



ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафигов И.И.

Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

rassel_ipek@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Протяженность и сложность географии магистралей КЛ среднего напряжения находится на высоком уровне. Такие линии распространяются под землей, на опорах в воздухе. Чтобы постоянно поддерживать надежность городского электроснабжения на высоком уровне, следует оперативно исправлять любые перебои и аварии. *ЦЕЛЬ.* Основной целью работы является развитие теории исследования КЛ среднего напряжения, практически и теоретически обоснованный поиск наиболее удобной и эффективной установки для диагностики КЛ, изучение и разработка возможных модификаций установок для диагностики КЛ. *МЕТОДЫ.* Предложен вариант диагностики КЛ на основе установки CPDA-60, позволяющий найти и локализовать места возникновения дефектов в изоляции на основании измерения и анализа частичных разрядов (ЧР). Применима для контроля изоляции во всех типах кабелей высокого напряжения. Установка CPDA может быть использована при испытании вводимых в эксплуатацию новых кабельных линий, и для проведения анализа состояния старых кабелей, находящихся в эксплуатации. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Кабельные линии нуждаются в комплексном подходе к диагностике и мониторингу, так как надежность современных систем аутентификации для генерации и распределения электроэнергии в значительной степени определяется электрической надежностью электрооборудования. Техническое диагностирование оборудования является ключевым звеном, от качества которого зависит эффективность процессов организации производственной деятельности, стратегического планирования и реновации электросетевых активов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Изучение и анализ представленных данных и исследований позволяют сформировать заключение относительно метода измерения и локализации частных разрядов (ЧР) в силовых кабельных линиях (КЛ) с использованием диагностической системы Online Wire Testing System (OWTS). Система OWTS позволяет проводить измерения в реальном времени без прерывания эксплуатации кабельных линий, что делает ее особенно ценной для энергетической индустрии. Благодаря внедрению передовых технологий и алгоритмов обработки сигналов, метод обладает высокой точностью и чувствительностью к минимальным проявлениям частных разрядов, что позволяет не только обнаруживать, но и точно локализовать местоположение дефектов в изоляции. Применение данного метода может значительно увеличить продолжительность эксплуатационного периода силовых кабелей, снизить вероятность внезапных аварий и, как следствие, сократить расходы на ремонт и обслуживание электроэнергетического оборудования. В конечном счете, улучшение методов диагностики и мониторинга, включая метод измерения и локализации ЧР в силовых КЛ с использованием OWTS, представляет собой значительный шаг в направлении повышения надежности и безопасности электроэнергетических систем. Это позволит не только снизить эксплуатационные расходы, но и обеспечить бесперебойное и качественное электроснабжение потребителей.

Ключевые слова: электроэнергетика; испытания; диагностика; кабельные линии; изоляция; частичные разряды.

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафигов И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.

OPTIMIZATION OF MONITORING SYSTEMS POWER CABLE LINES

Balobanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

rassel_ipek@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The length and complexity of the geography of medium voltage cable lines is at a high level. Such lines extend underground, on supports in the air. In order to constantly maintain the reliability of city power supply at a high level, any interruptions and accidents should be promptly corrected. *TARGET.* The main goal of the work is to develop the theory of medium voltage CL research, to practically and theoretically substantiate the search for the most convenient and effective installation for CL diagnostics, to study and develop possible modifications of CL diagnostic installations. *METHODS.* A variant of CL diagnostics based on the CPDA-60 installation is proposed, which makes it possible to find and localize the places where defects occur in the insulation based on the measurement and analysis of partial discharges (PD). Suitable for insulation monitoring in all types of high voltage cables. The CPDA installation can be used when testing new cable lines being put into operation, and to analyze the condition of old cables in operation. *RESULTS.* Cable lines require an integrated approach to diagnostics and monitoring, since the reliability of modern authentication systems for the generation and distribution of electricity is largely determined by the electrical reliability of electrical equipment. Technical diagnostics of equipment is a key link, the quality of which determines the efficiency of the processes of organizing production activities, strategic planning and renovation of electric grid assets. *CONCLUSION.* The study and analysis of the presented data and research allows us to form a conclusion regarding the method of measuring and localizing partial discharges (PD) in power cable lines (CL) using the Online Wire Testing System (OWTS) diagnostic system. The OWTS system allows real-time measurements without interrupting cable lines, making it especially valuable to the energy industry. Thanks to the introduction of advanced technologies and signal processing algorithms, the method has high accuracy and sensitivity to minimal manifestations of private discharges, which allows not only to detect, but also to accurately localize the location of defects in the insulation. The use of this method can significantly increase the service life of power cables, reduce the likelihood of sudden accidents and, as a result, reduce the cost of repair and maintenance of electrical power equipment. Ultimately, improvements in diagnostic and monitoring techniques, including the method of measuring and localizing PD in power lines using OWTS, represent a significant step towards improving the reliability and safety of electrical power systems. This will not only reduce operating costs, but also ensure uninterrupted and high-quality power supply to consumers.

