

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ В КАБЕЛЯХ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

В статье исследуются частичные разряды (ЧР) как механизм разрушения изоляции. Некоторые из известных математических моделей старения изоляции учитывают влияние частичных разрядов. Эти модели основаны на зависимости мощности частичных разрядов от напряжения, поэтому в статье исследуется эта зависимость. Приводятся экспериментальные исследования зависимости характеристик частичных разрядов. В качестве источника повышенного уровня частичных разрядов использован дефект в области концевой заделки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на 10 кВ. Диапазон исследования характеристик частичных разрядов лежит в пределах от 8 до 15 кВ. Полученные результаты показывают наличие опасного дефекта в кабеле. Частичные разряды при напряжении 8 кВ оказались незначительными. Однако напряжение 10 кВ приводит к появлению значительных частичных разрядов. ЧР при 15 кВ оказывают наиболее разрушительный эффект на изоляцию. Результаты были обработаны для оценки зависимости мощности ЧР от напряжения. Полученная зависимость соответствует существующим результатам исследований. Однако характеристики могут изменяться со временем вследствие роста дефекта.

Ключевые слова: частичные разряды, зависимость мощности частичных разрядов от напряжения, старение изоляции, механизм старения, дефект кабельной муфты.

Введение. Изоляция из сшитого полиэтилена широко используется по всему миру, однако в России большую часть всех кабелей по-прежнему составляют кабели с бумажно-масляной изоляцией. Тем не менее наблюдается тенденция замены старых бумажно-масляных кабелей на кабели с изоляцией из поливинилхлорида (ПВХ), этиленпропиленовой резины (ЭПР) и сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабели с ПВХ и ЭПР изоляцией обычно используются на низких и средних классах напряжения. Сшитая полиэтиленовая изоляция используется на всех классах напряжения. Однако на предприятиях с повышенными требованиями к пожаробезопасности чаще используются кабели с ПВХ и ЭПР изоляцией ввиду их лучшей термической устойчивости. На высоком напряжении (110 кВ и выше) неизвестно о наличии выпускаемой кабельной продукции из поливинилхлорида или этиленпропиленовой резины. Таким образом, на высоких напря-

жениях применяется преимущественно сшитый полиэтилен. Частичные разряды возникают, как правило, в электрооборудовании на напряжение от 3 кВ. Следовательно, существует необходимость в исследовании, разработке и введении в эксплуатацию технологии их тестирования и диагностики.

Известно, что около 85 % пробоев изоляции происходит после появления частичных разрядов [1]. Их регистрация является перспективным методом контроля изоляции. Данный метод показал свою эффективность и широко используется для диагностики и локализации дефектов во вращающихся машинах [2, 3], трансформаторах [4–6], системах с элегазовой изоляцией [7, 8], кабелях с СПЭ изоляцией [9–11] и прочем оборудовании. Данная статья посвящена проблеме диагностики частичных разрядов в изоляции кабелей из сшитого полиэтилена.

Частичные разряды обычно наблюдаются в дефектах изоляционного материала, а также в кабель-

ных муфтах при низком качестве монтажа. Статистика показывает, что около 90 % аварий, связанных с изоляцией кабелей, возникают вследствие влияния частичных разрядов [1]. Следовательно, мониторинг частичных разрядов в изоляции кабеля позволяет предотвратить аварийное приостановление работы оборудования путем замены поврежденных участков до пробоя в плановом режиме. Это возможно лишь при правильном анализе частичных разрядов. Например, форма сигнала от ЧР позволяет установить причину их появления или определить местоположение дефекта [12]. Однако имеющиеся знания о ЧР не всегда позволяют это сделать. Поэтому многие научные коллективы продолжают исследования в этой области. Характеристики частичных разрядов были исследованы с момента их появления до пробоя в [10, 13]. Другое направление — зависимость характеристик ЧР от частоты синусоидального напряжения [14, 15]. Также известно исследование частичных разрядов в триингах электрического происхождения (дендритах) под воздействием коротких импульсов различной длительности [16]. Кроме того, в [17–19] частичные разряды были исследованы как один из механизмов старения изоляционного материала.

