

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ

А.В. Коржов¹, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
В.И. Сафонов¹, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
М.А. Дзюба¹, dziubama@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3270-6190>
Р.М. о. Бабаев¹, asp22brm768@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0931-4543>
Я.Е. Коростелев^{1,2}, iankorostelev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0584-4643>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АО «Энергия + 21», п. Увельский, Челябинская область, Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию математических моделей, позволяющих оценивать и прогнозировать остаточный ресурс изоляции, а также имеющихся и вновь разрабатываемых материалов. Рассматриваемый метод основан на модели Кучинского для оценки остаточного ресурса изоляции по уровню частичных разрядов. Предложена уточнённая математическая модель, позволяющая определять остаточный ресурс изоляции только на основе трёх измерений мощности частичных разрядов и условий эксплуатации изоляционных материалов между опытами. Оценена точность определения остаточного ресурса изоляции для условий, близких к эксплуатации кабельных линий, и условий, близких к лабораторным исследованиям изоляционных материалов. Показана возможность использования методики для самовосстанавливающихся материалов.

Ключевые слова: кабельная линия, изоляция, частичные разряды, старение изоляции, надёжность, остаточный ресурс, перенапряжения, изоляционные материалы

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0012 (2023012ГЗ)).

Для цитирования: Математическая модель прогнозирования остаточного ресурса изоляции по режимным параметрам / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, М.А. Дзюба и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 56–64. DOI: 10.14529/power230106

Original article
DOI: 10.14529/power230106

A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE RESIDUAL RESOURCE OF ISULATION BASED ON THE OPERATING PARAMETERS

A.V. Korzhov¹, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
V.I. Safonov¹, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
M.A. Dziuba¹, dziubama@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3270-6190>
R.M. o. Babayev¹, asp22brm768@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0931-4543>
I.E. Korostelev^{1,2}, iankorostelev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0584-4643>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² "Energy + 21" JSC, Uvelskiy village, Chelyabinsk region, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of mathematical models that allow evaluating and predicting the residual life as insulation as modern and newly designed materials. The considered method bases on the Kuchinsky model for estimating the residual resource of insulation by the level of partial discharges. A refined mathematical model that allows determining the residual life of the insulation only on the basis of 3 measurements of the partial discharges intensity and the operating conditions of the insulation between experiments was proposed. The possibility of using the method for self-healing materials was shown.

Keywords: cable line, insulation, partial discharges, insulation aging, reliability, residual life, overvoltage, insulating materials

Acknowledgments. The research was carried out at the expense of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment for fundamental scientific research No. FENU-2023-0012 (2023012GZ)).

For citation: Korzhov A.V., Safonov V.I., Dziuba M.A., Babayev R.M. o., Korostelev I.E. A mathematical model for predicting the residual resource of isulation based on the operating parameters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):56–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230106

Введение

Общеизвестно, что изоляционные материалы имеют широкий диапазон применения в различных конструкциях. При этом замена конструкций с истекшим нормативным сроком эксплуатации в течение короткого промежутка времени бывает невозможна из-за больших капитальных затрат, поэтому перед эксплуатирующими организациями неизбежно возникает вопрос об оценке остаточного ресурса изоляции. В настоящий момент ведутся исследования в области разработки материалов с большим сроком эксплуатации, а также позволяющих восстанавливать свои электрические свойства [1].

Фактические электрические свойства материалов зависят от предрасположенности к накоплению и развитию дефектов под действием режимных параметров [2, 3], таких как температура, повышенное напряжение, коммутационные перенапряжения и др., которые оказывают значительное влияние на электрическую прочность изоляции. В случае изоляции кабеля воздействие вышеприведенных факторов при длительной эксплуатации оказывает существенное влияние. В [4] показано, что, например, значения перенапряжений могут меняться в зависимости от структуры самой сети, то есть при наличии неоднородностей в схеме [4, 5]. Таким образом, возникают вопросы по оценке остаточного ресурса как кабельной линии (КЛ) во время эксплуатации, так и при разработке новых схемных решений и новых изоляционных материалов.

Существует большое количество неразрушающих методов оценки состояния изоляции. Контроль технического состояния изоляции можно провести при помощи измерения сопротивления, ёмкости, угла диэлектрических потерь $\tan \delta$, метода рефлектометрии, тепловизионным способом и т. д. [6–10]. В последнее время все больше внимания уделяется методике с использованием частичных разрядов (ЧР) [6–11], при помощи которой можно проводить диагностику для силовых, измерительных трансформаторов, электрических машин, КЛ и прочего электротехнического оборудования.

