

УДК 621.316

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ

Никитин К.И., Поляков Д.А.

*ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет»,
Омск, e-mail: polyakowdmitry@yandex.ru*

В статье проведен расчет срока службы полиэтиленовой изоляции высоковольтного электрооборудования в условиях эксплуатации на основе разработанной модели ее старения в электрическом поле. Предложена модель старения, в основу которой положен анализ молекулярных структур и свойств полиэтиленовой изоляции с учетом факторов, влияющих на нее. Для моделирования процессов, происходящих при старении изоляции был взят ее срез размером 100×100 молекул (CH_2), в котором был смоделирован пробой изоляции, при накоплении усталостных явлений при микроразрушении этих молекул под воздействием электрического поля. Для вычисления набора таких микроразрушений была разработана программа, автоматически определяющая пробой изоляции и записывающая их статистику в зависимости от количества пробитых молекул. Исходя из данных, полученных в ходе моделирования, был произведен расчет среднего срока службы изоляции. Расчетные теоретические результаты близки к реальным срокам службы изоляции высоковольтного электрооборудования в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: срок службы изоляции, изоляция электрооборудования, частичные разряды в изоляции, модель старения изоляции

INSULATION SERVICE LIFE DETERMINATION

Nikitin K.I., Polyakov D.A.

Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: polyakowdmitry@yandex.ru

High voltage equipment PE-insulation operating life is calculated in this paper. Calculation was made on the basis of the model of insulation aging under the influence of the electrical field. The model of insulation aging proposed is based on the molecular structure and characteristics of PE-insulation analysis. Besides, insulation influencing factors are taken into account. To model the occurrences during insulation aging process was taken its cut in size of 100×100 (CH_2) molecules. In this cut has been modeled insulation breakdown with the accumulation of fatigue phenomena of molecules microfracture under the electrical field influence. The insulation breakdown determining and its statistics in dependence of the number of molecules pierced recording program has been developed to calculate the set of microfractures. Starting from the data obtained during the modeling the average lifetime calculation was made. Estimated theoretical results correspond to the real high voltage equipment insulation operating life under service conditions.

Keywords: insulation operating life, electrical equipment insulation, partial discharges in the insulation, insulation aging model

Актуальность. Все электротехнические установки содержат изоляционные материалы. Широко распространенным является полиэтилен с различными модификациями. Исследование природы его разрушения под воздействием электрического поля, определение срока службы является актуальной задачей, так как от этого зависит надежность работы всей электроустановки. Знание процесса старения изоляции поможет разработать и использовать защиту, которая будет определять остаточный ресурс изоляции электроустановки [4, 5, 6].

Модель старения изоляции. Ухудшение изоляционных свойств происходит по известным причинам: температура, электрическое и магнитное поля, механическое воздействие, световое (в большей степени ультрафиолетовое) воздействие, естественная радиация, влажность и некоторые другие факторы.

Зависимость температурного воздействия на скорость химических реакций описана известным законом Аррениуса:

$$K_t = K \cdot e^{\frac{-W_a}{kT}}, \quad (1)$$

где K_t – средняя вероятность распада одной молекулы в единицу времени, определяющая скорость химических реакций; K – постоянная, зависящая от структуры веществ, вступающих в реакцию; W_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана.

Можно предположить методом аналогий, что и другие факторы воздействия могут иметь подобный закон ухудшения изоляционных свойств материалов.

Причины старения в полиэтиленовой изоляции неизбежны, как технологические, так и эксплуатационные. К таким дефектам относятся микроразмерные воздушные полости, посторонние включения, трещины и др. Они появляются в изоляции в процессе

ее изготовления или прокладки и функционирования кабелей вследствие, например, периодических сжатий и расширений материала в режимах нагрузки. Эти микропустоты заполнены газом из-за возникновения водяного пара и наличия летучих продуктов в производственных процессах сшивки и экструзии изоляции [2].

Рассмотрим частный случай старения изоляции в электрическом поле (ЭП) высокой напряженности. Под действием ЭП старение происходит за счет развития в изоляции частичных разрядов [3]. Периодически повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию путем появления в ней микротрещин, что приводит в итоге к ее пробое.

Для определения степени деградации изоляции, ведущей к пробое, найдем закон распределения появления дефектов в диэлектрике. Рассмотрим процесс старения изоляции материала на примере насыщенного полимера – полиэтилена.

В химической формуле полиэтилена, представленной на рис. 1, при пробое разрушаются связи атома углерода с соседними атомами углерода и образуются свободные атомы водорода, которые могут стать причиной возникновения пузырьков [8].