Важно отметить, что, несмотря на значительный вклад многих авторов в исследование проблем ЧР, данная тема должна быть исследована подробнее. Каждая область изучения частичных разрядов имеет свои специфические проблемы. Одним из самых важных направлений является исследование частичных разрядов как механизма старения изоляции. Ими являются термическое разрушение, электрические и водные триинги, частичные разряды и накопление объемного заряда. Известные опубликованные исследования механизмов старения изоляции часто дают противоречивые результаты, так как эти механизмы тесно связаны друг с другом. Характеристики ЧР зависят от температуры [20, 21] и триинговых процессов [22]. Следовательно, механизм старения изоляции под влиянием частичных разрядов требует более глубокого изучения для оценки остаточного ресурса изоляционного материала и прогнозирования пробоя изоляции.

Постановка задачи. Частичные разряды существенно зависят от напряжения изоляции. Эта зависимость является частью моделей старения изоляции. Целью данной статьи является исследование мощности частичных разрядов от напряжения. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- обзор математических моделей старения изоляции, основанных на механизме разрушения под влиянием ЧР;
- искусственное создание дефекта в кабеле в качестве источника повышенного уровня ЧР;
- экспериментальные исследования характеристик ЧР при различных уровнях напряжения;
- анализ экспериментальных данных и оценка зависимости мощности ЧР от приложенного напряжения.

Математические модели. Процесс старения электрической изоляции изучается много лет. Известно множество математических моделей старения изоляционного материала. Многие из них описаны в [23–27]. Некоторые математические модели используют зависимость мощности частичных разрядов от напряжения для оценки срока службы изоляции. Одной из них является модель старения изоляции Кучинского [28–30]:

$$\tau_{ca} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля; W_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; A — коэффициент, зависящий от структуры и свойств изоляции; n — индекс степени, основанный на типе изоляции.

Это выражение показывает зависимость мощности частичных разрядов от напряженности электрического поля:

$$P_q = BE^n. \quad (2)$$

Уравнение Аррениуса определяет скорость химических реакций:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right). \quad (3)$$

Учитывая, что напряженность электрического поля тесно связана с приложенным напряжением, уравнение (2) может быть записано следующим образом:

$$P_q = BU^n. \quad (4)$$

Другими математическими моделями с аналогичным физическим смыслом являются модели обратной степени (IPM) [15]:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^n, \quad (5)$$

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{E}{E_H}\right)^n. \quad (6)$$

Известно также сочетание модели обратной степени с уравнением Аррениуса:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-n_0 - b\Delta T} \exp(-B\Delta T). \quad (7)$$

Модель обратной степени в исходном понимании не учитывает влияние частичных разрядов как механизма старения изоляции. Однако процесс электрического старения неразрывно связан с появлением водного и электрического триингов, которые зависят от частичных разрядов или же являются его причиной.

Теоретическая оценка зависимости мощности частичных разрядов от напряжения является сложной задачей из-за множества влияющих параметров и стохастической природы появления ЧР.

Экспериментальные исследования. Эксперименты проводились в условиях, аналогичных реальной эксплуатации кабеля. В качестве объекта испытаний использовался образец кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ. Кабель имеет одну алюминиевую жилу 120 мм², изоляцию из сшитого полиэтилена, медный экран 35 мм² и оболочку из ПВХ. Экран кабеля защищен водоблокирующими лентами. Длина образца кабеля составляет 9 метров.

Для проведения эксперимента необходимо было искусственно создать дефект, который приведет