В научной литературе обсуждалось и сравнивалось [8–10, 12] несколько теоретических и математических моделей для оценки остаточного ресурса изоляции. Однако наибольшую известность получила модель Кучинского [13], поскольку она включает в себя энергетические показатели, такие как мощность ЧР и температуру, определяемые экспериментально.

Использование модели Кучинского носит не совсем полный характер. В работе [8] при определении остаточного ресурса кабеля использовались не только экспериментальные данные, но и информация о нормативном сроке службы кабеля, при отсутствии которой остаточный ресурс получился завышенным в несколько раз. В работе [9] срок службы был определен в относительных единицах и с использованием рекомендованных ком-

паний Emerson Electric уровней мощности ЧР для конкретного вида изоляции [14].

Определение остаточного ресурса в относительных единицах не всегда удобно для эксплуатирующих предприятий и малоинформативно при анализе новых схемных решений и новых видов изоляции, в том числе из самовосстанавливающихся материалов [1]. В этих исследованиях актуальность приобретают вопросы об остаточном ресурсе и его изменении под влиянием различных факторов, скорости старения под действием различных механизмов, точности полученных результатов и т. д. Поэтому целью настоящей работы является получение метода обработки экспериментальных данных в рамках модели Кучинского, позволяющей ответить на поставленные выше вопросы.

Математическая модель и описание метода оценки остаточного ресурса изоляции

Согласно предложенной математической модели остаточный ресурс можно представить в виде

$$R(U, T, n) = \frac{A_1}{f_0(U, n)} \cdot e^{\frac{B_1}{T}}, \quad (1)$$

где n – номер опыта; $f_0(U, n)$ – мощность ЧР, полученная в n -м опыте; T – температура; A_1 и B_1 – коэффициенты, подлежащие определению.

При этом единичной удобнее считать мощность ЧР нового образца, наблюдаемую при номинальном напряжении U_n . Классическая модель Кучинского имеет вид

$$\tau_{ст} = A \cdot E^{-n} \cdot e^{\frac{W_a}{k \cdot T}}, \quad (2)$$

где A – постоянная, зависящая от материала и свойств изоляции; E – напряженность электрического поля; n – индекс степени, зависящий от типа изоляции; k – постоянная Больцмана; W_a – энергия активации; T – температура.

В (2) множитель перед экспонентой имеет вид $A \cdot E^{-n}$, что усложняет модель, поскольку напряженность поля в дефекте необходимо рассчитывать, а для этого нужна информация о геометрических размерах дефекта. Дополнительно к этому функция E^{-n} по сути является аппроксимацией зависимости мощности ЧР от приложенного напряжения, и эта аппроксимация при дальнейших расчетах приведет только к дополнительной систематической ошибке. Кроме того, в (2) присутствует энергия активации W_a , определение которой часто вызывает сложности.

Однако выбор в качестве аргумента функции (1) мощности ЧР в относительных единицах тоже имеет свои недостатки. При некоторой критической величине напряжения $U_{кр} < U_n$ ЧР отсутствуют, и в модели будет деление на ноль. Устранить данное несоответствие можно введением фиктивной мощности ЧР при малых напряжениях, чтобы сохраня-

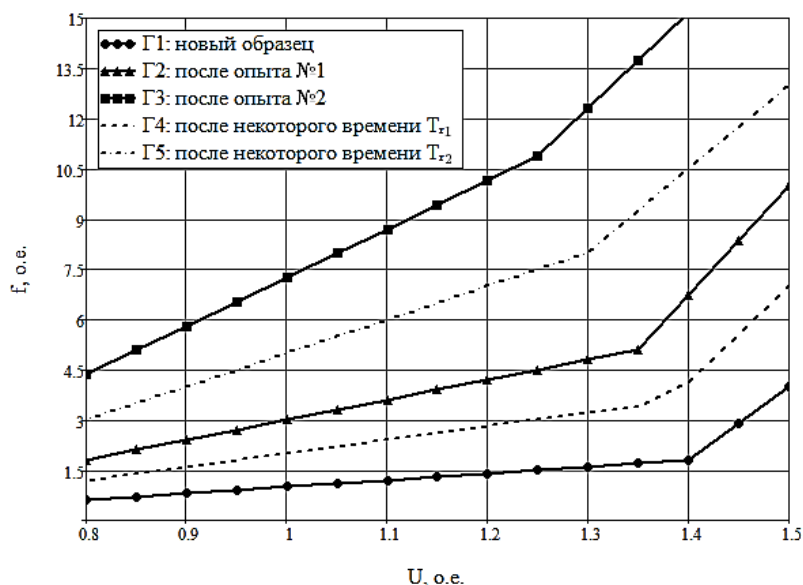


Рис. 1. Зависимость мощности ЧР от приложенного напряжения
Fig. 1. Dependence of the partial discharges intensity (PDI) on the testing voltage

лась непрерывность функций. Малыми напряжениями в данном случае можно считать напряжения $U_{кр} < 0,8U_n$, так как эксплуатация системы электроснабжения при таких напряжениях недопустима согласно [15]. Введение фиктивной мощности ЧР приведет к тому, что модель будет справедлива только в области напряжений более $0,8U_n$.