Образующийся несвязанный водород выбивается в качестве положительно заряженного иона H^+ , который, в свою очередь, способствует ионизации и дальнейшему разрушению молекулярной структуры полиэтилена в целом и впоследствии, захватывая свободный электрон, становится нейтральным, а углерод становится проводящей микрочастицей. При этом соседние атомы углерода образуют связи между собой.

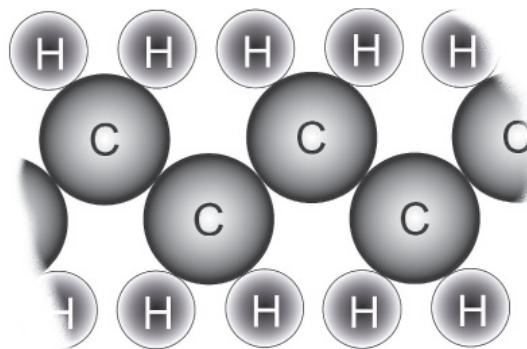


Рис. 1. Молекула полиэтилена

Кроме того, возможен вариант, когда свободный водород образует связи с соседними атомами углерода в неразрушенных молекулах и образует концевые группы. При разрушении такой связи под воздействием электрического поля образуется свободный водород и концевая группа с соседним атомом углерода.

Рассмотрим упрощенную модель изоляции из полиэтилена как срез размерами 100×100 молекул CH_2 , в которых может произойти пробой под воздействием электрического поля (рис. 2).

Представим квадрат (100×100) как систему координат, где координаты пробоя определяются случайно.

Электрическая прочность полиэтилена составляет $45 \dots 60$ кВ/мм [7]. Толщина изоляции жилы кабелей с рабочим напряжением 10 кВ составляет $5,5$ мм. Однако для проверки таких кабелей используют напряжение 25 кВ. Тогда на 1 мм толщины изоляции кабеля приходится напряжение $25/5,5 = 4,55$ кВ/мм. Следовательно, необходимо пробить $(4,55/45) \cdot 100\% = 10\%$ клеток, что при размере 100×100 составляет $100 \cdot 0,1 \approx 10$ клеток.