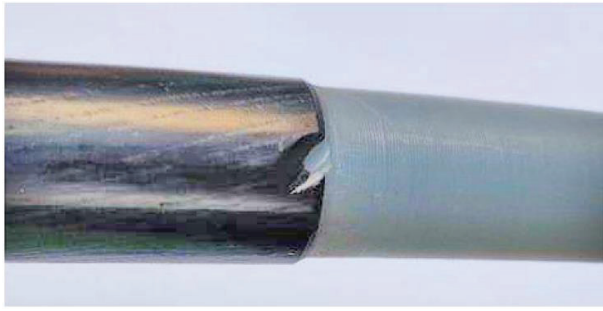


Рис. 1. Искусственный дефект кабеля

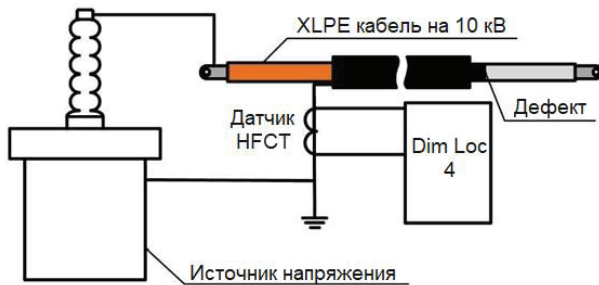


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки



Рис. 3. Фотография экспериментальной установки

к появлению частичных разрядов высокой интенсивности. Таким дефектом может быть некачественный монтаж концевой заделки кабеля, внутренний или внешний заостренный электрод в виде иглы в изоляционном слое. В данном эксперименте в качестве источника частичных разрядов используется дефект концевой заделки кабеля, так как его появление вызвано преимущественно человеческим фактором на этапе монтажа кабельной линии электропередачи.

Для его создания одна из сторон кабеля была намеренно повреждена при разделке (рис. 1). Кабель был разделан путем удаления оболочки ка-

беля, экрана и полупроводникового слоя внешней поверхности изоляции с помощью специального инструмента. После заделки кабеля с использованием ножа был создан искусственный дефект изоляции кабеля.

В качестве источника высокого напряжения использовался аппарат испытания диэлектриков АИД-70М. Диапазон его рабочих напряжений составляет от 0,6 до 50 кВ для переменного и от 0,6 до 70 кВ постоянного напряжения. Мощность устройства составляет 2,2 кВт, чего достаточно для тестирования кабеля длиной 9 метров.

Регистрация частичных разрядов проводилась с использованием портативного устройства DIM-Loc-4 производства компании Димрус (Россия). Это устройство имеет несколько различных датчиков: высокочастотный трансформатор тока (HFCT), акустический датчик, логопериодическая антенна. Для записи данных частичных разрядов был использован высокочастотный трансформатор тока, так как требовалось использовать регистрацию электрических сигналов.

Схема измерений была смонтирована в безопасных для человека условиях. Образец кабеля был подвешен на диэлектрической балке. Таким образом, электроды, подверженные высокому напряжению, располагались достаточно далеко от окружающих предметов. Перед началом измерения частичных разрядов экспериментальная установка была проверена на наличие разрядов в воздухе. Полученные результаты показали отсутствие воздушных разрядов во всем диапазоне напряжений. Экспериментальная установка показана на рис. 2, 3.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо было выполнить несколько измерений с различным уровнем напряжения. Диапазон напряжения был выбран от 8 до 15 кВ. Данный диапазон включает рабочее напряжение кабеля 10 кВ. При напряжениях ниже 8 кВ не было зарегистрировано частичных разрядов. При 15 кВ имела место высокая интенсивность частичных разрядов и при дальнейшем повышении напряжения кабель мог выйти из строя в течение короткого времени. Длительность выдержки кабеля под напряжением для каждого этапа измерений составляла 30 минут.

Обсуждение результатов. Для всех измерений были получены картины амплитудно-фазового распределения частичных разрядов при различных напряжениях. На рис. 4–6 показаны результаты для наименьшей и наибольшей интенсивности частичных разрядов, а также характеристики ЧР при номинальном напряжении.

На основании полученных данных были построены функции зависимости мощности частичных разрядов от приложенного напряжения (рис. 7).

Экспериментальные данные подтвердили наличие опасного дефекта в изоляции кабеля. Самая высокая интенсивность частичных разрядов была зафиксирована в диапазоне от 180° до 270° питающего напряжения. Как правило, это означает, что дефект расположен близко к заземляющему электроду, поэтому графики мощности ЧР соответствуют типу дефекта в области заделки кабеля.

Было выявлено, что интенсивность частичных разрядов значительно возрастает с увеличением напряжения. Мощность ЧР при напряжении 8 кВ недостаточна для разрушения изоляции (0,04 мВт). Напряжение 10 кВ вызывает частичные разряды с мощностью от 0,5 до 1 мВт и ведет к разруше-

