

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В СПЭ-ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

В работе проведено моделирование картины напряженности электрического поля в кабеле при наличии одного и нескольких дефектов. Моделирование показало, что наличие нескольких близкорасположенных дефектов не приводит к увеличению напряженности электрического поля по сравнению с одним дефектом. На основе экспериментальных исследований был произведен анализ влияния количества дефектов, возникающих в области концевой заделки кабеля со сшитой полиэтиленовой изоляцией на различные параметры частичных разрядов, такие как величина кажущегося заряда, мощность частичных разрядов, амплитудно фазное распределение частичных разрядов, форма сигналов частичных разрядов. Анализ показал, что увеличение количества дефектов не влияет на характеристики частичных разрядов, несмотря на то, что дефекты расположены в разных участках кабеля, имеющего распределенные параметры. Таким образом, определение количества дефектов в ходе измерения частичных разрядов кабеля может оказаться затруднительным.

**Ключевые слова:** пробой изоляции, дефект изоляции, частичный разряд, множественные дефекты, диагностика изоляции.

**Введение.** Диагностика электрооборудования — важная часть современной электроэнергетики. Благодаря методам диагностики дефекты изоляции могут быть обнаружены до возникновения аварийных ситуаций [1]. Следовательно, проведение профилактических мер позволяет снизить возможный ущерб, вызванный пробоем изоляции оборудования.

Отличительной особенностью электроэнергетической системы России является большая суммарная протяженность линий электропередачи, значительную часть которых занимают кабельные линии. Они получили широкое распространение в сетях крупных городов и заводов. На надежность воздушных линий электропередач во многом влияет состояние изоляторов [2]. В свою очередь, надежная работа кабельных линий зависит от качества и состояния их изоляционного материала. Таким образом, контроль состояния изоляции кабельных линий повышает надежность работы электроэнергетической системы в течение всего срока эксплуатации. Однако, в отличие от изоляторов воздушной линии, состояние изоляции кабелей нельзя определить без применения сложного диагностического оборудования. Такое оборудование позволяет выявить наличие опасных дефектов изоляции в мо-

мент проведения измерения. Однако, ввиду того что механизм старения и разрушения изоляции имеет комплексный характер, дефект может появиться и развиваться в достаточно короткий срок [3]. Более того, факторы, влияющие на состояние изоляции, могут постоянно изменяться во времени. Поэтому на данный момент не существует способов предсказать наступление пробоя с достаточной точностью. Тем не менее существует тенденция внедрения комплексных автоматизированных систем контроля и диагностики состояния изоляции кабельных линий ответственных потребителей. Работая в режиме online, такие системы не требуют участия обслуживающего персонала и позволяют вести одновременное наблюдение за несколькими кабельными линиями. Однако ввиду сложных химических и электродинамических процессов, протекающих в изоляции кабелей, такие системы нуждаются в доработке методов контроля и диагностики.

**Постановка задачи.** Данная работа посвящена исследованию характеристик частичных разрядов (ЧР) и сравнению амплитудно-фазного распределения частичных разрядов (АФРЧР) в зависимости от количества дефектов в изоляции одного кабеля. Так как при большом количестве дефектов изоляции вероятность развития

одного из них до критической величины увеличивается, информация о количестве дефектов позволит лучше понимать риск возникновения пробоя. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы при создании автоматизированной системы контроля изоляции.

Для получения требуемых результатов были выполнены следующие работы:

- моделирование электрического поля при нескольких искусственных дефектах кабеля;
- подготовка образцов кабелей и экспериментальной установки;
- создание искусственных дефектов кабеля;
- измерения частичных разрядов в образцах кабеля с использованием испытательной установки напряжения;
- анализ результатов.