Keywords: power industry; testing; diagnostics; cable line; insulation; partial discharges.

For citation: Balobanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I. Optimization of monitoring systems power cable lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.

Введение (Introduction)

В современных электроэнергетических системах надежность и эффективность передачи электроэнергии являются ключевыми аспектами, обеспечивающими стабильное функционирование как промышленности, так и бытового сектора. Одной из критически важных составляющих таких систем являются силовые кабельные линии, от которых зависит бесперебойное снабжение энергией на любые расстояния. Учитывая высокую значимость этих линий, важнейшим аспектом их эксплуатации становится постоянный мониторинг состояния, позволяющий своевременно выявлять и устранять возможные неисправности, а также предотвращать аварийные ситуации.

Диагностика кабельных линий играет критическую роль в обеспечении надежности и безопасности электротехнических систем. Существуют несколько методов диагностики кабельных линий, каждый из которых имеет свои преимущества и применения. Один из самых распространенных методов — это визуальный осмотр, который позволяет выявить явные повреждения и износы изоляции. Электротехнические измерения, такие как измерение сопротивления изоляции и высоковольтные испытания, помогают обнаружить скрытые дефекты и предсказать сроки возможных отказов. Кроме того, современные

методы, такие как частотный анализ или время-пролётные диагностики (TDR), позволяют с высокой точностью определять места повреждений кабелей и оценивать их состояние. Использование тепловизоров и инфракрасной диагностики также может помочь выявить участки с перегревом, что может свидетельствовать о проблемах в изоляции или соединениях. Комплексное применение этих методов позволяет своевременно обнаруживать и устранять дефекты, обеспечивая долгий срок службы и надежную работу кабельных линий.

Однако традиционные методы мониторинга, зачастую, обладают рядом ограничений, что приводит к необходимости разработки более эффективных и надёжных систем. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий становится не просто желательной, а незаменимой практикой для обеспечения высокого уровня безопасности и надежности энергоснабжения. Этот процесс включает внедрение новейших технологий, алгоритмов анализа данных и систем прогнозирования, позволяющих значительно повысить эффективность контроля и диагностики.

В данной статье рассмотрены основные подходы к оптимизации систем мониторинга силовых кабельных линий, исследованы актуальные проблемы и предложены методы их решения. Также будут обсуждены перспективы использования современных информационно-аналитических платформ и интеллектуальных систем в области мониторинга кабельных сетей.

В кабельных линиях часто возникают проблемы, ведущие к отказам и снижению надежности работы электроэнергетических систем. Одной из главных причин отказов является физическое повреждение, которое может возникнуть вследствие внешних воздействий, таких как землеройные работы, дорожное строительство или даже деятельность животных. Износ изоляции и проводников также является серьезной проблемой, часто обусловленной длительным эксплуатационным сроком или воздействием агрессивных сред, включая влагу и химические реагенты. Электрические перегрузки и короткие замыкания в результате недостаточного мониторинга и обслуживания могут привести к перегреву и возгоранию. Кроме того, человеческий фактор, например ошибки при монтаже и эксплуатации, вносит свой вклад в общий уровень риска отказов кабельных линий.

Из анализа статистики коротких замыканий с 2020 года [1] следует, что более 75% технологических отказов в кабельных линиях напряжением 6-10 кВ происходят из-за пробоев изоляции. Наиболее проблемными элементами являются изоляция кабелей и кабельные муфты, а вероятность пробоя изоляции зависит от ее износа и остаточного ресурса. Вероятность повреждения кабельных муфт связана с качеством материалов и монтажа. Наличие дефектов, таких как газовые или твердотельные включения в изоляции кабеля или кабельных муфт, может привести к развитию ЧР, которые вызывают пробой изоляции.

Мониторинг в реальном времени кабельных линий представляет собой передовую технологию, обеспечивающую непрерывное наблюдение и анализ состояния кабелей в режиме онлайн. С помощью специализированных датчиков и систем автоматического сбора данных, информация о параметрах кабельной системы, таких как напряжение, ток, температура и механические нагрузки, отправляется на центральные серверы для анализа. Это позволяет немедленно выявлять и реагировать на потенциальные неисправности, перегрузки или повреждения, минимизируя риск аварий и простоя оборудования. В итоге, подобные системы значительно повышают надежность и безопасность эксплуатации кабельных линий, снижая затраты на обслуживание и ремонты.