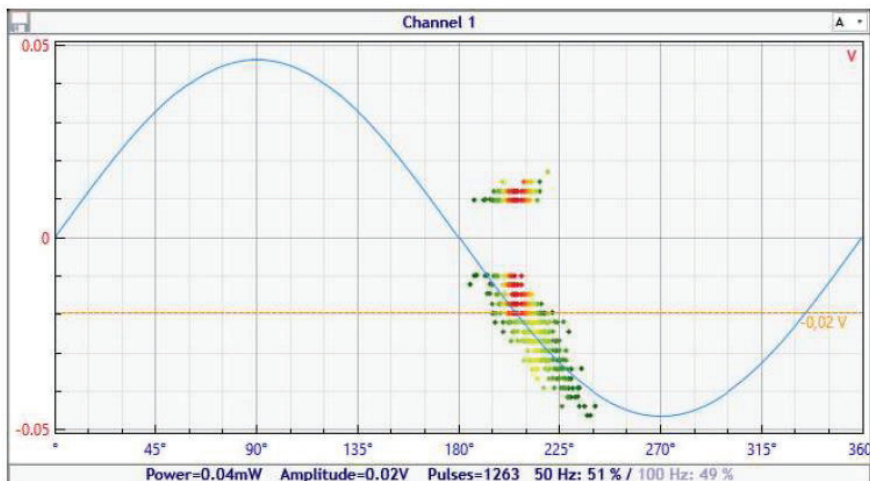


Рис. 4. Распределение мощности частичных разрядов при напряжении 8 кВ

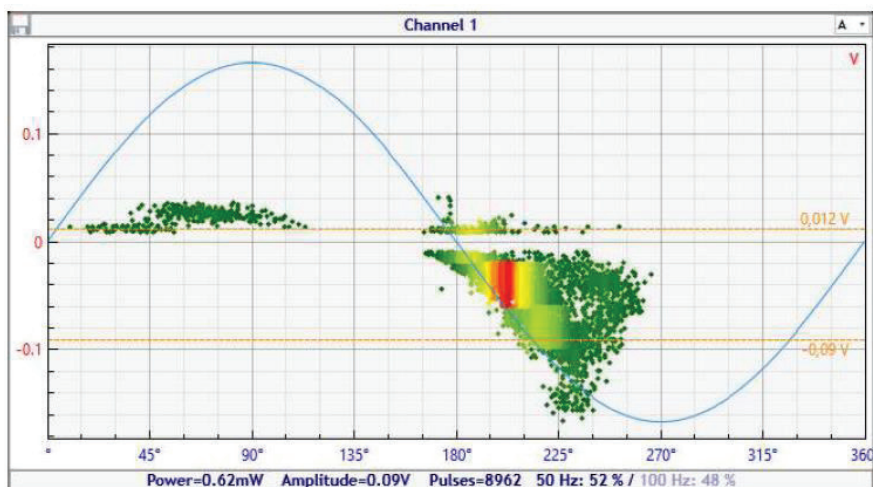


Рис. 5. Распределение мощности частичных разрядов при напряжении 10 кВ

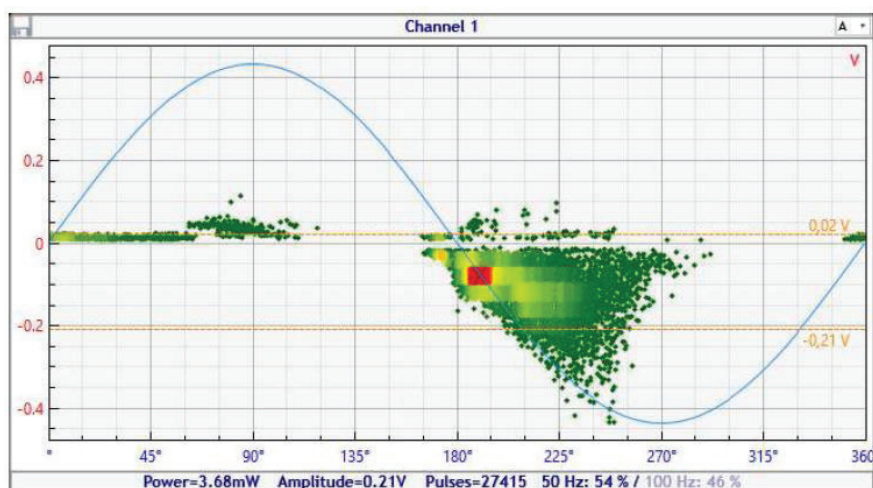


Рис. 6. Распределение мощности частичных разрядов при напряжении 15 кВ

нию изоляционного материала, а также к росту дефектов.