**Теория.** В подавляющем большинстве случаев диагностика состояния изоляции кабельных линий ограничивается общими испытаниями. К ним можно отнести испытание повышенным напряжением, измерение сопротивления изоляции, визуальный осмотр. Одним из дополнительных тестов является измерение  $\tan \delta$ . Его достоинством является возможность проведения измерения без отключения кабельной линии.  $\tan \delta$  показывает степень разрушения изоляции водными триингами, что оказывает влияние на сопротивление изоляции. Однако этот метод не позволяет определить местонахождение дефекта или предсказать время до наступления пробоя. Широкое распространение получает другой метод испытаний — измерение и анализ частичных разрядов. ЧР являются одним из основных механизмов деградации изоляционных материалов [4]. Возникая в изоляции высоко-

вольтного оборудования, они постепенно приводят к ее износу. Несмотря на то, что о частичных разрядах известно с середины прошлого века, наиболее значимые результаты в области их диагностики были получены за последние 20–30 лет. Это стало возможно благодаря развитию цифровой техники и увеличению доступности аналого-цифровых преобразователей с высокой частотой дискретизации.

Область применения данного метода обширна и включает в себя диагностику кабелей [5], трансформаторов [6], воздушных линий [7], вращающихся машин [8], элегазовых распределительных устройств [9], оборудования подстанций и т. д. Одним из преимуществ такой диагностики является возможность определить местонахождение дефекта внутри контролируемого оборудования [10–11]. Кроме того, одним из перспективных направлений исследования в этой области является определение методов прогнозирования пробоя изоляции [12] в целях проведения своевременного обслуживания оборудования.

**Математическое моделирование.** Возникновение естественных дефектов в изоляции — длительный процесс, обусловленный множеством различных внешних факторов, оказывающих влияние на кабель (температура, влажность, химическая среда, перенапряжения и т. д.).

В реальных условиях дефект может появиться в области высоковольтного электрода (жила кабеля) или внутри изоляционного слоя без контакта с каким-либо электродом. Однако такие дефекты могут возникнуть только при изготовлении кабеля на заводе. Все образцы кабелей после изготовления проходят контроль по допустимым значениям частичных разрядов, поэтому вероят-

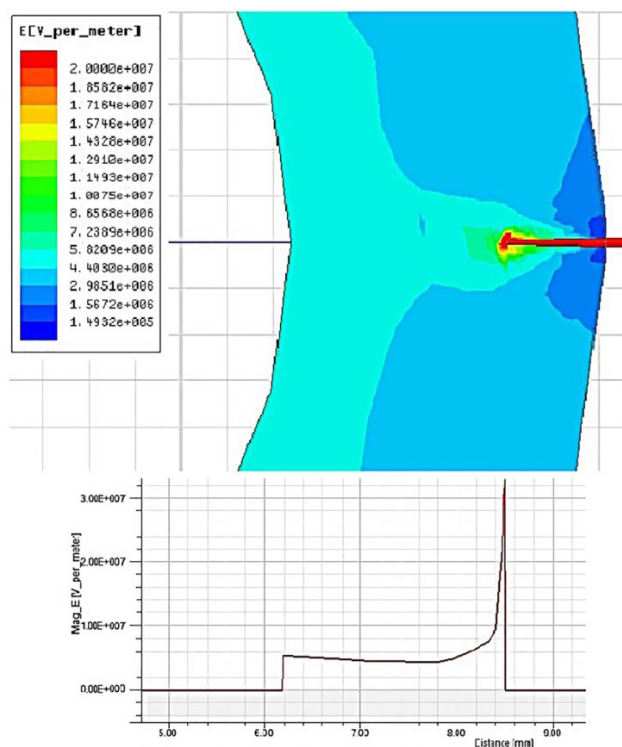


Рис. 1. Напряженность электрического поля при наличии одного дефекта

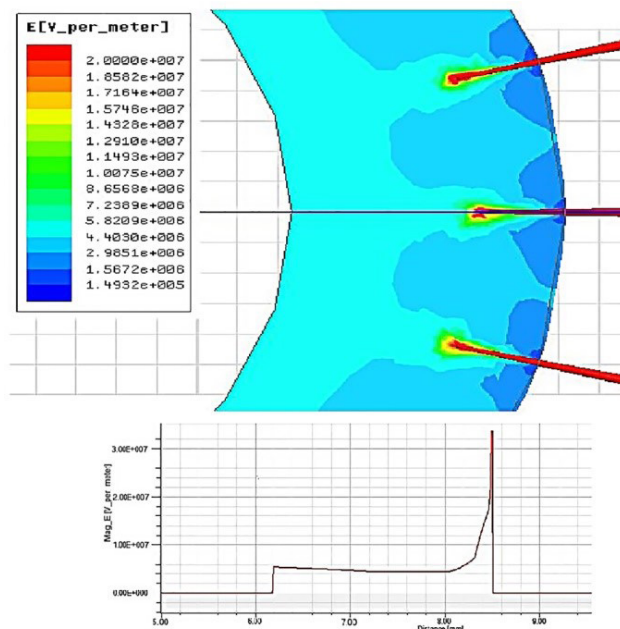


Рис. 2. Напряженность электрического поля при наличии трех близкорасположенных дефектов