Модель (1) применима только в области медленного старения изоляции (порядка суток и более). Поэтому существует верхняя граница применимости модели по напряжению, которая определяется приблизительно 90 % от напряжения пробоя $U_{пр}$, так как пробой диэлектрика носит стохастический характер [9, 16]. Аналогично существует и верхняя граница применимости модели по температуре, выше которой наблюдается быстрое термическое разрушение образца. С учетом этих ограничений сформулируем необходимые исходные данные.

1. Зависимость мощности ЧР от напряжения $f(U, 0)$ на новом образце (график Г1, рис. 1).

2. Условия проведения 1-го опыта старения: t_1 – время, T_1 – температура, U_1 – напряжение.

3.1. Зависимость мощности ЧР от напряжения $f(U, 1)$ после 1-го опыта старения образца (график Г2, рис. 1).

3.2. Зависимость мощности ЧР от напряжения $f'(U, 1)$ через некоторое время $T_{r,1}$ (график Г4, рис. 1).

4. Условия проведения 2-го опыта старения: t_2 – время, T_2 – температура, U_2 – напряжение.

5.1. Зависимость мощности ЧР от напряжения $f(U, 2)$ после 2-го опыта старения образца (график Г3, рис. 1).

5.2. Зависимость мощности ЧР от напряжения $f'(U, 2)$ через некоторое время $T_{r,2}$ (график Г5, рис. 1).

Приблизительный вид функций $f(U, 0)$, $f(U, 1)$, $f'(U, 1)$, $f(U, 2)$, $f'(U, 2)$ показан на рис. 1. Под $T_{r,n}$ подразумевается время, необходимое для восстановления диэлектрических свойств материала после n -го опыта старения образца. За базовое значение напряжения взято номинальное U_n , при котором эксплуатируется оборудование. За базовую величину мощности ЧР принята мощность ЧР, измеренная для нового образца при номинальном напряжении $f(U_n, 0)$. Характерный вид графиков соответствует экспериментальным данным, приводимым в литературе [17].

В расчётах старения приняты значения: $t_1 = 400$ ч, $U_1 = 1,25U_n$, $T_1 = 1,242T_n$, $t_2 = 400$ ч, $U_2 = 1,25U_n$, $T_2 = 1,182T_n$. Например, для кабеля, согласно [18], исходные данные соответствуют условиям проведения экспериментов по старению электротехнических образцов. Для получения двух параметров, характеризующих материал, нужно составить два уравнения из имеющихся данных:

$$\begin{cases} R(U_1, T_{1,0}) - R(U_1, T_{1,1}) = t_1; \\ R(U_2, T_{2,1}) - R(U_2, T_{2,1}) = t_2. \end{cases} \quad (3)$$

Каждое уравнение из системы уравнений (3) показывает разность между ресурсом до опыта старения и после опыта старения в конкретных условиях, при которых выполняется старение. Проведя несложные, но объёмные вычисления, можно получить выражение для оставшегося ресурса только через опытные данные:

$$R(U, T, n) = \frac{K(T)}{f(U, n)} \cdot \left(\frac{F_2 \cdot F_1}{F_2 - F_1} \right)^{k(T)} \cdot \left(\frac{F_1' - F_0}{F_1' \cdot F_0} \right)^{k(T)-1}, \quad (4)$$

где $f(U, n)$ – относительная мощность ЧР, полученная в опыте n и зависящая от напряжения U , при котором предполагается эксплуатация образца, о. е.; $F_2 = f(U_2, 2)$, $F_1 = f(U_2, 1)$ – относительная мощность ЧР в конце и в начале второго опыта старения при напряжении U_2 , при котором выполняется 2-й опыт, о. е.; $F_1' = f(U_1, 1)$, $F_0 = f(U, 0)$ – относительная мощность ЧР в конце и в начале 1-го опыта старения при напряжении U_1 , при котором выполняется 1-й опыт, о. е.