При напряжении 15 кВ уровень мощности ЧР достигает достаточно высоких значений (до 3,68 мВт), что приводит к более значительному повреждению изоляции.

Результаты исследования зависимости мощности частичных разрядов от напряжения соответствуют

уравнению (4). Кроме того, исследование позволило уточнить коэффициенты B и n в формуле.

Заключение. В статье рассмотрены известные математические модели старения изоляционных материалов, основанные на характеристиках частичных разрядов, как механизме старения изоляции. Экспериментально получена зависимость мощности ЧР от напряжения.

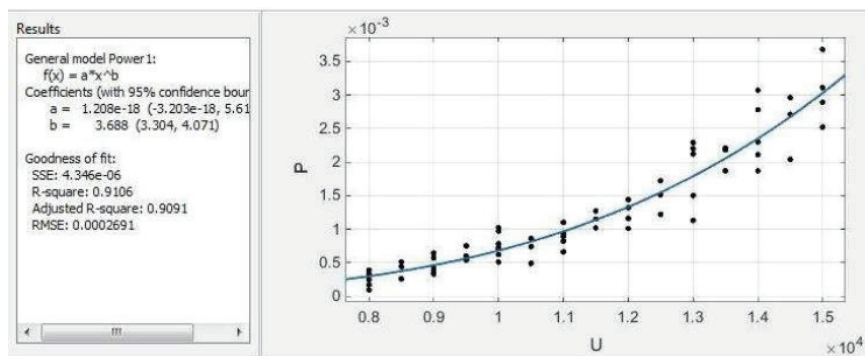


Рис. 7. Распределение мощности частичных разрядов при напряжении 15 кВ

Эксперименты были проведены с использованием одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на класс напряжения 10 кВ с дефектом в области концевой заделки. Полученные зависимости подтвердили наличие дефекта в области заземляющего электрода. Результаты оценки зависимости мощности ЧР от напряжения показали совпадение кривой с предыдущими результатами исследований.

Стоит отметить, что зависимость мощности частичных разрядов от напряжения может изменяться во времени из-за роста дефектов. Поэтому следующим шагом в этом исследовании являются измерения мощности ЧР при различных уровнях напряжения во время роста дефекта до момента пробоя. Однако данные исследования осложняются различным разрушающим воздействием разных уровней напряжения и большой длительностью таких экспериментов.

Библиографический список

1. Refaat S. S., Shams M. A. A review of partial discharge detection, diagnosis techniques in high voltage power cables // 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/CPE.2018.8372608.
2. Aakre T. G., Ildstad E., Hvidsten S. Condition assessment of hydrogenerator stator bar insulation using partial discharge measurements // 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2018. P. 357–360. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481078.
3. 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. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.
4. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Medvedev D. A. [et al.]. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26, Issue 4. P. 1035–1042. DOI: 10.1109/TDEI.2019.007808.
5. Nafar M., Niknam T., Gheisari A. Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2011. Vol. 33, Issue 3. P. 493–499. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.11.003.
6. Kundu P., Kishore N. K., Sinha A. K. Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques // Applied Acoustics. 2012. Vol. 73, Issue 4. P. 395–401. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.11.004.
7. Khan Y., Budiman F. N., Bïroual A. [et al.]. The estimation of size and position of contaminating particle adhering to the insulating spacer surface in gas-insulated systems // The European Physical Journal Applied Physics. 2013. Vol. 62, Issue 2. DOI: 10.1051/epjap/2013130007.
8. Sarathi R., Umamaheswari R. Understanding the partial discharge activity generated due to particle movement in a composite insulation under AC voltages // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. Vol. 48. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.11.017.
9. Heinrich R., Jobava R., Kalkner W. [et al.]. Investigation and optimization of a sensor for partial discharge detection on high voltage XLPE cables // Proceedings of III International Seminar/ Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (IEEE Cat. No. 98EX163). 1998. P. 134–137. DOI: 10.1109/DIPED.1998.730961.
10. Tokunaga S., Tsurusaki T., Arief Y. Z. [et al.]. Partial discharge characteristics till breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect // Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 03CH37417). 2003. Vol. 3. P. 1206–1209. DOI: 10.1109/ICPADM.2003.1218641.
11. Chen X., Xu Y., Cao X. Nonlinear time series analysis of partial discharges in electrical trees of XLPE cable insulation samples // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014. Vol. 21, Issue 4. P. 1455–1461. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004307.
12. Singasathien J., Suwanasri T., Suwanasri C. [et al.]. Partial discharge detection and localization of defected power cable using HFCT and UHF sensors // 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2017. P. 505–508. DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096285.
13. Bessissa L., Boukezzi L., Mahi D. [et al.]. Lifetime estimation and diagnosis of XLPE used in HV insulation cables under thermal ageing: arithmetic sequences optimised by genetic algorithms approach // IET Generation, Transmission & Distribution. 2017. Vol. 11, Issue 10. P. 2429–2437. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0491.
14. Mashimo T., Yashima M., Okamoto T. Sinusoidal-wave applied voltage frequency dependence of partial discharge characteristics with needle-plane electrode system // 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). 2017. Vol. 1. P. 91–94. DOI: 10.23919/ISEIM.2017.8088696.
15. Bodega R., Cavallini A., Morshuis P. H. F. [et al.]. The effect of voltage frequency on partial discharge activity // Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2002. P. 685–689. DOI: 10.1109/CEIDP.2002.1048889.
16. Hammarström T. J. Å. Partial Discharge Characteristics of Electrical Treeing in XLPE insulation utilizing Multi Level PWM Waveforms // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEMS.2019.8921851.
17. Knenicky M., Prochazka R., Hlavacek J. Partial Discharge Patterns during Accelerated Aging of Medium Voltage Cable System // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641847.