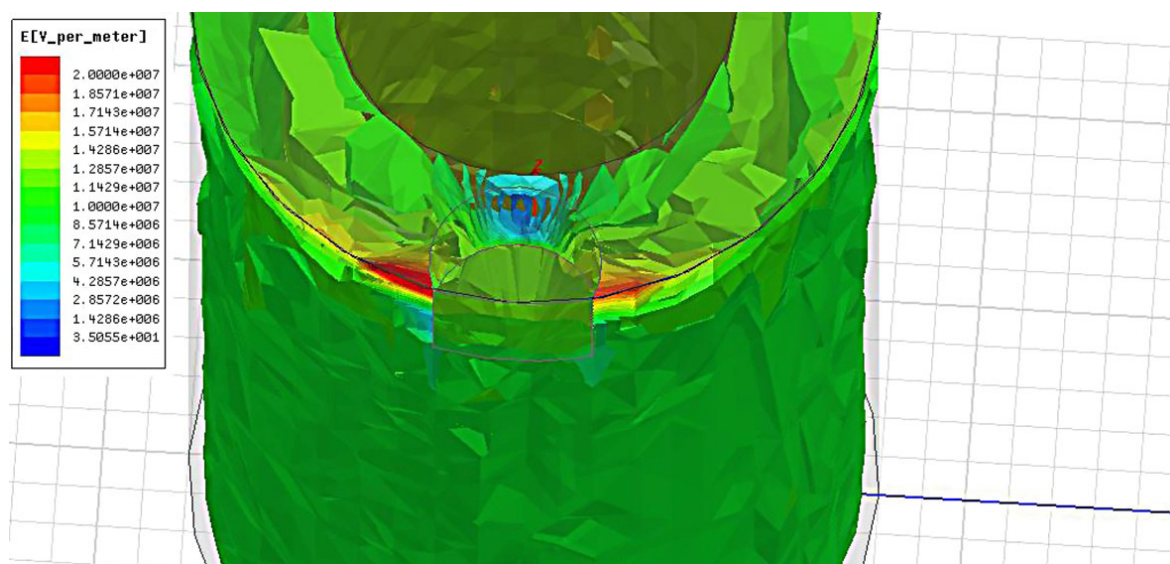


Рис. 3. Электрическое поле при дефекте концевой заделки кабеля

ность выпуска ответственным изготовителем некачественно сконструированного кабеля минимальна.

Более того, значительную часть опасных дефектов в изоляции кабелей составляют искусственные дефекты, созданные эксплуатирующим персоналом в ходе установки концевых и соединительных муфт, то есть в ходе монтажа кабеля. Поэтому в данной работе исследуются искусственные дефекты в области концевой заделки кабеля.

Искусственные дефекты в кабелях можно моделировать путем создания неоднородностей электрического поля. Это может быть дефект концевой заделки кабеля или игольчатый электрод, установленный внутри изоляционного слоя. Кроме того, игольчатый электрод обычно может

быть частью заземляющего электрода системы изоляции. Электрическое поле моделировалось при наличии одного и нескольких дефектов, расположенных поблизости. Целью моделирования являлось подтверждением наличия неоднородности электрического поля в области дефекта, а также определения влияния наличия нескольких дефектов на картину поля. В модели отображены искусственные дефекты в виде игольчатых электродов, заглубленных на 1,5 мм в слой изоляции, а также дефект концевой заделки. Результаты моделирования показаны на рис. 1–3.