Коэффициенты, зависящие от температуры T , при которой предполагается эксплуатация образца, можно определить по выражениям:

$$K(T) = t_1 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{k(T)}; \quad (5)$$

$$k(T) = T_2 \cdot \frac{T - T_1}{T(T_2 - T_1)}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (4) позволяет определить остаточный ресурс в момент проведения n -го опыта с ЧР, т. е. для частично состаренного образца. Анализ выражений после (5), (6) показывает некоторые ограничения на проведение опытов:

– опыты старения должны быть выполнены при разных температурах, иначе в выражении (1) будет невозможно восстановить коэффициент B_1 ;

– опыты с ЧР должны быть выполнены как минимум до величины напряжений, при которых выполняются опыты старения образцов.

Графики зависимости ресурса (4) от эксплуатационного напряжения показаны на рис. 2: для нового образца (Г1), для образца после 1-го и 2-го опытов старения без учёта времени релаксации (Г2 и Г3) и с учётом времени релаксации (Г4 и Г5). Ожидаемый ресурс нового образца при номинальном напряжении – чуть больше 30 лет, что соответствует данным анализа эксплуатации кабелей [9]. Следовательно, выбранные параметры эксперимента соответствуют реальной ситуации. Резкое уменьшение срока службы на графиках соответствует увеличению ЧР в опытах, что является одним из сигналов к более тщательному мониторингу за состоянием изоляции, а при достижении критических значений или близких к нему – принятия необходимых мер.

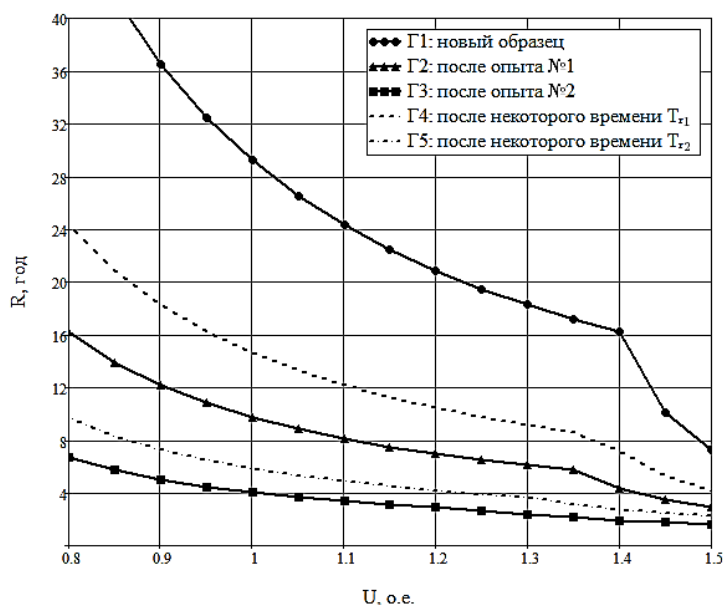


Рис. 2. Зависимость срока службы от приложенного напряжения
Fig. 2. Dependence of the residual life of the sample on the testing voltage

Для любого косвенного измерения крайне важным является вопрос о точности этих измерений. При проведении лабораторных исследований условия старения (время, температуру, напряжение) можно считать измеренными точно. Основная ошибка будет допущена при измерении мощности ЧР, так как их

мощность определяется случайными процессами как при их возникновении, так и при гашении [16]. Поэтому для оценки остаточного ресурса будем считать, что мощность ЧР измерена с относительной погрешностью df . Величина этой погрешности при существующих методиках проведения измерений ЧР может составлять около $df = 5\%$.

По общепринятой методике обработки результатов косвенных измерений [19] ошибка косвенного измерения от результатов 5 опытов по ЧР:

$$dR = \left(\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial F_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial F_1'}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial F_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial F_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial F}\right)^2} \right) \cdot df, \quad (7)$$

где $\partial R/\partial F_0$, $\partial R/\partial F_1'$, $\partial R/\partial F_1$, $\partial R/\partial F_2$, $\partial R/\partial F$ – частные производные остаточного ресурса по мощности ЧР, определенной соответственно:

- 1) при U_1 до 1-го опыта старения;
- 2) U_1 после 1-го опыта старения;
- 3) U_2 до 2-го опыта старения;
- 4) U_2 после 2-го опыта старения;
- 5) предполагаемых значения эксплуатационного напряжения U .