18. Okamoto T., Yashima M., Nagao M. High voltage insulating material life under partial discharge degradation // TENCON 2017 — 2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. P. 1690–1695. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8228131.
19. Fedosov E. M., Sattarov R. R., Volkova T. A. The influence of electrical equipment insulation aging degree on the growth rate of partial discharges power // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911438.
20. Khawaja R. H., Blackburn T. R. Impact of high temperature on partial discharges in oil-impregnated insulation // 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference. 2009. P. 1–6.
21. Kosaki M., Shimizu N., Horii K. Treeing of Polyethylene at 77K // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1977. Vol. EI-12, Issue 1. P. 40–45. DOI: 10.1109/TEI.1977.298006.
22. Golski E., Putter H., Smit J. J. Investigation of water treeing — electrical treeing transition in power cables // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 234–237. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580270.
23. Mazzanti G. Life and reliability models for high voltage DC extruded cables // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33, Issue 4. P. 42–52. DOI: 10.1109/MEI.2017.7956632.
24. Mazzanti G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage ac cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2009. Vol. 16, Issue 4. P. 1168–1179. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.
25. Zhurkov S. N. Kinetic concept of the strength of solids // International Journal of Fracture. 1965. Vol. 1. P. 311–323.
26. 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, Issue 6. P. 1089–1107. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
27. Crine J.-P., Dang C., Parpal J.-L. Electrical aging of extruded dielectric cables: a physical model // Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 1996. Vol. 2. P. 646–649. DOI: 10.1109/ELINSL.1996.549428.
28. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
29. Pugach V. N., Polyakov D. A., Nikitin K. I. [et al.]. Analysis of Temperature Conditions Influence on Cables Insulation Operation Life // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1260, Issue 5. 052027. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052027.
30. Polyakov D. A., Yurchuk D. A., Nikitin K. I. Cables XLPE-insulation Residual Life Monitoring // 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8641910.

ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 2004-2148

AuthorID (РИНЦ): 733001

ORCID: 0000-0001-8813-2291

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

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

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, инженер кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ.

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

КОМАРОВ Илья Владимирович, магистрант группы ЭЭМ-185 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ.

SPIN-код: 8480-2692

AuthorID (РИНЦ): 998511

Адрес для переписки: darkterror2308@gmail.com

ПОЛЯКОВА Ульяна Викторовна, инженер отдела электроснабжения ПАО «ОМХП», г. Омск.

Для цитирования

Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Полякова У. В. Исследование зависимости мощности частичных разрядов от напряжения в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена // Омский научный вестник. 2020. № 1 (169). С. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44.

Статья поступила в редакцию 09.01.2020 г.

© Д. А. Поляков, К. И. Никитин, Н. А. Терещенко,

И. В. Комаров, У. В. Полякова