Анализ результатов моделирования показал, что наличие дефекта приводит к неоднородности электрического поля и к повышению его напряженности вблизи дефекта. При наличии нескольких дефектов увеличивается область

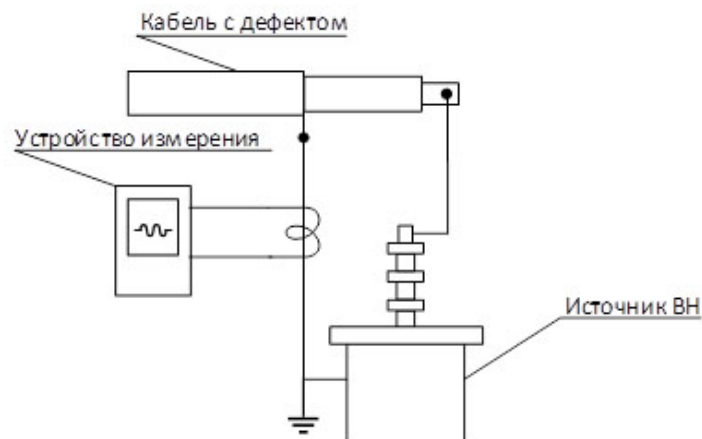


Рис. 4. Экспериментальная установка

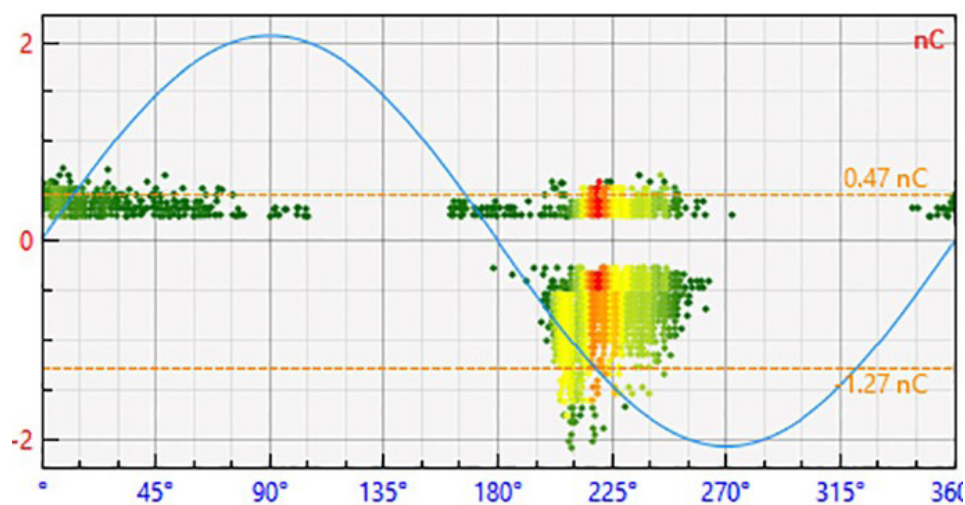


Рис. 5. Картина АФРЧР при одном дефекте образца кабеля

неоднородности электрического поля, однако напряженность поля в области дефекта не возрастает.

**Экспериментальные исследования.** Исследование выполнено на образцах одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 95 мм<sup>2</sup> и экраном из сшитого полиэтилена номинального напряжения 10 кВ. Данные кабели обычно испытывают с использованием повышенного напряжения 25 кВ.

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из источника переменного напряжения до 50 кВ и коммерческого устройства для измерения частичных разрядов.

В начале эксперимента каждый образец кабеля с дефектом концевой заделки был испытан на наличие частичных разрядов в диапазоне напряжений от 10 кВ до 25 кВ. Частичные разряды в дефектах были зарегистрированы на минимальном напряжении 10 кВ. Но для более выраженных результатов исследования необходимо увеличить их интенсивность за счет увеличения напряжения. Начиная с 15 кВ, были зарегистрированы поверхностные разряды. Однако для повышения достоверности результатов измерений необходимо получить диаграммы амплитудно-фазного распределения частичных разрядов

с минимальным уровнем поверхностных разрядов. Поэтому для измерения было выбрано напряжение 13 кВ.

В ходе экспериментов были получены картины АФРЧР для образцов кабеля с количеством дефектов от одного до шести. Экспериментальная установка была откалибрована с использованием промышленного генератора кажущегося заряда частичных разрядов. Результаты измерений показаны на рис. 5–10.