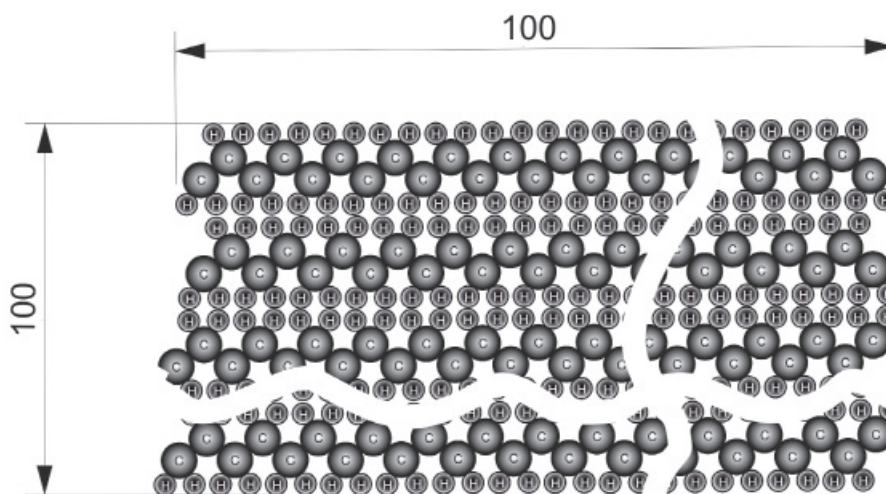


Рис. 2. Модель изоляции в виде среза 100×100 молекул CH_2

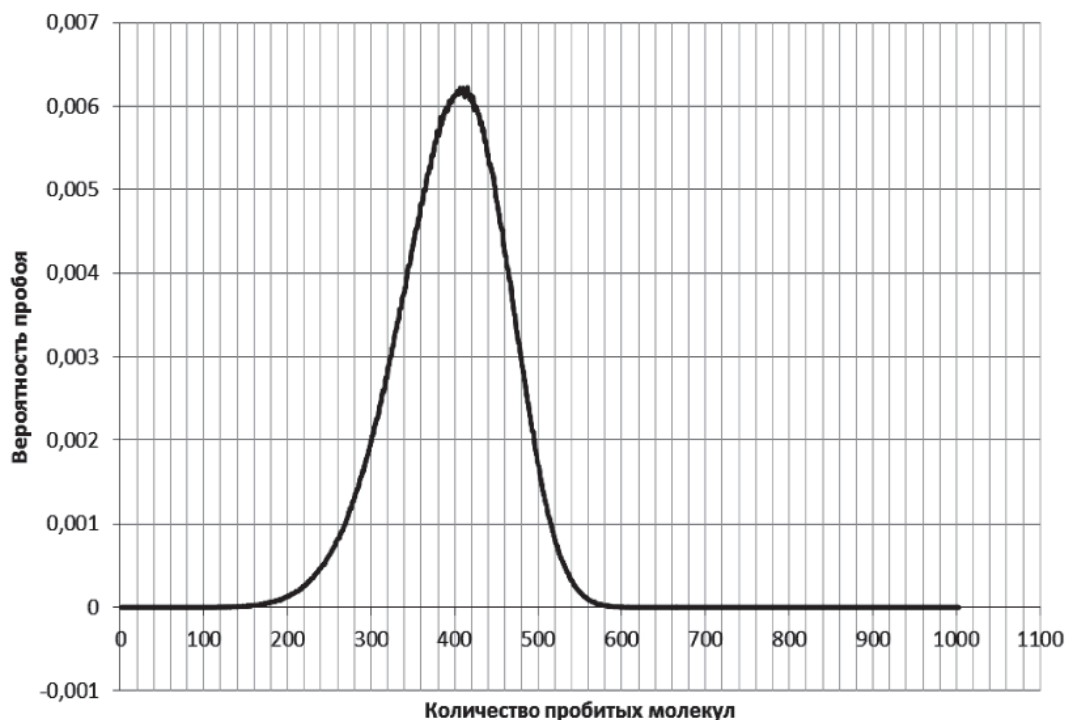


Рис. 3. График зависимости вероятности пробоя участка изоляции от количества пробитых молекул CH_2

Для сбора статистических данных по пробую изоляции была написана программа, в которой с использованием случайной функции `gandom()` были получены различные комбинации координат, записывалась статистика количества выпавших до пробоя координат. Полученный график (рис. 3) показывает, что пробой указанного участка изоляции происходит по нормальному закону распределения.

Согласно полученной зависимости основная часть пробоев изоляции приходится в промежутке от 300 до 500 пробитых молекул. Для расчета примем среднее значение в 400 молекул. Размер поля для расчета составляет 100×100 клеток, то есть всего на поле 10 000 молекул. Таким образом, для пробоя изоляции достаточно пробить 4% молекул, при условии, что при каждом частичном разряде будет пробиваться только одна молекула, тогда как в действительности за один частичный разряд может пробиться большее количество молекул. В связи с этим примем, что для полного пробоя изоляции необходимо пробить 1% молекул.

Рассчитаем количество молекул в квадрате со стороной 5,5 мм полиэтилена, что составляет $30,25 \text{ мм}^2$. Размеры мо-

лекулы этилена составляют $0,2534 \text{ нм}$. Расстояние между молекулами CH_2 $l = \frac{0,2534}{2} = 0,1267 \text{ нм}$ [7], следовательно, количество молекул CH_2 в $5,5 \text{ мм}$ можно рассчитать по формуле

$$n = \frac{h}{l} = \frac{5,5 \cdot 10^{-3}}{0,1267 \cdot 10^{-9}} = 4,34 \cdot 10^7,$$

где h – толщина полиэтиленовой изоляции; l – длина связей между молекулами CH_2 .

Найдем количество молекул CH_2 в $30,25 \text{ мм}^2$.

$$m = n^2 (4,34 \cdot 10^7)^2 = 1,88 \cdot 10^{15}$$

Зная количество молекул (CH_2) в $30,25 \text{ мм}^2$ и принимая, что для полного пробоя изоляции необходимо пробить 1% клеток, получаем, что в среднем нужно пробить $1,88 \cdot 10^{13}$ молекул.

Согласно [9], появление частичных разрядов во многом зависит от фазового угла напряжения, особенно при возрастании напряжения от 0 до амплитудного значения, причем независимо от полярности. Частота сигналов частичных разрядов лежит в диапазоне 30–40 кГц [10]. Однако сигналы

частичных разрядов представляют собой не непрерывный сигнал, а кратковременные всплески тока. Исходя из этого, для расчета срока службы изоляции примем среднюю частоту появления частичных разрядов за все время эксплуатации электрооборудования в размере 8 кГц.