Сейчас целесообразность использования и выбор систем, методов и средств технического диагностирования определяется рядом факторов. В первую очередь это необходимость точной оценки и уменьшения рисков потери оборудования, системного ущерба, убытков от недопоставки электроэнергии и штрафов за нарушение контрактных обязательств, а также соблюдения экологических и безопасности требований. Техническое диагностирование оборудования играет ключевую роль, так как от его качества зависят эффективность организации производственной деятельности, стратегическое планирование и обновление электросетевых активов [2].

На сегодняшний день, развитие во всем мире кабельных распределительных сетей привело к внедрению кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. В настоящее время рынок силовых кабелей большинства развитых с промышленной точки зрения стран Европы практически на 100% занят кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, 4]. Переход от кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) связан как с моральным, так и полностью физическим

устареванием кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Полиэтилен на данный момент является наиболее популярным материалом, применяемым при изготовлении кабелей. Однако обычный полиэтилен нельзя использовать в виде изоляции силовых кабелей, так как он имеет достаточно большое количество серьезных недостатков. Для решения этой проблемы используют так называемый «сшитый» полиэтилен, который не имеет недостатков обычного полиэтилена. На данный момент в России также, как и во всем мире ведется активное внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Современные отечественные заводы по производству кабелей уже освоили технологию изготовления современных кабелей и производят их по принятым мировым стандартам [5, 6].

Но несмотря на все свои достоинства, в процессе эксплуатации силовые кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, подвергаются различным факторам, вызывающим физическое старение и повреждение изоляции, а следовательно, ухудшение электрических и химических свойств изоляции кабельной линии. Для предупреждения аварий на кабельной линии и для разработки последовательности дальнейших действий по замене силовых кабелей с серьезными дефектами или с выработанным ресурсом изоляции необходимо иметь полную и достоверную информацию о текущем состоянии изоляции кабеля [7]. Для оценки состояния кабеля в условиях текущей эксплуатации применяются различные методы испытаний и диагностики, в их числе современные и традиционные методы, которые в некоторых случаях уступают современным методам по эффективности [8].

В современной электроэнергетике используются компактные диагностические системы и приборы для неразрушающего контроля силовых кабельных линий (КЛ) с напряжением до 35 кВ. Среди них:

1. Метод измерения и локализации частичных разрядов в силовых КЛ с помощью диагностической системы OWTS [9].
2. Метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции силовых кабелей, применяющий системы CD 31 и CDS.
3. Метод измерения тока релаксации в изоляции кабелей из сшитого полиэтилена с использованием диагностических систем KDA-1 и CDS.
4. Метод измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей, внедряющий системы OWTS, IDA 200 и другие.
5. Метод импульсной рефлектометрии для предварительной локализации низкоомных повреждений в силовых КЛ с использованием рефлектометров Teleflex, InterFlex и прочих устройств, а также импульсно-дуговой метод для локализации высокоомных повреждений с системой стабилизации дуги.
6. Метод контроля целостности оболочки силовых кабелей и выявления мест неисправностей с использованием приборов MFM 5-1, MVG 5 и аналогичных устройств.

Современные методики диагностики и испытаний находятся на достаточно высоком уровне, чтобы заменить устаревшие методы. Тем не менее они требуют дальнейшего совершенствования для улучшения качества оценки состояния кабельных сетей, повышения надежности их бесперебойной работы и снижения числа аварий.

Научная значимость исследования, посвященного методу измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей с использованием диагностических систем частичных разрядов (OWTS - Oscillating Wave Test System), заключается в следующем:

1. Повышение надежности кабельных систем: Современные кабели часто эксплуатируются в жестких условиях, их изоляция подвергается электрическим, термическим и механическим нагрузкам. Разработка и совершенствование методов диагностики позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные дефекты, предупреждая серьезные аварии и повышая общую надежность кабельных систем.
2. Разработка новых диагностических технологий. Применение систем частичных разрядов, таких как OWTS, представляет собой важный технологический прогресс. Этот метод позволяет проводить неразрушающий контроль изоляции, что является более безопасным и экономически эффективным по сравнению с традиционными методами, которые могут требовать отключения оборудования и проведения сложных и дорогих ремонтных работ.
3. Глубокий анализ диэлектрических свойств: Исследование методики измерения диэлектрических характеристик с применением OWTS-систем позволяет углубить знания о поведении изоляционных материалов под воздействием электрических полей. Это способствует разработке новых материалов с улучшенными характеристиками и долговечностью, а также оптимизации уже существующих изоляционных систем.