В ходе экспериментов было отмечено, что в образце кабеля с множественными дефектами форма импульсов ЧР существенно не различалась. Единственный параметр, который изменялся при различном числе дефектов, — величина. Примеры форм импульсов ЧР приведены на рис. 11. Кажущиеся заряды и интенсивность ЧР при различном числе дефектов приведены на рис. 12.

**Обсуждение результатов.** Результаты измерения частичных разрядов показали схожие картины АФРЧР для разного количества дефектов. Все картины показывают наличие дефекта заземляющего электрода, поскольку сигналы в основном сосредоточены в поле отрицательной полуволны напряжения источника. Это было ожидаемо, так как все искусственные дефекты находятся в об-

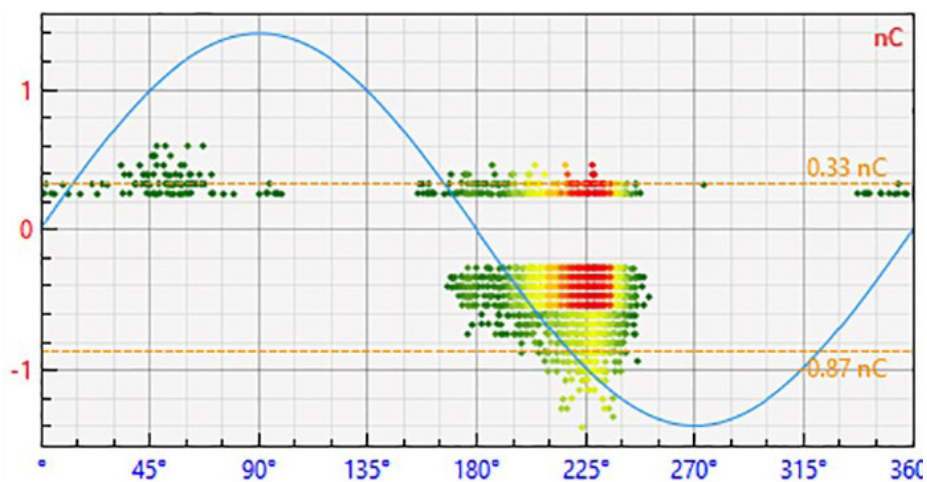


Рис. 6. Картина АФРЧР при двух дефектах образца кабеля

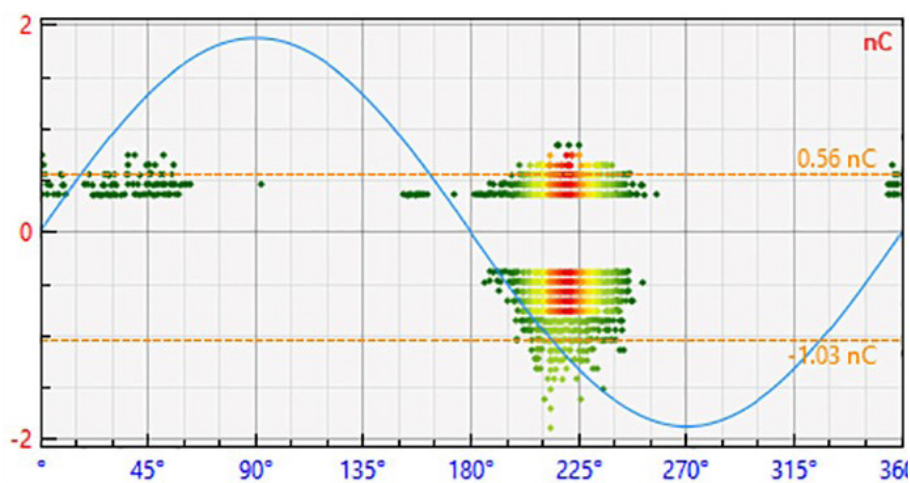


Рис. 7. Картина АФРЧР при трех дефектах образца кабеля

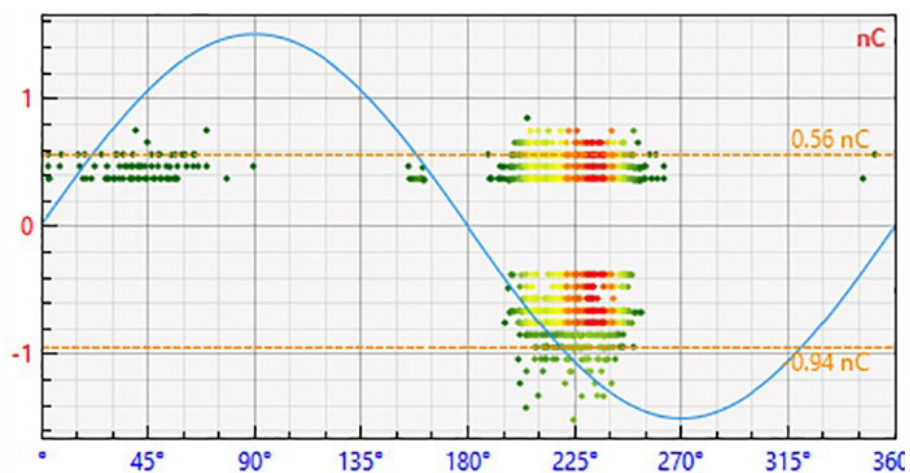


Рис. 8. Картина АФРЧР при четырех дефектах образца кабеля

ласти заземляющего электрода (искусственные дефекты заделки кабеля на поверхности изоляции, дефекты игольчатого заземляющего электрода внутри изоляции на глубине 1–2 мм).

Неожиданным результатом стала схожая форма импульсов частичных разрядов при различном количестве дефектов. Несмотря на относительно

небольшую длину образца кабеля (около 3 м), разные источники частичных разрядов должны генерировать импульсы частичных разрядов различной формы. Поскольку одиночный частичный разряд представляет собой переходный процесс в цепи, содержащей кабельную линию с распределенными параметрами. Таким образом, с уче-

