, A. Ghaffari// Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. - 2016. - Vol. 24. - No. 5. - P. 3552-3563.
11. Rohani M. N. K. H. Geometrical Shapes Impact on the Performance of ABS-Based Coreless Inductive Sensors for PD Measurement in HV Power Cables /M. N. K. H. Rohani// IEEE Sensors Journal. - 2016. - Vol. 16. - No. 17. - P. 6625-6632.
12. Abdullah A. Z. Modelling and simulation of online partial discharge measurement for medium voltage power cable /A. Z. Abdullah, M. Isa, M. N. K. H. Rohani, et al.// Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. - 2020. - Vol. 9. - No. 2. - P. 427-435.
13. Pommerenke D. Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems /D. Pommerenke, T. Strehl, R. Heinrich //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1999. - Vol. 6. - No. 6. - P. 814-824.
14. Ramirez-Nino J. A simple approach of partial discharge source location in high voltage cables / J. Ramirez-Nino, C. G. Azcarraga, A. Pascacio, R. Mijarez, J. Rodriguez-Rodriguez// Journal of Theoretical and Applied Information Technology. - 2017.
15. Pommerenke D. A novel concept for monitoring partial discharge on EHV-cable system accessories using no active components at the accessories /D. Pommerenke, K. Masterson// Hewlett Packard / NIST. - 1999.
16. Radzi M. I. F. M. Development process and testing of partial discharge detection device on medium voltage XLPE cable/ M. I. F. M. Radzi, N. H. N. Ali, A. M. Ariffin, et al. //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. - 2020. - Vol. 17. - No. 2. - P. 886-894.
17. Florkowski M. Measurement of partial discharge echo and extraction of decay parameters / M. Florkowski// Measurement (Elsevier). - 2024. - Vol. 238. - P. 115338.

18. Florkowski M. Classification of partial discharge images using deep convolutional neural networks /M. Florkowski// Energies. - 2020. - Vol. 13. - No. 20. - P. 5496.

References

1. Kuchinsky G. S. Partial discharges in high-voltage structures/G. S. Kuchinsky//L.: Energy. Leningr. department. - 1979. - 224 p.
2. Korobeinikov S. M. Physical mechanisms of partial discharges: monograph/S. M. Korobeinikov, A. G. Ovsyannikov//Novosibirsk: Publishing House of NSTU. - 2022. - 266 p.
3. Ovsyannikov A. G. Partial discharges and diagnostics of high voltage equipment: monograph/A. G. Ovsyannikov//Novosibirsk: Publishing House of NSTU. - 2023. - 256 p.
4. Redko V.V. Detection of defects in the insulation of cable products leading to the occurrence of partial discharges by the spark test method/V. V. Redko, A.P. Leonov, L. B. Burtseva, L. A. Redko//Izvestia of Tomsk Polytechnic University. - 2013. - T. 322. - № 4. - P. 64-69.
5. GOST 20074-83 (IEC 60270). Electrical equipment and electrical installations. Method for measuring partial discharge characteristics. - M.: Publishing House of Standards, 1984.
6. Florkowski M. Partial discharge echo measurement approach for high voltage insulation assessment / M. Florkowski// Collection: Instrumentation and measurement techniques for high voltage applications. - 2025. - DOI: 10.1007/s13320-014-0146-7.
7. Tian Y. Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints /Y. Tian, P. L. Lewin, A. E. Davies// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2002. - Vol. 9. - No. 4. - P. 604-615.
8. Chambela P. P. Comparison of On-Line Partial Discharge Detection Techniques for High Voltage Power Cable Joints and Terminations /P. P. Chambela, A. T. Mushi// Tanzania Journal of Engineering and Technology. - 2023. - Vol. 42. - No. 1. - P. 146-154.
9. Ruan J. Study on sensitivity characteristic of capacitive coupler for PD detection in HV cable joint /J. Ruan, et al.// IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. - 2019. - Vol. 14. - No. 10. - P. 1442-1449.
10. Ghaedi A. Detection of online PD signals in XLPE cables using the Bhattacharyya distance /A. Ghaedi, M. Moeini-Aghaie, A. Ghaffari// Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. - 2016. - Vol. 24. - No. 5. - P. 3552-3563.
11. Rohani M. N. K. H. Geometrical Shapes Impact on the Performance of ABS-Based Coreless Inductive Sensors for PD Measurement in HV Power Cables /M. N. K. H. Rohani// IEEE Sensors Journal. - 2016. - Vol. 16. - No. 17. - P. 6625-6632.

12. Abdullah A. Z. Modelling and simulation of online partial discharge measurement for medium voltage power cable /A. Z. Abdullah, M. Isa, M. N. K. H. Rohani, et al.// Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. - 2020. - Vol. 9. - No. 2. - P. 427-435.
13. Pommerenke D. Discrimination between internal PD and other pulses using directional coupling sensors on HV cable systems /D. Pommerenke, T. Strehl, R. Heinrich //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1999. - Vol. 6. - No. 6. - P. 814-824.
14. Ramirez-Nino J. A simple approach of partial discharge source location in high voltage cables / J. Ramirez-Nino, C. G. Azcarraga, A. Pascacio, R. Mijarez, J. Rodriguez-Rodriguez// Journal of Theoretical and Applied Information Technology. - 2017. - 240 p.
15. Pommerenke D. A novel concept for monitoring partial discharge on EHV-cable system accessories using no active components at the accessories /D. Pommerenke, K. Masterson// Hewlett Packard / NIST. - 1999.
16. Radzi M. I. F. M. Development process and testing of partial discharge detection device on medium voltage XLPE cable/ M. I. F. M. Radzi, N. H. N. Ali, A. M. Ariffin, et al. //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. - 2020. - Vol. 17. - No. 2. - P. 886-894.
17. Florkowski M. Measurement of partial discharge echo and extraction of decay parameters / M. Florkowski// Measurement (Elsevier). - 2024. - Vol. 238. - P. 115338.
18. Florkowski M. Classification of partial discharge images using deep convolutional neural networks /M. Florkowski// Energies. - 2020. - Vol. 13. - No. 20. - P. 5496.

Сведения об авторах:

Макаров Игорь Александрович, магистрант, Красноярский государственный аграрный университет, электромонтер по ремонту и монтажу кабельных линий ПАО «Россети Сибирь»- «Красноярскэнерго» ПО КЭС.

Information about the authors:

Makarov Igor Alexandrovich, master's student, Krasnoyarsk State Agrarian University, electrician for the repair and installation of cable lines of PJSC Rosseti Siberia - Krasnoyarskenergo IES software.