4. Теоретический вклад в электротехнику и материаловедение: Работа по изучению параметров частичных разрядов и их влияния на диэлектрические характеристики изоляции делает значительный вклад в теоретические основы электротехники и материаловедения. Понимание механизмов возникновения и развития частичных разрядов способствует более точному моделированию и предсказанию поведения изоляционных систем в реальных условиях эксплуатации.

5. Влияние на стандартизацию и регулирование: Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых стандартов и нормативных документов, регулирующих методы испытаний и диагностики кабельных сетей. Это способствует унификации диагностических процедур и повышению безопасности и надежности кабельных систем.

6. Практическое значение для энергетики и промышленности: Успешное применение OWTS-систем на практике непосредственно влияет на эксплуатационные процессы в энергетических и промышленных предприятиях. Это позволяет снизить затраты на обслуживание и ремонт, улучшить энергетическую эффективность и увеличить срок службы кабельных систем.

Таким образом, исследование метода измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей с использованием диагностических систем OWTS имеет значительное научное и практическое значение, влияя на различные аспекты теории и практики в области электротехники и кабельных технологий.

Материалы и методы (Materials and methods)

Система CPDA (Cable Partial Discharge Analysis) предназначена для мониторинга состояния кабельных линий путем измерения и анализа частичных разрядов (Partial Discharges, PD). Метод OWTS (Oscillating Wave Test System) используется для выявления и локализации дефектов в кабельной изоляции на основе анализа осциллирующих волн.. Недостатком системы OWTS является сложность определения проблемных участков на последних 100 метрах длины кабеля (в зависимости от общей длины КЛ), а также невозможность локализации частичных разрядов в кабельных линиях длиной менее 80 метров без дополнительных мер [10, 11]. В связи с этим диагностика каждой кабельной линии обязательно должна проводиться с обоих её концов, тогда как обследование кабеля только с одной стороны допускается лишь в исключительных случаях. В общем случае должно применяться одно из следующих технических решений [11, 12].

- 1) Диагностика с обоих концов КЛ – для КЛ длиной более 80 м.
- 2) Диагностика двух КЛ, соединенных пофазно на противоположном конце (если энергоснабжение объекта осуществляется двумя и более параллельными КЛ, или транзитом через промежуточный объект).
- 3) Диагностика с дополнительным кабелем, присоединенным к дальнему или ближнему концу КЛ.

Могут возникать ситуации, когда подключение диагностической аппаратуры с одной из сторон КЛ трудно реализуемо, в силу причин организационного или производственного характера. В таких случаях КЛ необходимо диагностировать с одной стороны, однако дополнительно следует провести измерения с соединенными фазами на противоположном конце КЛ [13, 14].

Для КЛ длиной менее 80 м такой способ диагностики является основным. Если ЧР не фиксируются, то необходимость в измерениях с соединенными фазами на противоположном конце КЛ отпадает.

Если энергоснабжение объекта осуществляется двумя и более параллельными КЛ либо транзитом через промежуточный объект, то допускается проводить диагностику одновременно двух КЛ, соединенных пофазно на противоположном конце линии (этот способ обязателен при длине параллельных линий менее 80 м). При этом суммарная длина КЛ должна быть не более 1500 м, а каждую КЛ следует продиагностировать отдельно, с одной стороны. В исключительных случаях допускается не диагностировать КЛ отдельно [15, 16].

Вместо штатного дополнительного кабеля может применяться другой кабель, если таковой имеется у заказчика. Например, для искусственного удлинения КЛ с БПИ целесообразнее использовать кабель также с БПИ.

Следует иметь в виду, что в некоторых случаях устройство прижимного механизма (как правило, пружинный) присоединительного кабеля может вызывать помехи в месте его присоединения к жилам испытуемого кабеля, которые ошибочно могут быть приняты за ЧР [17, 18]. Также при проведении диагностических испытаний следует учитывать возможные помехи от сторонних источников.

В России есть ряд компаний, специализирующихся на автоматизации проектирования и изготовлении компонентов для электрических распределительных систем, таких как ООО «ЭнергоПроект», ИнСим и ООО «Димрус». Например, переносная система контроля изоляции кабельных линий по методу «OWTS» типа CPDA [19,20], производства отечественной компанией ООО «Димрус» (рис. 1).

Система CPDA доступна в различных вариантах, в зависимости от максимального тестируемого напряжения. В её состав обычно входят высоковольтный источник питания, генератор сигналов, система ввода сигнала, датчики частичных разрядов, система обработки сигналов, калибратор, программное обеспечение для анализа данных, система синхронизации, а также набор соединительных кабелей и проводов.