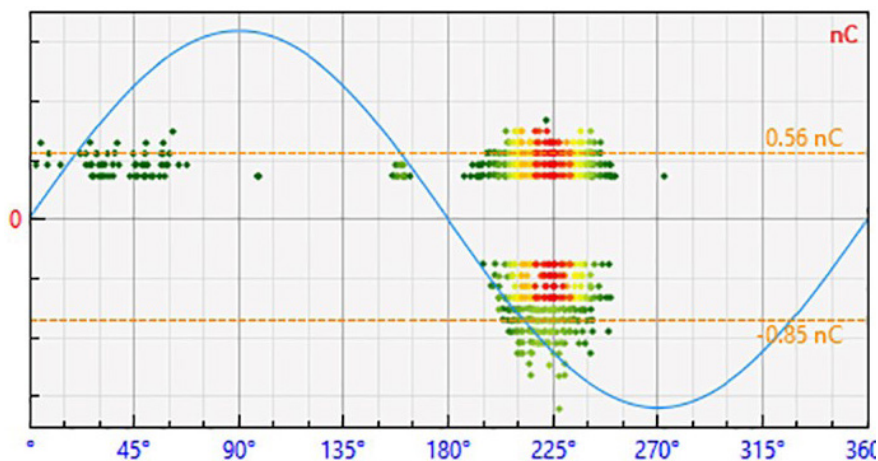


Рис. 9. Картина АФРЧР при пяти дефектах образца кабеля

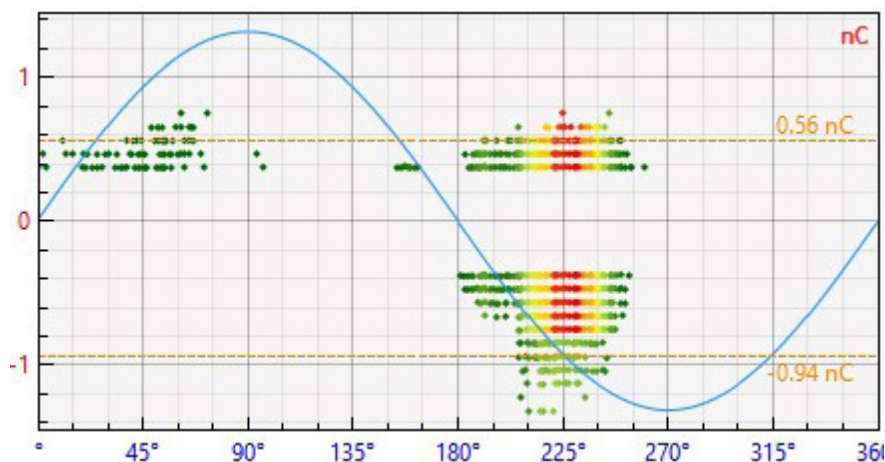


Рис. 10. Картина АФРЧР при шести дефектах образца кабеля

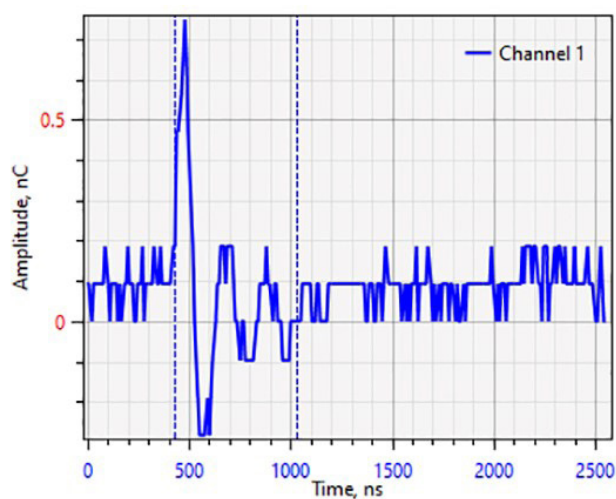
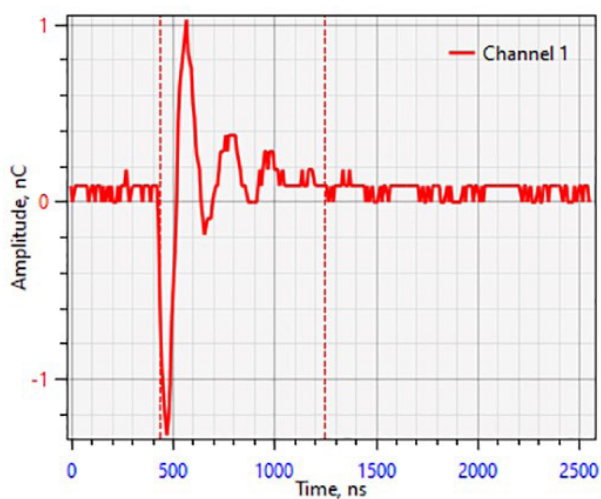


Рис. 11. Пример формы импульса ЧР

том различного расположения искусственных дефектов импульсы частичных разрядов должны различаться. Однако все импульсы имеют одинаковую форму и длительность во времени.

Еще один важный результат — это кажущийся заряд и интенсивность частичных разрядов.

Результаты измерений не показали зависимости данных величин от количества дефектов. Более того, кажущийся заряд ЧР был наибольшим при