

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОБОЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

В работе проведено исследование существующих математических моделей разрушения изоляции. Определено, что большинство моделей оценки остаточного ресурса изоляции основаны на моделях термической и термоокислительной деструкции изоляционных материалов. В настоящее время популярностью набирают твердые диэлектрики, среди которых сшитый полиэтилен, ПВХ, этиленпропиленовая резина и другие. В таких диэлектриках возможна оценка остаточного ресурса в краткосрочной перспективе. Эта возможность и необходимость обусловлена возможностью роста древовидных дефектов под воздействием частичных разрядов. В статье описана предлагаемая математическая модель оценки остаточного ресурса изоляции путем моделирования роста дефекта. Для учета влияния случайных величин в модели используется распределение Вейбулла. Модель предполагает разбиение толщины изоляции на некоторые участки, каждый из которых разрушается независимо от других. Разрушение этих участков происходит при возникновении частичных разрядов с определенной энергией, достаточной для разрушения материала. Прогнозирование разрушения изоляции происходит с использованием метода наименьших квадратов. Полученные результаты могут быть полезны при оценке остаточного ресурса изоляционных материалов и при проведении исследований в этой области.

Ключевые слова: пробой изоляции, дефект изоляции, частичный разряд, модель разрушения изоляции, прогнозирование пробоя.

Введение. Постоянно растущие требования к надежности электроэнергетических систем приводят к пересмотру существующих и поиску новых способов решения проблемы аварий на кабельных линиях. Основной причиной возникновения технологических нарушений на высоковольтных кабельных линиях является пробой изоляции. Пробой возникает вследствие уменьшения электрической прочности изоляционного материала, вызванной его постепенным разрушением. Наиболее распространенные решения данной проблемы, основанные на периодическом контроле состояния изоляции, не гарантируют безаварийной работы кабельной линии, так как новый дефект изоляции может возникнуть и развиваться до опасного состояния за очень короткое время [1]. Известно [2], что основным механизмом разрушения изоляции являются частичные разряды. Следовательно, исследование зависимости скорости разрушения изоляции от характеристик возникающих в ней частичных разрядов является актуальной задачей на данный момент. При этом разработка математической модели, отражающей

эту зависимость, может быть полезна для систем непрерывного мониторинга, способных прогнозировать наступление пробоя.

Постановка задачи. В настоящее время не разработано математических моделей, всецело учитывающих факторы разрушения изоляции и отражающих все возможные повреждения, поэтому существует необходимость в исследовании и решении данной проблемы. Целью работы является проведение анализа существующих математических моделей разрушения изоляции и уточнение их параметров с целью приближения к максимально правдоподобной картине разрушения изоляции.

Теория. Процесс разрушения изоляции электрооборудования изучается уже много лет. Существует большое количество математических моделей старения изоляционных материалов. Многие из них описаны в [3–9]. Некоторые математические модели используют зависимость мощности частичных разрядов от напряжения для оценки срока службы изоляции. Известно, что интенсивность частичных разрядов значительно возрастает с увеличением на-

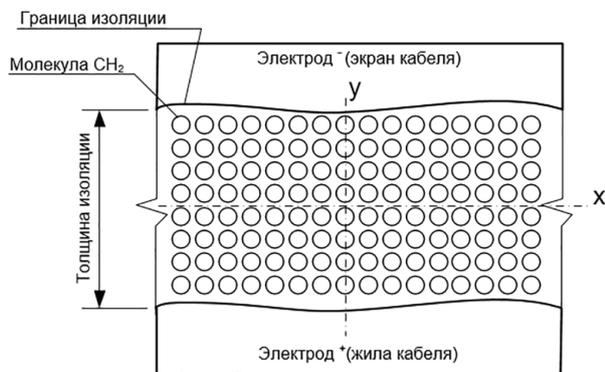


Рис. 1. Срез изоляции кабеля между электродами

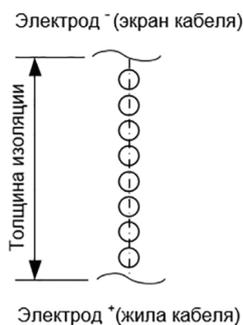


Рис. 2. Упрощенный срез изоляции для построения математической модели

пряжения [10]. При этом зависимость мощности частичных разрядов от напряжения может изменяться во времени из-за роста дефектов.

Для уточнения моделей разрушения изоляции необходимо провести оценку скорости роста дефекта изоляции. В [11] была предложена математическая модель старения изоляции, в которой был произведен расчет вероятности ее пробоя в зависимости от степени разрушения материала. Для расчета брался срез изоляции размером 100×100 клеток. При этом с использованием случайной функции определялись координаты разрушенных клеток, и при разрушении на одной прямой 10 клеток из 100 считалось, что произошел пробой.