Для того чтобы проанализировать данные, полученные системой CPDA, нужно проводить несколько измерений (выборок). Это необходимо потому, что каждый отдельный замер может содержать случайные импульсы частичных разрядов, которые не повторяются и могут возникать даже в исправных кабельных линиях. При анализе данных основное внимание следует уделить определению места возникновения повторяющихся частичных разрядов.



Рис. 1. Система «CPDA-60»

Fig. 1. System «CPDA-60»

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Основные параметры, которые следует определить при анализе данных, включают величину частичных разрядов (ЧР), место их возникновения, напряжение при инициации и гашении ЧР, а также количество ЧР в локальной зоне кабельной линии (КЛ).

Состояние кабельной линии оценивается посредством измерения и анализа частичных разрядов с использованием интегрированной экспертной системы «PD-Expert».

Перед началом измерений проводится градуировка системы с помощью градуировочного генератора, подключенного параллельно. Затем кабельную линию заряжают постоянным током небольшой силы, обычно несколько миллиампер, до испытательного напряжения, которое, как правило, не превышает амплитудное линейное значение. После зарядки емкости кабельной линии высоковольтный контактор К замыкается, что приводит к разряду накопленного электричества на землю через индуктивность L , величина которой составляет примерно 0,5–1 Гн. Это создает затухающие синусоидальные колебания в диапазоне 20–1000 Гц в контуре, состоящем из емкости кабеля и индуктивности катушки, в зависимости от емкости тестируемого объекта. В этот момент производится регистрация частичных разрядов (рис. 2).

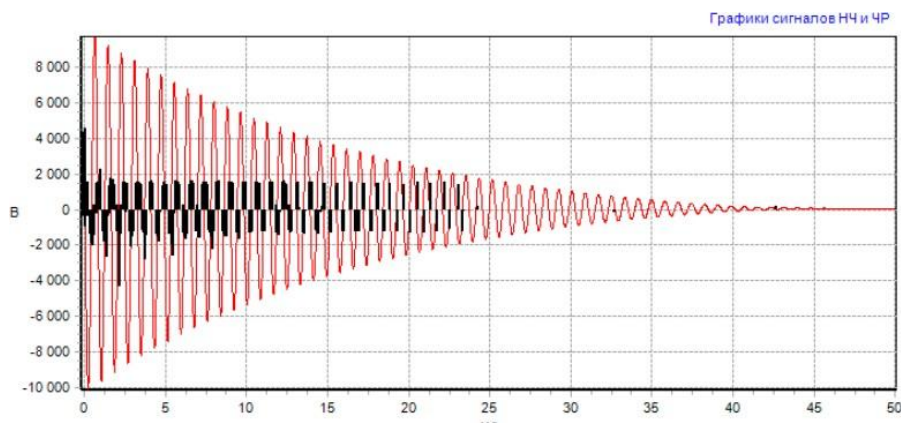


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и ЧР, полученная на установке CPDA

Fig. 2. Voltage and PD oscillogram obtained on a CPDA setup

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Диагностику с использованием CPDA рекомендуется выполнять по заранее составленной программе, включающей несколько измерений с постепенным увеличением испытательного напряжения. Шаг повышения напряжения рекомендуется выбирать равным 1 кВ или $0,1U_0$ (где U_0 – линейное напряжение). Количество повторений для значений ниже $0,7U_0$ можно установить от 1 до 2 раз. Эти измерения необходимы для определения напряжения, при котором возникают частичные разряды (ЧР). При испытательных напряжениях выше $0,7U_0$ рекомендуется проводить больше измерений, чтобы собрать больше данных для анализа.

Преимущество таких установок, как CPDA, заключается также в возможности локализации частичных разрядов по длине кабельной линии с помощью рефлектометрического метода, основанного на определении времени регистрации прямого и отраженного от противоположного конца кабеля сигналов.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Ключевым шагом после измерения характеристик частичных разрядов в кабельной линии является оценка диагностических результатов и составление заключения. Для этого необходимо иметь критерии для оценки критичности частичных разрядов на основании их характеристик.

Рассмотрим результаты испытаний, проведённых на установке CPDA-60 для кабельной линии 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Диагностика выполнялась на кабеле АПВБВнг(А)-LS-35(3х150) АПВПу 1х150-50-35 длиной 2595 м.

В результате измерений, программный комплекс, встроенный в блок обработки сигналов, анализирует собранные данные и представляет их в графическом и цифровом формате.

Амплитудное распределение и гистограмма по длине кабеля (рис. 3, 4) отчётливо показывают участки кабельной линии, где возможно развитие дефектов изоляции.