Указанные производные соответственно равны:

$$\frac{\partial R}{\partial F_0} = \frac{k \cdot F_2}{F_1(F_2 - F_1)} \cdot R; \quad \frac{\partial R}{\partial F_1'} = \frac{k \cdot F_1}{F_2(F_2 - F_1)} \cdot R; \quad \frac{\partial R}{\partial F_1} = \frac{(k-1) \cdot F_0}{F_1'(F_1' - F_0)} \cdot R;$$

$$\frac{\partial R}{\partial F_2} = (k-1) \cdot \frac{F_1'}{F_0(F_1' - F_0)} \cdot R; \quad \frac{\partial R}{\partial F} = \frac{-1}{f_0 \cdot U} \cdot R.$$

Оценка относительной погрешности ресурса (4) при параметрах опытов: $t_1 = 400$ ч, $U_1 = 1,25U_n$, $T_1 = 1,242T_n$, $t_2 = 400$ ч, $U_1 = 1,25U_n$, $T_1 = 1,182T_n$ составляет 21 % (для нового образца) при эксплуатации при номинальном напряжении. Достаточно высокие значения погрешности могут быть вызваны произвольным выбором «экспериментальных данных о ЧР», не учитывающих постепенное, а не пороговое возрастание нелинейности, а также несогласованность этих данных с параметрами старения.

Аналогичный расчет, выполненный при параметрах $t_1 = 5,708$ года, $U_1 = 1,05U_n$, $T_1 = 1,03T_n$, $t_2 = 5,708$ года, $U_1 = U_n$, $T_1 = T_n$, близких к условиям эксплуатации, показал погрешность 5,8 %. Однако при условиях эксплуатации дополнительную погрешность будет вносить неопределенность в температуре, при которой осуществляется эксплуатация. Величина относительной погрешности в определении ресурса при ошибке в параметре $k(T)$ может быть оценена по формуле

$$\frac{\partial R}{\partial F_0} = \left(\frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 - F_2} \cdot \frac{F_0 - F_1'}{F_0 \cdot F_1'} \right)^{k-1} \cdot \ln \left(\frac{F_1 \cdot F_2}{F_1 - F_2} \cdot \frac{F_0 - F_1'}{F_0 \cdot F_1'} \right) \cdot R. \quad (8)$$

В случае, когда относительная ошибка в определении параметра $k(T)$ составляет 5 %, общая ошибка в определении ресурса будет 8,1 %.

Обсуждение и практическое применение

На текущий момент ЧР являются общепризнанным индикатором, позволяющим оценить текущее состояние изоляционных материалов [6–11, 13, 14]. Поэтому распространение данного подхода и предлагаемого метода для оценки самовосстанавливающихся материалов выглядит обоснованным. Преимуществом предлагаемого метода по сравнению с другими является возможность оценки остаточного ресурса изоляции в динамике.

Старение изоляции вызвано многими факторами, среди которых длительное влияние электрического и теплового поля, химическое влияние агрессивных веществ, увлажнение, снижающие изоляционные характеристики диэлектрика, механические воздействия и т. д. [10, 13, 20]. В выражении (1) мощность ЧР характеризует состояние материала в данный момент. Поэтому в данном выражении можно учитывать и другие виды старения, для этого в (1) необходимо ввести дополнительные множители, а в (2) необходимо добавить ещё один опыт старения. Сами же опыты нужно проводить с различными значениями факторов аналогично тому, как в рассмотренной работе температуры старения должны быть различными.

Предложенный в статье метод можно также применить для проверки и испытания КЛ классов напряжения 6 и 10 кВ электрохозяйства ПАО «Россети», которые на текущий момент проводятся в соответствии со стандартом организации [21]. Согласно ему оценочным критерием успешности проведения испытания является пробой либо перекрытие по поверхности. В случае несоблюдения одного из этих факторов считается, что изоляция электрического испытания не выдержала. Метод испытания повышенным напряжением предполагает лишь качественную оценку состояния изоляции относительно приложенного напряжения, обеспечивающего некоторый коэффициент надежности. Какой-либо возможности прогнозирования остаточного срока службы КЛ используемый на данный момент метод не имеет.

Как видно из ежегодно публикуемой статистики о технологических нарушениях [22], для линий с высокой степенью аварийности подобное испытание является разрушающим, практически выявляющим место КЛ с наименьшей электрической прочностью. С учетом невозможности оценки остаточного ресурса КЛ в условиях электрохозяйства с высокой степенью износа кабельной инфраструктуры могут иметь место отклонения от приведенного метода с целью недопущения выхода испытываемой линии из строя.

Исследования ЧР в КЛ, равно как и методов контроля состояния КЛ, ведутся в течение продолжительного времени [6, 13, 23]. Предложенный метод потенциально позволяет спрогнозировать ухудшение изоляционных свойств кабеля и, следовательно, дать оценку остаточного срока службы. Оценку предполагается проводить по результатам испытаний образцов реальной линии, полученной в ходе специального отбора либо по результатам ремонтных работ. Помимо этого, предложенный метод потенциально позволяет оценить влияние на КЛ различных дополнительных факторов (коммутационные перенапряжения, электротермическое и электроди-

намическое воздействие токов короткого замыкания и т. д.), что является предметом дальнейших исследований.

