

УДК 621.315.611

Н. К. Полуянович, М. Н. Дубяго, О. В. Качелаев
(Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия)
Тел: 89508609983, E-mail: nik1-58@mail.ru

РАДИКАЛЬНО-ЦЕПНОЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ

Статья посвящена разработке метода неразрушающего контроля материала изоляции кабельных систем. Рассмотрена деструкция полимерного материала, обусловленная радикально-цепным механизмом разрушения. Приведен механизм деструкции полиэтилена, вызванный электронной и ионной бомбардировкой под действием частичных разрядов (ЧР). Показано образование сшивок, связанное с активацией двойных связей при передаче электронной энергии возбуждения от полиэтиленовой цепи.

Ключевые слова: надежность кабельных систем, разрушение полимерного изоляционного материала, радикально-цепной механизм разрушения, частичные разряды, диагностика, остаточный ресурс.

N. K. Poluianovich, M. N. Dubyago, O. V. Kachelaev

RADICAL-CHAIN MECHANISM OF DESTRUCTION OF POLYMERIC ELECTRICAL INSULATING MATERIALS BY PARTIAL DISCHARGES

The article is devoted to the development of a method of non-destructive testing of the insulating material of cable systems. The destruction of a polymer material caused by a radical chain mechanism of destruction is considered. The mechanism of destruction of polyethylene caused by electron and ion bombardment under the action of partial discharges (PD) is given. The formation of cross-links associated with the activation of double bonds during the transfer of electronic excitation energy from a polyethylene chain is shown.

Keywords: reliability of cable systems, destruction of polymer insulating material, radical chain mechanism of destruction, partial discharges, diagnostics, residual resource.

1. Введение

Силовые кабельные линии (СКЛ) являются одним из основных элементов электрических сетей систем электроснабжения [1]. Главной задачей эксплуатационного персонала является контроль и поддержание электроизоляционных свойств изоляции на уровне, исключающем её аварийный выход из строя [2]. Успешное решение данной проблемы невозможно без представления о физических процессах и факторах, вызывающих старение изоляционных материалах (ИМ) [2, 3]. Проблема образования и развития ЧР в ИМ в условиях ее эксплуатации представляет большой интерес как для персонала, эксплуатирующего оборудование, так и для разработчиков оборудования и исследователей ИМ. Таким образом целью работы является разработка методики диагностирования остаточного ресурса электроизоляции КЛ, основанная на контроле параметров и технического состояния.

2. Основное содержание и результаты работы

Виды дефектов в СКЛ. Для оценки степени деструкции электроизоляционного материала выделяют следующие виды дефектов: дефекты, вызванные ошибками проектирования; ухудшение свойств изоляции в результате недопустимого перегрева токами нагрузки из-за ошибочно заниженного сечения, жил кабеля; повреждения в аварийных режимах из-за неправильного выбора защитной аппаратуры и т.п.

К заводским дефектам, возникающим при производстве кабелей относятся трещины или сквозные отверстия в оболочке; заусенцы на проволоках токопроводящих жил и т.п.

К дефектам прокладки кабеля относятся крутые изгибы кабеля на углах поворота трассы; механические повреждения (изломы, вмятины, порезы, перекрутка кабеля); несоблюдение допустимых расстояний до объектов которые могут негативно влиять на кабели (теплотрасса, рельсовые пути электрифицированного транспорта) и т.п.

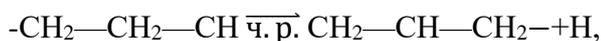
Характеристики и методы регистрации ЧР. Возникновение каждого единичного ЧР приводит к выделению в ИМ энергии $W_{чр}$ [2]. Разрушающее действие ЧР на диэлектрические материалы обуславливается следующими факторами [2]: – воздействием излучения, возникающего в процессе развития ЧР; – воздействием химически активных продуктов (озон, окислы азота и др.), образующихся в воздухе (газах) во включении при наличии ЧР; – развитием древовидных побегов (дендритов); – тепловым воздействием.