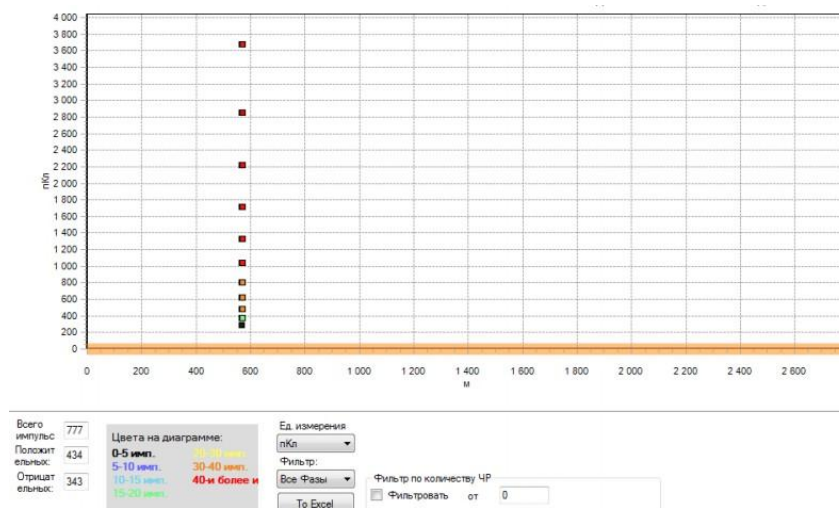


Рис. 3. Амплитудное распределение ЧР по длине кабеля

Fig. 3. Amplitude distribution of PD along the cable length

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

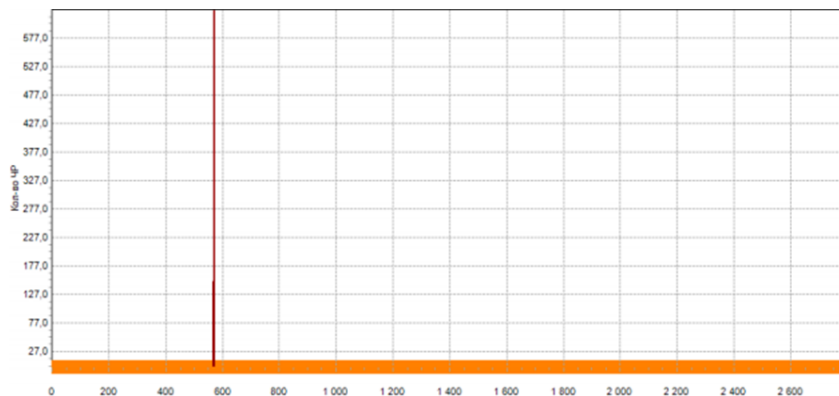


Рис. 4. Гистограмма распределения ЧР по длине кабеля

Fig. 4. Histogram of PD distribution along the cable length

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В ходе экспериментов система CPDA успешно обнаружила частичные разряды во всех тестируемых кабельных образцах. Максимальная чувствительность системы составила 0.5 пикокулонов (pC) в диапазоне частот от 30 до 300 МГц.

Амплитудно-фазовое распределение импульсов частичных разрядов (фазовая диаграмма), представленное на рисунке 5, демонстрирует их распределение и амплитуды в рамках одного периода колебания напряжения. Это даёт возможность выявить тип дефекта.

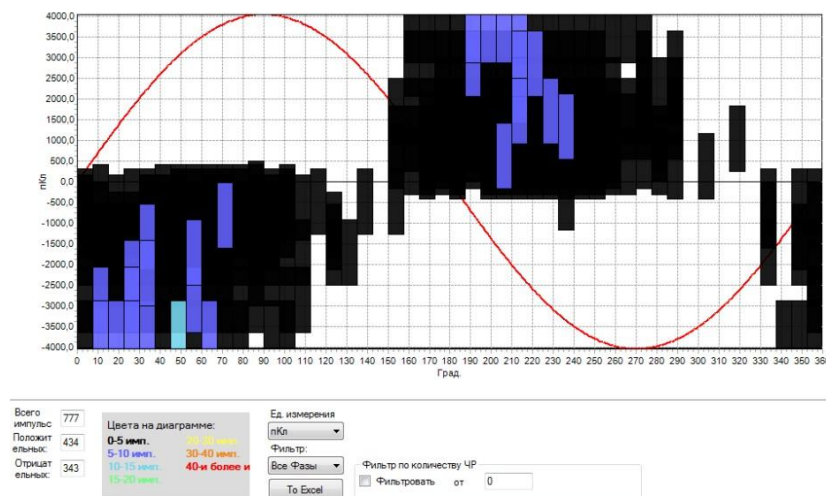


Рис. 5. Амплитудно-фазовое распределение импульсов ЧР Fig. 5. Amplitude-phase distribution of PD pulses

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты исследования показали, что система CPDA представляет собой эффективный инструмент для анализа и диагностики кабельных линий. Ее способность детектировать и локализовать частичные разряды с высокой точностью и в реальном времени предоставляет значительные преимущества по сравнению с традиционными методами. Однако требуется дальнейшее совершенствование алгоритмов обработки и адаптация системы к различным условиям эксплуатации.