наличии одного дефекта. Этот факт может быть связан с начальным процессом ионизации кабеля. Однако образцы кабелей находились под

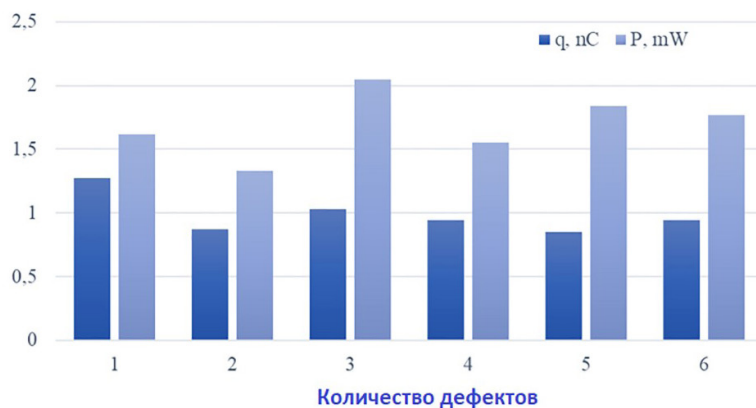


Рис. 12. Характеристики ЧР

напряжением около часа до проведения первого измерения и не менее 15 минут после добавления каждого нового дефекта, при этом пауза между измерениями была короткой и не превышала 5 минут. Следующие измерения, вероятно, не были подвержены влиянию процессов ионизации, так как при разных количествах дефектов характеристик частичных разрядов как увеличивались, так и уменьшались. Если бы ионизация имела значительное влияние, мы бы наблюдали уменьшение интенсивности ЧР при каждом последующем добавлении дефекта.