Средний срок службы изоляции можно рассчитать по формуле

$$T = \frac{m_{\text{cp}}}{f \cdot t_1 \cdot t_2} = \frac{1,88 \cdot 10^{13}}{8 \cdot 10^3 \cdot 3600 \cdot 8760} = 74,5 \text{ года,}$$

где m_{cp} – среднее количество молекул полиэтилена, которое нужно пробить, для того чтобы изоляция вышла из строя; t_1 – количество часов в году; t_2 – количество секунд в одном часе; f – средняя частота появления частичных разрядов.

Выводы

Расчетные данные близки к реальным эксплуатационным срокам службы изоляции высоковольтного оборудования. Поэтому данная модель может быть использована для расчета остаточного ресурса службы и проведения последующих исследований с учетом внешних и внутренних факторов, влияющих на изоляцию.

Список литературы

1. Конкин А.А., Зверев М.П. Полиолефиновые волокна. – М.: Изд-во «Химия», 1966.
2. Кучерявая И.Н. Численное исследование распределения электрического и температурного поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с микровключением // Труды Института электродинамики НАН Украины. Вып. 31. – Киев, 2012. – С. 30–36.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – М.: Изд-во «Энергия», 1979.
4. Никитин К.И., Горюнов В.Н., Сарычев М.М. Оперезающий автоматический ввод резерва собственных нужд электрических станций и подстанций // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 211–213.
5. Никитин К.И., Сидоров О.А., Вывра А.А., Сарычев М.М. Возможные направления совершенствования релейной защиты // Омский научный вестник. – 2009. – № 1 (77). – С. 130–133.
6. Никитин К.И. Принципы построения, алгоритмы и модели токовых защит электроэнергетических систем: монография. – Омск: ОмГТУ, 2012. – 240 с.: ил. – ISBN 978-5-8149-1260-2.
7. Справочник по электротехническим материалам; под ред. Корицкого и др. – Л., «Энергия», 1976.

8. Тютнев А.П., Саенко В.С., Кундина Ю.Ф., Пожидаев Е.Д., Ванников А.В. Подвижность избыточных носителей заряда в полиэтилене низкой плотности // Химическая физика. – 2002. – Т. 21, № 7. – С. 30–40.

9. Deshpande A.S., Mangalvedekar H.A., Cheeran A.N. Partial discharge analysis using energy patterns // Electrical Power and Energy Systems. – 2013. – № 53. – P. 184–195.

10. Hung-Cheng Chen, Feng-Chang Gu, Meng-Hui Wang A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus // Expert Systems with Applications. – 2012. – № 39. – P. 3423–3431.

References

1. Konkin A.A., Zverev M.P. Poliolefinovyie volokna. Izd. «Khimiya». M., 1966.
2. Kucheryavaya I.N. Chislennoe issledovanie raspredeleniya elektricheskogo i temperaturnogo polya v polietileno-voiy izolyatsii silovogo kabelya s mikrovklyucheniem // Trudy Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy Vyp. 31. Kiev, 2012. pp. 30–36.
3. Kuchinskiy G.S. Chastichnye razryady v vysokovolt-nykh konstruksyyakh. Izd. «Energiya», 1979.
4. Nikitin K.I. Goryunov V.N., Sarychev M.M. Operezhayuschiy avtomaticheskii vvod rezerva sobstvennykh nuzhd elektricheskikh stantsiy i podstantsiy // Omskiy nauchnyy vestnik. 2011. no. 3 (103). pp. 211–213.
5. Nikitin K.I., Sidorov O.A., Vyrva A.A., Sarychev M.M. Vozmozhnye napravleniya sovershenstvovaniya reley- noy zaschity // Omskiy nauchnyy vestnik. 2009. no. 1 (77). pp. 130–133.
6. Nikitin K.I. Printsipy postroeniya, algoritmy i modeli tokovykh zashchit elektroenergeticheskikh sistem: Monografiya. Omsk: OmGTU, 2012. 240 p.: il. ISBN 978-5-8149-1260-2.
7. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam pod red. Koritskogo i dr. L., «Energiya», 1976.
8. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Kundina Yu.F., Pozhidaev E.D., Vannikov A.V. Podvizhnost izbytochnykh nositeley zaryada v polietilene nizkoy plotnosti // Himicheskaya fizika. 2002. T. 21, no. 7. pp. 30–40.
9. Deshpande A.S., Mangalvedekar H.A., Cheeran A.N. Partial discharge analysis using energy patterns // Electrical Power and Energy Systems 53 (2013) 184–195.
10. Hung-Cheng Chen, Feng-Chang Gu, Meng-Hui Wang A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus // Expert Systems with Applications 39 (2012) 3423–3431.

Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника», Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск;

Новожилов А.Н., д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар.

Работа поступила в редакцию 09.02.2015.