Данная модель нуждается в доработке, так как случайная функция не может в полной мере отразить характер роста дефекта. В качестве уточненной модели рассмотрим изоляцию кабеля с некоторой толщиной (рис. 1).

Механизм пробоя твердого диэлектрика заключается в разрыве химических связей в веществе под действием приложенного напряжения, обычно составляющего несколько электронвольт. То есть между электрической прочностью твердого диэлектрика и энергией его химических связей существует прямая зависимость.

Снижение электрической прочности изоляции, вызванное действием ЧР, является основным фактором, влияющим на вероятность возникновения пробоя. Электрическая прочность изоляции — максимально допустимая напряженность электрического поля в изоляционном материале, которую способен выдержать диэлектрик и не допустить

возникновения пробоя. В данном случае толщина изоляции учитывается относительно электродов кабеля (жила и экран). Следовательно, на электрическую прочность изоляции преимущественно влияет количество неразрушенных молекул изоляции по оси Y, которая фактически совпадает с радиальным размером кабеля в цилиндрической системе координат. Тогда рис. 1 можно упростить (рис. 2)

В первую очередь, необходимо определить критерий возникновения пробоя изоляции, то есть критический уровень разрушения материала изоляции по его радиальной оси. В качестве примера возьмем одножильный экранированный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ. Толщина изоляции данного кабеля в среднем равна 4 мм. При этом электрическая прочность сшитого полиэтилена составляет 45–60 кВ/мм. Для оценки худшего случая примем значение электрической прочности равной 45 кВ/мм. Также необходимо учесть, что амплитудное значение напряжения в рассматриваемой сети составляет 14,1 кВ, тогда максимальная толщина изоляции, при которой произойдет пробой, составит около 0,31 мм, что составляет около 7,8 % от толщины изоляции. Примем снижение толщины неразрушенной изоляции до этого значения как критерий возникновения пробоя изоляции.

Разрушение каждой молекулы происходит под воздействием внешних факторов, но в то же время, ввиду большого количества молекул в материале, подчиняется закону распределения случайных величин.

Для учета реального разрушения изоляции под воздействием частичных разрядов необходимо использовать одну или несколько их характеристик. Наиболее рационально использовать мощность частичных разрядов, так как эта характеристика является главным количественным показателем энергетических процессов, протекающих при частичных разрядах.

Предположим, что молекулы изоляционного материала разрушаются на основе распределения Вейбулла, так как оно является адекватной моделью для описания времени безотказной работы многих технических устройств. Тогда основной функцией, определяющей вероятность разрушения одной молекулы, будет зависимость вероятности от энергии частичных разрядов за прошедший известный промежуток времени.

$$F(W) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}, \quad (1)$$

где $x \geq 0$ — случайная величина; $\alpha > 0$ — коэффициент, определяющий форму распределения; β — коэффициент, определяющий масштаб распределения.

При параметре $\alpha = 1$ распределение принимает экспоненциальную форму.

Пусть N_i — количество молекул CH_2 в неразрушенном слое изоляции по радиусу кабеля в момент времени t , а $F(W)$ — функция вероятности разрушения молекулы под действием частичных разрядов, W — энергия частичных разрядов за рассматриваемую единицу времени.

Примем допущение, что количество молекул, разрушенных в некоторый момент времени t , отсчитываемый с момента ввода изоляции в эксплуатацию, равно

$$F_i' = \begin{cases} 0, F(W) < 0,95; \\ 1, F(W) \geq 0,95. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда количество неразрушенных молекул в момент времени t

$$N_i = N_{(i-1)} - F_i'(W), \quad (3)$$

где N_{i-1} — количество неразрушенных молекул в момент времени t .

Учитывая, что процесс роста дефекта изоляции является естественным, так как вызван естественным процессом воздействия электрического поля, примем допущение, что функция изменения количества неразрушенных молекул во времени будет иметь экспоненциальный характер:

$$N(t) = N_0 e^{kt}, \quad (4)$$

где N_0 — количество неразрушенных молекул до начала разрушения, k — эмпирический коэффициент.

Определение параметров функции производится методом наименьших квадратов, суть которого заключается в сведении к минимуму расчетных значений от значений эмпирического ряда. Задача нахождения параметров функции сводится к системе уравнений линейной аппроксимации. Для этой цели полученное уравнение (4) логарифмируется:

$$\ln N = \ln N_0 + kt. \quad (5)$$

Исходя из полученного уравнения и, согласно методу наименьших квадратов, нахождение параметра k сводится к решению уравнения:

$$k \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n \ln N_i, \quad (6)$$

где n — количество эмпирических значений.