Описанный в статье метод достаточно легко воспроизводится в лабораторных условиях. Воздействующими факторами метода являются время, напряжение и температура, которые легко воссоздать с достаточной точностью и повторяемостью. Способ измерения кажущегося заряда ЧР также является стандартным, применяя который легко определить мощность ЧР. На основе предложенного подхода потенциально возможно создать стандартный метод оценки старения изоляции электротехнических устройств.

Предложенный метод может иметь большую практическую пользу с точки зрения оценки ожидаемой либо остающейся надежности, планирования сроков ремонтных работ, формирования бюджета ремонта и модернизации системы КЛ, разработки мероприятий по увеличению их срока эксплуатации.

Вывод

В работе предложен алгоритм по оценке остаточного ресурса изоляции на основе модели Кучинского. Предложенная математическая модель позволяет использовать только параметры, которые можно получить в ходе эксперимента (температура, напряжение, мощность ЧР) и отказаться от расчетных величин, таких как мощность активации, напряженность локального электрического поля, геометрических размеров дефекта в изоляции или иных трудноопределяемых параметров. Данная модель позволяет оценить погрешность определения остаточного ресурса в зависимости от погрешностей экспериментальных данных и обладает вариативностью в использовании факторов, воздействующих на процесс старения изоляции, что расширяет её возможности, кроме того, модель позволяет производить оценку остаточного ресурса как обычных, так и самовосстанавливающихся материалов.

Список литературы

1. Self-healing of materials under high electrical stress / Y. Zhang, H. Khanbareh, J. Roscow et al. // Matter. 2020. Vol. 3, iss. 4. P. 989–1008. DOI: 10.1016/j.matt.2020.07.020
2. Буров А.Г., Лавров Ю.А., Петрова Н.Ф. Особенности применения вакуумных выключателей в распределительных кабельных сетях среднего напряжения, содержащих кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена // ПРОГРЕССЭЛЕКТРО: сб. докл. XX заседания Ассоциации электроснабжения городов России, Нижний Новгород, 2–4 июня 2014 г. Нижний Новгород, 2014. С. 78–85.
3. Продление срока службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в электрических сетях среднего напряжения с помощью резистивного заземления нейтрали / Ю.П. Гусев, Г.Ч. Чо, С.А. Талакин, Д.Ю. Растегняев // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. Т. 4, № 49. С. 82–85.
4. Коржов А.В., Волков О.В., Коровин Ю.В. Исследования перенапряжений по длине неоднородной распределительной кабельной сети // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20, № 1. С. 22–29. DOI: 10.14529/power200103
5. Кучеренко Д.Е. Методы и средства контроля состояния кабельных линий // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). 2016. Т. 8, № 7. С. 74–78.
6. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering. Oxford: Newnes, 2000. 534 p.

7. Somsak T., Suwanasri T., Suwanasri C. Remaining Useful Life Estimation for Underground Cable Systems Based on Historical Health Index // *Energies*. 2022. Vol. 15 (24). P. 9447. DOI: 10.3390/en15249447
8. Поляков Д.А. Мониторинг остаточного ресурса изоляции кабельных линий 6 (10) кВ из сшитого полиэтилена: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: дис. ... канд. техн. наук. Омск: Омск. гос. техн. ун-т, 2018. 148 с.
9. Коржов А.В. Комплексный анализ состояния и повышения эксплуатационной надежности кабельных линий 6 (10) кВ с бумажной пропитанной изоляцией в условиях городских электрических сетей: специальность 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия»: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ОАО «ВНИИКП», 2016. 382 с.
10. Дубяго М.Н. Разработка методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных свойств кабельных линий: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: дис. ... канд. техн. наук. Таганрог: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2020. 200 с.
11. On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables / E. Gulski, P. Cichecki, F. Wester et al. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008. Vol. 15 (6): P. 1691–1700. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712673
12. Шувалов М.Ю., Овсиенко В.Л., Пешков И.Б. Прогнозирование остаточного ресурса маслонаполненных кабельных линий на основе математического моделирования процесса старения их электрической изоляции // *Кабели и провода*. 2018. Т. 2, № 370. С. 12–19.
13. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
14. Partial discharge testing for cables // *Electrical Reliability Services. Service Data Sheet Ref. No. PM-02-301-A*. December 2008. URL: <https://studylib.net/doc/18561241/partial-discharge-testing-for-cables>.
15. ГОСТ Р 51317.2.4–2000 (МЭК 61000-2-4-94). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. М.: Госстандарт России, 2000. 16 с.
16. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24 (1). P. 217–226. DOI: 10.1109/tdei.2016.005904
17. Исследование зависимости мощности частичных разрядов от напряжения в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена / Д.А. Поляков, К.И. Никитин, Н.А. Терещенко и др. // *Омский научный вестник*. 2020. № 1 (169). С. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44
18. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. М.: Стандартинформ, 2014. 35 с.
19. Чарыков А.К. Математическая обработка результатов химического анализа: учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1984. 168 с.
20. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учеб. для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
21. СТО 34.01-23.1-001-2017. Объем и нормы испытаний электрооборудования. М.: ПАО «Россети», 2017. 262 с.
22. Технологические нарушения. Сводные данные об аварийных отключениях в месяц по границам территориальных зон деятельности ОАО «МРСК Урала» в 2022 году // РОССЕТИ УРАЛ: сайт. URL: <https://rosseti-ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/disturbances/> (дата обращения: 28.02.2023).
23. Wester F.J., Gulski E., Smit J.J., Seitz P.N. Experiences from On-site PD Measurements using Oscillating Wave Test System // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 1999. Vol. 16 (2). P. 17–25.