**Заключение.** В результате исследования были измерены характеристики частичных разрядов для кабелей с множественными искусственными дефектами. Теоретическое исследование частичных разрядов осложнено электродинамическими процессами и необходимостью моделирования электрической дуги. Таким образом, исследования носили в основном экспериментальный характер.

Результаты показали схожие картины АФРЧР для разного количества дефектов. Данный исход был предсказуем, поскольку все дефекты находились в области заземляющего электрода. Однако неожиданным результатом стала схожая форма импульсов ЧР. Предполагалось, что, ввиду распределенных параметров кабеля, они должны иметь разные формы и длительность. Вероятно, небольшая длина образца кабеля могла привести к незначительной разнице между формами импульсов.

Кроме того, зависимость характеристик частичных разрядов от количества дефектов также отсутствовала. Кажущийся заряд и интенсивность изменялись незначительно после создания новых дефектов. Более того, они могли как увеличиваться, так и уменьшаться.

Проанализировав все полученные результаты, можно прийти к выводу, что обнаружение множественных дефектов в коротких образцах кабелей может быть затруднительно.

#### Библиографический список

1. Hauschild W., Lemke E. High-voltage test and measuring techniques. 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-97460-6.

2. Поляков Д. А., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Никитин К. И., Полякова У. В. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 63–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-63-68.

3. Crine J. P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Vol. 12 (6). P. 1089–1107. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.

4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия, Ленингр. отделение., 1979. 224 с.

5. Tian Y., Lewin P. L., Davies A. E. [et al.]. Partial discharge detection in cables using VHF capacitive couplers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2003. Vol. 10, no. 2. P. 343–353. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.

6. Ashraf S. A., Stewart B. G., Hepburn D. M. [et al.]. Study of propagation behaviour of Partial Discharge acoustic signals in a 3-D model tank // Universities Power Engineering Conference (UPEC), Proc. 2009 44th Int. Univ. Power Eng. Conf. 2009. No. 1. P. 3–7.

7. Plueksawa W., Apiratikul P., Boonchiam P. [et al.]. Partial discharge pattern analysis in cylindrical insulators model of transformer // International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 113–117. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580243.

8. Deshpande A. S., Mangalvedekar H. A., Cheeran A. N. Partial discharge analysis using energy patterns // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. Vol. 53 (1). P. 184–195. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.

9. Hayakawa N., Okusu T., Nishizawa K. [et al.]. Dependence of partial discharge characteristics at spacer surface on particle size in SF6 gas insulated system // International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 46–50. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580227.

10. Singsathien J., Suwanasri J., Suwanasri C. Partial discharge detection and localization of defected power cable using HFCT and UHF sensors // 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2017. P. 505–508. DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096285.

11. Sheng B., Zhou W., Yu J. [et al.]. On-line PD detection and localization in cross-bonded HV cable systems // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2014. Vol. 21, no. 5. P. 2217–2224. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004446.

12. Комаров И. В., Поляков Д. А., Никитин К. И., Мирошник В. Ю. Математическая модель прогнозирования пробоя изоляции на основе характеристик частичных

разрядов // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 46–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-46-49.

**КОМАРОВ Илья Владимирович**, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 8480-2692

AuthorID (РИНЦ): 998511

Адрес для переписки: darkterror2308@gmail.com

**ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич**, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 2004-2148

AuthorID (РИНЦ): 733001

ORCID: 0000-0001-8813-2291

ResearcherID: В-7950-2016

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

#### Для цитирования

Комаров И. В., Поляков Д. А., Никитин К. И. Исследование характеристик частичных разрядов в СПЭ-изоляции кабеля с множественными дефектами // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 33–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-33-40.

Статья поступила в редакцию 22.10.2021 г.

© И. В. Комаров, Д. А. Поляков, К. И. Никитин