Заключение (Conclusions)

В заключение можно отметить, что использование диагностической системы OWTS (Oscillating Wave Test System) для измерения и локализации частичных разрядов в силовых кабельных линиях (КЛ) представляет собой эффективный и передовой метод диагностики состояния кабельных сетей. Система OWTS позволяет не только выявлять наличие частичных разрядов, но и точно определять их локализацию, что значительно упрощает процесс технического обслуживания и ремонта кабелей.

Рассмотренные в статье методики и результаты исследований подтверждают, что OWTS обладает высокой точностью и надежностью, позволяя обнаруживать дефекты на ранних стадиях развития. Это позволяет существенно повысить эксплуатационную надежность кабельных линий, минимизируя риски аварийных ситуаций и внезапных выходов из строя оборудования.

Применение OWTS особенно актуально в условиях возрастающего энергетического потребления и необходимости повышения надежности электроснабжения. Внедрение таких диагностических систем в практику эксплуатации кабельных сетей способствует увеличению срока службы кабелей, снижению затрат на ремонт и обслуживание, а также повышению общей эффективности работы энергетической инфраструктуры.

Таким образом, метод измерения и локализации частичных разрядов с помощью системы OWTS является важным инструментом в арсенале современных диагностических технологий, обеспечивающим высокое качество и надежность эксплуатации силовых кабельных линий. Однако следует упомянуть и факторы, которые пока что не позволяют полностью отказаться от испытаний повышенным напряжением. Важным недостатком при полевой диагностике кабельных линий, помимо невозможности определения некоторых видов дефектов, являются сложности с интерпретацией результатов, ввиду достаточно большой подверженности влиянию помех.

Литература

1. Коржов А. В. и др. Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6 (10) кВ //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23. – №. 4. – С. 5-13.

2. Малабаев Б. К., Байгазиев А. А. Диагностирование кабельных линий в электрических сетях 6-35 кВ // Научные исследования – основа современной инновационной системы. – 2023. – С. 197.
3. Методика обнаружения опасных зон в изоляции кабельных линий по характеристикам частичных разрядов / А. Ю. Кубарев, А. Е. Усачев, Т. В. Лопухова, Ю. Г. Кубарев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1-2. – С. 187-190.
4. Поляков Д. А. и др. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // Омский научный вестник. – 2020. – №. 6 (174). – С. 63-68.
5. Соловьева Т. А. Диагностика местных неисправностей в кабельных линиях при помощи измерения частичных разрядов (ЧР) // Научный журнал молодых ученых. – 2022. – №. 2 (27). – С. 76-81.
6. Сафин А. И., Парвазетдинов К. Л., Долманюк Л. В. Анализ неразрушающих методов диагностики кабельных линий // ББК 72 Ф 97. – 2023.
7. Шепелев А. О., Осипов Д. С., Ткаченко В. А. Development of correction coefficients for cable cross-sections selection in polymeric cable channel // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2024. – Т. 335. – №. 3. – С. 7-16.
8. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. — Новосибирск: Наука, 2007.
9. Волохович А. Б., Кокорин А. Е. Результаты массового обследования кабельных линий 6-35 кВ установками CPDA // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – №. 3. – С. 39-47.
10. Мифтахова Н. К. и др. Методика оценки результатов диагностики кабельных линий среднего напряжения с применением вероятностной модели надежности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – №. 5-6. – С. 114-118.
11. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends // Measurement. – 2023. – С. 112882.
12. Степанов, В.М. Методы местонахождения повреждённых участков кабельных линий напряжением 35-500кВ / В.М. Степанов, П.А. Борисов. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып.3. – Ч.5. – С.94-97.
13. Hassan W. et al. Investigating the progression of insulation degradation in power cable based on partial discharge measurements // Electric Power Systems Research. – 2023. – Т. 221. – С. 109452.
14. Kumar H. et al. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques // Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 5. – С. 1142.
15. Беляков, В.В. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев // Электро, 2008. – №5. – С. 38 – 40.
16. Fikri M., Abdul-Malek Z. Partial discharge diagnosis and remaining useful lifetime in XLPE extruded power cables under DC voltage: a review // Electrical Engineering. – 2023. – Т. 105. – №. 6. – С. 4195-4212.
17. Казанина И. В., Хадыева А. Р. Эффективность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с системой мониторинга. // Вестник электротехники. – 2013. – №4. – С. 14.
18. Борисов, П.А. Модель электротехнического комплекса диагностики технического состояния силовых кабельных линий / В.М. Степанов, П.А. Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013.
19. Sun C. et al. Convolutional Neural Network-Based Pattern Recognition of Partial Discharge in High-Speed Electric-Multiple-Unit Cable Termination // Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 8. – С. 2660.
20. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends // Measurement. – 2023. – С. 112882.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru

Булатова Венера Михайловна – канд. пед. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: bulatovavenera@mail.ru

Крючков Никита Сергеевич – бакалавр, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: makintoshrg53@gmail.com

Шафигов Ильмир Ильдарович – бакалавр, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: 07ilmir07@gmail.com

References

1. Korzhov A.V. et al. Analysis of statistics of technological violations in cable distribution networks 6 (10) kV // Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. – 2023. – Т. 23. – No. 4. – pp. 5-13.
2. Malabaev B.K., Baygaziev A.A. Diagnosis of cable lines in electrical networks 6-35 kV // Scientific research - the basis of the modern innovation system. – 2023. – P. 197.
3. Methods for detecting hazardous areas in the insulation of cable lines based on the characteristics of partial discharges / A. Yu. Kubarev, A. E. Usachev, T. V. Lopukhova, Yu. G. Kubarev // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2012. – No. 1-2. – pp. 187-190.
4. Polyakov D. A. et al. Study of the characteristics of partial discharges in artificial defects in power lines // Omsk Scientific Bulletin. – 2020. – No. 6 (174). – pp. 63-68.
5. Solovyova T. A. Diagnosis of local faults in cable lines using partial discharge (PD) measurements // Scientific journal of young scientists. – 2022. – No. 2 (27). – P. 76-81.
6. Safin A.I., Parvazetdinov K.L., Dolomanyuk L.V. Analysis of non-destructive methods for diagnosing cable lines //BBK 72 F 97. – 2023.
7. Shepelev A. O., Osipov D. S., Tkachenko V. A. Development of correction coefficients for cable cross-sections selection in polymeric cable channel //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2024. – Т. 335. – No. 3. – pp. 7-16.
8. Vdoviko V. P. Partial discharges in diagnosing high-voltage equipment. - Novosibirsk: Science, 2007.
9. Dimrus LLC. "Cable line insulation monitoring system "CPDA". Operation manual."
10. Miftakhova N.K., Ivshin I.V., Gavrilov V.A., Gimadiev R.A. Methodology for assessing the results of diagnostics of medium voltage cable lines using a probabilistic reliability model. - Kazan State Energy University, 2013.
11. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – P. 112882.
12. Stepanov, V.M. Methods for locating damaged sections of cable lines with voltage 35-500 kV / V.M. Stepanov, P.A. Borisov. // News of Tula State University. Technical science. – 2010. – Issue 3. – Part 5. – P.94-97.
13. Hassan W. et al. Investigating the progression of insulation degradation in power cable based on partial discharge measurements //Electric Power Systems Research. – 2023. – Т. 221. – P. 109452.
14. Kumar H. et al. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques // Energies. – 2024. – Т. 17. – No. 5. – P. 1142.
15. Belyakov, V.V. Monitoring of power cable lines with adaptation to environmental conditions in real time / V.V. Belyakov, A.V. Malyshev // Electro, 2008. – No. 5. – P. 38 – 40.
16. Fikri M., Abdul-Malek Z. Partial discharge diagnosis and remaining useful lifetime in XLPE extruded power cables under DC voltage: a review //Electrical Engineering. – 2023. – Т. 105. – No. 6. – pp. 4195-4212.
17. Kazanina I.V., Khadyeva A.R. Efficiency of using cables with cross-linked polyethylene insulation with a monitoring system. // Bulletin of Electrical Engineering. – 2013. – No. 4. – P. 14.
18. Borisov, P.A. Model of an electrical engineering complex for diagnosing the technical condition of power cable lines / V.M. Stepanov, P.A. Borisov // News of Tula State University. Technical science. - 2013.
19. Sun C. et al. Convolutional Neural Network-Based Pattern Recognition of Partial Discharge in High-Speed Electric-Multiple-Unit Cable Termination //Sensors. – 2024. – Т. 24. – No. 8. – P. 2660.
20. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – P. 112882.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Venera M. Bulatova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Nikita S. Kryuchkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

© Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И.

Ilmir I. Shafikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 30.06.2024 г.

Отредактировано 23.07.2024 г.

Принято 30.07.2024 г.