References

1. Zhang Y., Khanbareh H., Roscow J., Pan M., Bowen C., Wan C. Self-healing of materials under high electrical stress. *Matter*. 2020;3(4):989–1008. DOI: 10.1016/j.matt.2020.07.020
2. Burov A.G., Lavrov Yu.A., Petrova N.F. [Features of the use of vacuum circuit breakers in medium-voltage distribution cable networks containing cables with cross-linked polyethylene insulation]. In: *PROGRESSELECTRO: XX meetings of the Association of Power Supply of Russian Cities, Nizhny Novgorod, June 2–4, 2014*. Nizhny Novgorod; 2014. P. 78–85. (In Russ.)
3. Gusev Y.P., Cho G.Ch., Talakin S.A., Rastegnyaev D.Y. [Extending the service life of cables with cross-linked polyethylene insulation in medium-voltage electrical networks using resistive neutral grounding]. *Electric power. Transmission and distribution*. 2018;4(49):82–85. (In Russ.)
4. Korzhov A.V., Volkov O.V., Korovin Yu.V. Analysis of overvoltage in nonhomogeneous distribution cable grids. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2020; 20(1):22–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200103
5. Kucherenko D.E. [Methods and means of monitoring the condition of cable lines]. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2016;8(7):74–78. (In Russ.)

6. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. *High Voltage Engineering*. Oxford: Newnes; 2000. 534 p.
7. Somsak T., Suwanasri T., Suwanasri C. Remaining Useful Life Estimation for Underground Cable Systems Based on Historical Health Index. *Energies*. 2022;15(24):9447. DOI: 10.3390/en15249447
8. Polyakov D.A. *Monitoring ostatochnogo resursa izolyatsii kabel'nykh liniy 6 (10) kV iz sshitogo polietilena: spetsial'nost' 05.14.02 "Elektricheskiye stantsii i elektroenergeticheskiye sistemy": dis. kand. tekhn. nauk* [Monitoring of the residual insulation life of 6 (10) kV cable lines made of cross-linked polyethylene: specialty 05.14.02 "Electric power stations and electric power systems". Cand. sci. diss.]. Omsk: Omsk State Technical University; 2018. 148 p. (In Russ.)
9. Korzhov A.V. *Kompleksnyy analiz sostoyaniya i povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti kabel'nykh liniy 6 (10) kV s bumazhnoy propitannoy izolyatsiyey v usloviyakh gorodskikh elektricheskikh setey: spetsial'nost' 05.09.02 "Elektrotekhnicheskiye materiala i izdeliya": dis. d-ra tekhn. nauk* [Comprehensive analysis of the condition and improvement of operational reliability of 6 (10) kV cable lines with paper impregnated insulation in urban electrical networks: specialty 05.09.02 "Electrical materials and products". Doct. sci. diss.]. Moscow: All-Russian Research Design and Technological Institute of Cable Industry; 2016. 382 p. (In Russ.)
10. Dubyago M.N. *Razrabotka metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh svoystv kabel'nykh liniy: spetsial'nost' 05.14.02 "Elektricheskiye stantsii i elektroenergeticheskiye sistemy": dis. kand. tekhn. nauk* [Development of methods for diagnostics and forecasting of electrical insulating properties of cable lines: specialty 05.14.02 "Electric power stations and electric power systems". Cand. sci. diss.]. Taganrog: Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); 2020. 200 p. (In Russ.)
11. Gulski E., Cichecki P., Wester F., Smit J.J., Bodega R., Hermans T.J.W.H. et al. On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008;15(6):1691–1700. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712673
12. Shuvalov M.Y., Ovsienko V.L., Peshkov I.B. [Forecasting the residual resource of oil-filled cable lines based on mathematical modeling of the aging process of their electrical insulation]. *Cables and Wires*. 2018;2(370):12–19. (In Russ.)
13. Kuchinskiy G.S. *Chastichnyye razryady v vysokovol'tnykh konstruksiyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad: Energiya, 1979. 224 p. (In Russ.)
14. Partial discharge testing for cables. *Electrical Reliability Services*. Service Data Sheet Ref. No. PM-02-301-A. December 2008. Available at: <https://studylib.net/doc/18561241/partial-discharge-testing-for-cables>.
15. GOST R 51317.2.4–2000 (MEK 61000-2-4-94). *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Elektromagnitnaya obstanovka. Urovni elektromagnitnoy sovместимости dlya nizkочастотных konduktivnykh pomekh v sistemakh elektroснабзheniya promyshlennykh predpriyatiy* [State Standard R 51317.2.4–2000 (IEC 61000-2-4-94). Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic environment. Electromagnetic compatibility levels for low-frequency conductive interference in industrial power supply systems]. Moscow: Gosstandart of Russia, 2000. 16 p. (In Russ.)
16. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017;24(1):217–226. DOI: 10.1109/tdei.2016.005904
17. Polyakov D.A., Nikitin K.I., Tereschenko N.A., Komarov I.V., Polyakova U.V. Study power of partial discharges to voltage intensity in xlpe-insulated cables. *Omsk scientific bulletin = Omskiy nauchnyy vestnik*. 2020;1(169):39–44. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44
18. GOST R 55025–2012. *Kabeli silovyye s plastmassovoy izolyatsiyey na nominal'noye napryazheniye ot 6 do 35 kV vklyuchitel'no* [State Standard R 55025–2012. Power cables with plastic insulation for rated voltage from 6 to 35 kV inclusive]. Moscow: Standartinform, 2014. 35 p. (In Russ.)
19. Charykov A.K. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov khimicheskogo analiza: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Mathematical processing of chemical analysis results: Textbook for universities]. Leningrad: Khimiya; 1984. 168 p. (In Russ.)
20. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal' Yu.S. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: Izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh: ucheb. dlya vuzov* [High voltage technique: Isolation and overvoltage in electrical systems: Textbook for universities]. Leningrad: Energoatomizdat; 1986. 464 p. (In Russ.)
21. STO 34.01-23.1-001-2017. *Ob'yem i normy ispytaniy elektrooborudovaniya* [STO 34.01-23.1-001-2017. Scope and standards of testing of electrical equipment]. Moscow: PJSC Rosseti; 2017. 262 p. (In Russ.)
22. *Tekhnologicheskiye narusheniya. Svodnyye dannyye ob avariynykh otklyucheniyyakh v mesyats po granitsam territorial'nykh zon deyatel'nosti OAO "MRSK Urala" v 2022 godu* [Technological violations. Summary data on emergency shutdowns per month along the boundaries of the territorial zones of activity of MRSK of Urals, JSC in 2022]. Rosseti Ural: website. Available at: <https://rosseti-ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/disturbances/> (accessed 28.02.2023). (In Russ.)
23. Wester F.J., Gulski E., Smit J.J., Seitz P.N. Experiences from On-site PD Measurements using Oscillating Wave Test System. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 1999;16(2):17–25.

Информация об авторах

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korzhovav@susu.ru.

Сафонов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; safonovvi@susu.ru.

Дзюба Михаил Александрович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dziubama@susu.ru.

Бабаев Расим Мирсалам оглы, аспирант, инженер кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asp22brm768@susu.ru.

Коростелев Ян Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; начальник отдела перспективных разработок, АО «Энергия + 21», п. Увельский, Челябинская область, Россия; iankorostelev@gmail.com.

Information about the authors

Anton V. Korzhov, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, Vice-Rector for Research, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korzhovav@susu.ru.

Valery I. Safonov, Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; safonovvi@susu.ru.

Mikhail A. Dziuba, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dziubama@susu.ru.

Rasim M. o. Babayev, Postgraduate Student, Engineer of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ras.babayev9731@gmail.com.

Ian E. Korostelev, Postgraduate Student of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Head of Research and Development Department, “Energy + 21” JSC, Uvelskiy viilage, Chelyabinsk region, Russia; iankorostelev@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 06.03.2023.

The article was submitted 21.02.2023; approved after review 06.03.2023; accepted for publication 06.03.2023.