При известном параметре k и с учетом допущения, что для пробоя изоляции наибольшая остаточная толщина изоляции должна составлять 7,8 % (при критическом количестве неразрушенных молекул $N_{кр}$), найдем время с начала роста дефекта до пробоя изоляции по формуле:

$$t_{pg} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{k} = \frac{\ln 0,078}{k} = \frac{-2,55}{k}. \quad (7)$$

Учитывая, что количество неразрушенных молекул будет уменьшаться по экспоненте, коэффициент k получится отрицательным и небольшим по значению в силу продолжительности процесса во времени.

Для проверки достоверности модели было проведено экспериментальное исследование по выращиванию искусственных дефектов в изоляции кабеля. В ходе данного исследования в двух идентичных образцах кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена толщиной 4 мм были искусственно созданы дефекты изоляционного слоя путем внедрения заостренного заземляющего электрода. При этом в первый образец кабеля электрод был внедрен на 0,5 мм, а во второй образец — на 2 мм. Таким образом, начальная доля разрушенных молекул в первом образце — 0,125, во втором образце — 0,5.

Данные образцы были подвержены воздействию рабочего напряжения, в результате оба кабеля были пробиты. Пробой первого образца произошел через 256 минут, пробой второго образца через 160 минут. Подставив результаты данного эксперимента в полученную математическую модель, получим:

$$t_{pg(1)} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{k} = \frac{\ln 0,208}{k} = \frac{-1,57}{k}. \quad (8)$$

$$t_{pg(2)} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{k} = \frac{\ln 0,089}{k} = \frac{-2,42}{k}. \quad (9)$$

Учитывая, что прочие условия эксперимента в обоих случаях были идентичны, можно принять, что параметр k для обоих образцов одинаков. Тогда отношение времени роста дефекта первого образца ко второму:

$$\frac{t_{pg(1)}}{t_{pg(2)}} = \frac{-2,42}{-1,57} = 1,54. \quad (10)$$

Реальное отношение времени пробоя из результатов эксперимента:

$$\frac{t_{np(1)}}{t_{np(2)}} = \frac{256}{160} = 1,6. \quad (11)$$

Относительная погрешность результатов модели к реальным результатам эксперимента:

$$\delta_A = \frac{1,6 - 1,54}{1,6} = 0,0375. \quad (12)$$

Заключение. В результате исследования разработана математическая модель разрушения изоляционного материала под воздействием частичных разрядов. Предложенная модель была проверена с использованием экспериментальных данных. Полученные результаты показали достаточно малое значение относительной погрешности модели. Таким образом, модель учитывает воздействие импульсов ЧР и предполагает оценку вероятности разрушения некоторого объема материала.

Также на основе полученной модели возможна оценка времени с начала роста дефекта до возникновения пробоя. Таким образом, предложенная математическая модель может служить основанием для оценки остаточного ресурса изоляционного материала.

Библиографический список

1. 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, no. 6. P. 1089–1107. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.
2. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 224 с.
3. Zhurkov S. N. Kinetic concept of strength of solids // Intern. J. Fract. Mech. 1965. Vol. 1. P. 311–323. DOI: 10.1007/BF00962961.
4. 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, no. 6. P. 1089–1107. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1561789.

5. 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, no. 4. P. 1168–1179. DOI: 10.1109/TDEI.2009.5211872.

6. Mazzanti G. Life and reliability models for high voltage DC extruded cables // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33, no. 4. P. 42–52. DOI: 10.1109/MEI.2017.7956632.

7. Parpal J. L., Crine J. P., Dang C. Electrical aging of extruded dielectric cables: A physical model // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1997. Vol. 4, no. 2. P. 197–209. DOI: 10.1109/94.595247.

8. Поляков Д. А. Математическая модель расчета остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 66–69.

9. Polyakov D. A., Koshchuk G. A., Nikitin K. I. Definition of the remaining life of power-transmission lines with cross-linked polyethylene insulation // Russian Electrical Engineering. 2017. No. 88. P. 271–273. DOI: 10.3103/S1068371217050091.

10. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А. [и др.]. 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.

11. Никитин К. И., Поляков Д. А. Определение срока службы изоляции // Фундаментальные исследования. 2015. № 3. С. 129–132.

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: B-7950-2016

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

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

МИРОШНИК Вадим Юрьевич, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 7967-0306

AuthorID (РИНЦ): 824259

Адрес для переписки: miroshnikovad@gmail.com

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 11.01.2021 г.

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

В. Ю. Мирошник