Диагностика СКЛ по частичным разрядам. Эффективным, неразрушающим методом диагностирования электротехнического оборудования под рабочим напряжением является метод диагностики по ЧР, позволяющий выявлять быстроразвивающиеся локальные дефекты [1]. Метод основан на локализации ЧР в проблемных местах кабельной линии по фазам СКЛ. На основании полученных формул составлена математическая модель развития ЧР [1] и формирования теплового пробоя:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{чр} = \frac{U_{в.пр} \varepsilon_{п} h}{\delta K_H \varepsilon_B \sqrt{2}}; \\ U_B = U \varepsilon_{п} \cdot h_B / h; \\ q_{чр} = q / \left(1 + \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_{п}} \left(1 - \frac{h_B}{h} \right) \right); \\ W_{чр} = q_{чр} U_{чр} (1 + \eta) / \sqrt{2}; \\ Q_{oi} = \Delta U_{i,раб}^2 \omega C_i \operatorname{tg} \delta_i / l_i. \end{array} \right. \quad (1)$$

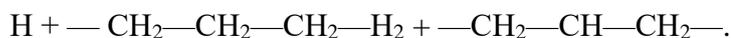
Критериями оценки работоспособности высоковольтных кабелей по данному методу являются: напряжение возникновения ЧР U_B ; уровень ЧР q ; коэффициент старения $P_{ст}$; коэффициент нелинейности Q_S , а также частота ЧР и их интенсивность [1].

Радикально-цепной механизм разрушения. Механизм деструкции полиэтилена, обусловленный электронной и ионной бомбардировкой, при действии ЧР представим следующими реакциями и процессами. При сшивании полиэтилена образуются свободные радикалы типа $-\text{CH}_2-\dot{\text{C}}\text{H}-\text{CH}_2-$ и атома водорода в результате разрыва связи углерод – водород при бомбардировке полиэтилена электронами и ионами ЧР:



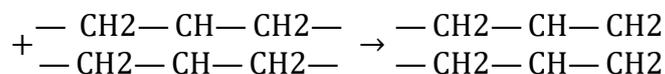
где буквы ч.р. обозначают воздействие ЧР.

Атом водорода отрывает другой атом у соседней цепи, оставляя новый свободный радикал в положении, благоприятном для реакции с первым свободным радикалом, и образуя молекулярный водород:

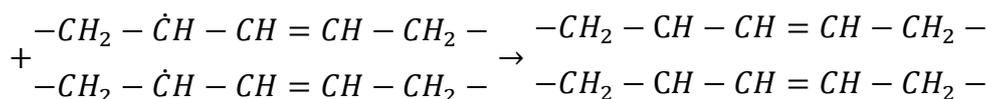


Скорость выделения водорода характеризует разложение диэлектрического материала при воздействии ЧР.

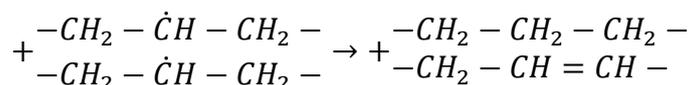
Появившиеся свободные радикалы взаимодействуют и образуют связи между цепями:



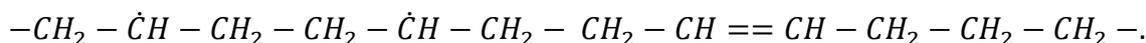
При образовании радикалов типа $-CH_2-CH-CH = CH-CH_2-$ сшивание можно представить по схеме [8]:



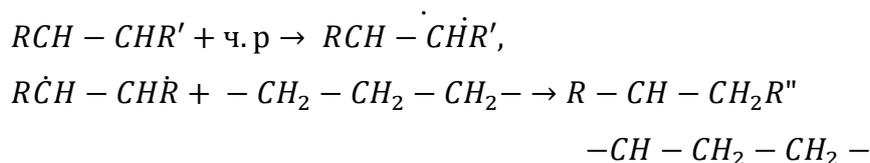
Образование двойных связей трансвиниленового типа в полиэтилене (ПЭ) при действии ЧР объясняется как результат взаимодействия двух радикальных центров в соседних полимерных цепях, что сопровождается переносом атома водорода [8]:



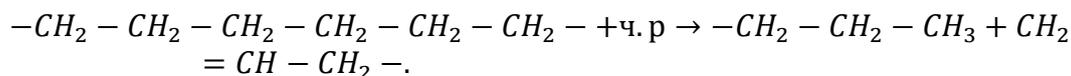
и миграции свободной валентности вдоль цепи до встречи с другой свободной валентностью [16]:



При воздействии ЧР количество двойных связей трансвиниленового типа с увеличением дозы поглощенной энергии достигает насыщения. При определенной концентрации этих связей начинается их распад. Это явление, возникающее в результате активации двойных связей при передаче энергии электронного возбуждения от полиэтиленовой цепи, связывают с образованием поперечных связей [8]:

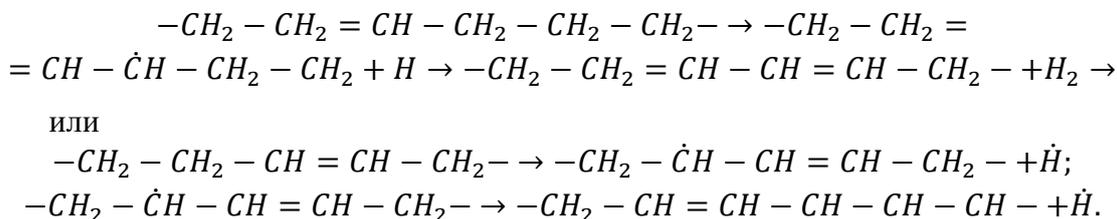


Одновременно с процессом сшивания протекает и процесс деструкции, который сводится к разрыву химической связи в главной цепи ПЭ, в частности, под действием ионизирующего излучения. Разрыв связей между атомами углерода в главной цепи ПЭ с образованием двух осколков цепи [4]:

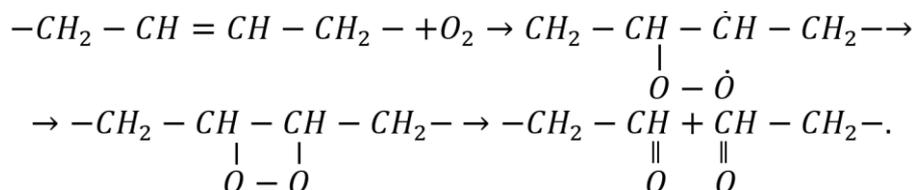


При воздействии ЧР на ПЭ в воздухе происходит также изменение соотношения групп CH_3/CH_2 , что является результатом разрыва цепи.

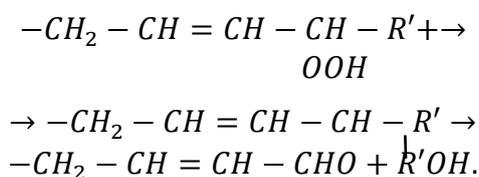
Образование второй сопряженной связи возможно также после появления аллильного радикала [17]:



Примерно половина всего выделяющегося водорода образуется при возникновении углерод-углеродных двойных связей [4]. Увеличение интенсивности поглощения полосы 1640 см^{-1} свидетельствует о разрыве цепей ПЭ [4], а при разрыве главной цепи должны образовываться сопряженные двойные связи винильного типа [4]. Наличие насыщения в изменении интенсивности поглощения полосы 1640 см^{-1} как при воздействии ЧР в воздухе указывает на возможность не только увеличения количества сопряженных двойных связей с ростом дозы поглощенной энергии, но и их разрушения при достижении определенной концентрации. Окисление ПЭ по месту двойной связи, вызванное ЧР, с образованием карбонильных групп и разрывом цепи, протекает по схеме [4]:



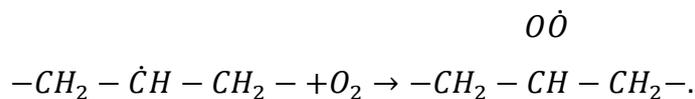
Окисление полимеров рассматривается так же, как процесс, протекающий с разрывом цепи у метиленовых групп (в основном) в альфа-положении к двойным связям [4]. Метиленовая группа, соседняя с двойной связью, более чувствительна к окислению, и этот процесс происходит следующим образом [20]:



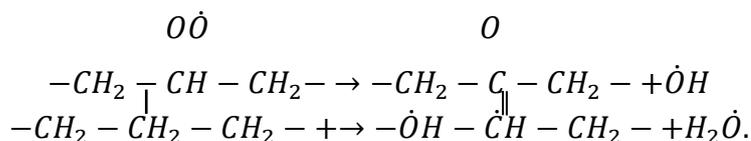
Однако не наблюдается увеличения интегральной интенсивности поглощения в области $3350\text{--}3450\text{ см}^{-1}$ (группы OH) при воздействии на ПЭ ЧР в среде воздуха в течение 40-45 ч. Таким образом, при гамма-облучении полиэтилена на воздухе происходит образование структур, содержащих группы, OH, количество которых увеличивается с увеличением дозы облучения.

При дальнейшем росте времени воздействия ЧР интенсивность увеличивается, достигая насыщения, так как одновременно с образованием в поверхностном слое ПЭ структур, содержащих группы OH, происходит их разрушение бомбардирующими электронами и ионами ЧР.

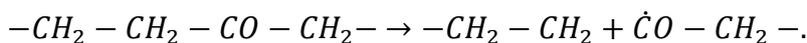
Свободные радикалы, образовавшиеся при этом, вступают в реакцию с кислородом, образуя пероксирадикалы:



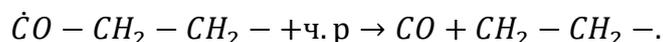
Последующие реакции с участием свободных радикалов, обуславливающие образование карбонильных групп, разрыв основных цепей полиэтилена, выделение H₂O, CO и CO₂, которые могут проходить двумя различными путями, представим одну из них схемой [4]:



После этого реакция продолжается. Наличие карбонильных групп в главной цепи полиэтилена обуславливает ослабление межуглеродных связей и последующее дробление цепи [4]:



Распад карбонильных групп, по-видимому, инициируется ЧР и происходит следующим образом:



Этим процессом, наряду с механическим разрушением окисленных структур, обуславливается наличие насыщения в зависимости интенсивности поглощения полосы 1720 см⁻¹ в инфракрасном спектре ПЭ от времени воздействия ЧР. Для выяснения закономерностей изменения свойств и характеристик диэлектрических материалов при воздействии ЧР можно использовать метод инфракрасной (ИК) спектроскопии, как один из наиболее информативных. При этом контроль изменения ИК спектров проводится по интегральной интенсивности полос поглощения A_и.

На рисунке 1,а приведены зависимости интенсивности ИК спектра полосы поглощения ПЭ (A_и) от плотности тока в диэлектрике (j), На рисунке 1, б приведены зависимости интенсивности A_и от времени воздействия τ_в (τ_в > 40 ч.) при j = 0,2 мкА/мм² (штриховые линии) и 2,5 мкА/мм² (сплошные линии) полос поглощения инфракрасных спектров ПЭ 1720 (1); 890 (2); 721–731 (5, 7); 1460–1470 (4, 6); 1305 см⁻¹ (5,5). На рисунке 1, в приведены зависимости интенсивности A_и от времени τ_в полосы поглощения 1720 см⁻¹ инфракрасного спектра ПЭ (3), ПЭ + 1% БК СО, ПЭ+ 1% ФБНА–фенил-бета-нафтиламин (2), ПЭ +1% ФБНА, облученного дозой 0,05 МДж/кг (4), ПЭ и ПЭ + 1% ФБНА, облученных дозой 0,5 МДж/кг (5). Образовавшиеся радикалы вступают в реакцию с кислородом, и цепная реакция разрушения полиэтилена под действием ЧР продолжается. В результате окисления СО в плазме разряда образуется СО₂. Таким образом, радикально-цепной механизм разрушения полимерных диэлектрических материа-

лов при воздействии ЧР наиболее полно отражает явления и процессы разрушения, вызванные ЧР. Знание механизма разрушения позволяет наметить пути и способы предотвращения или торможения этих процессов и, тем самым пути и способы повышения срока службы изоляции СКЛ, подвергающихся воздействию ЧР [5].

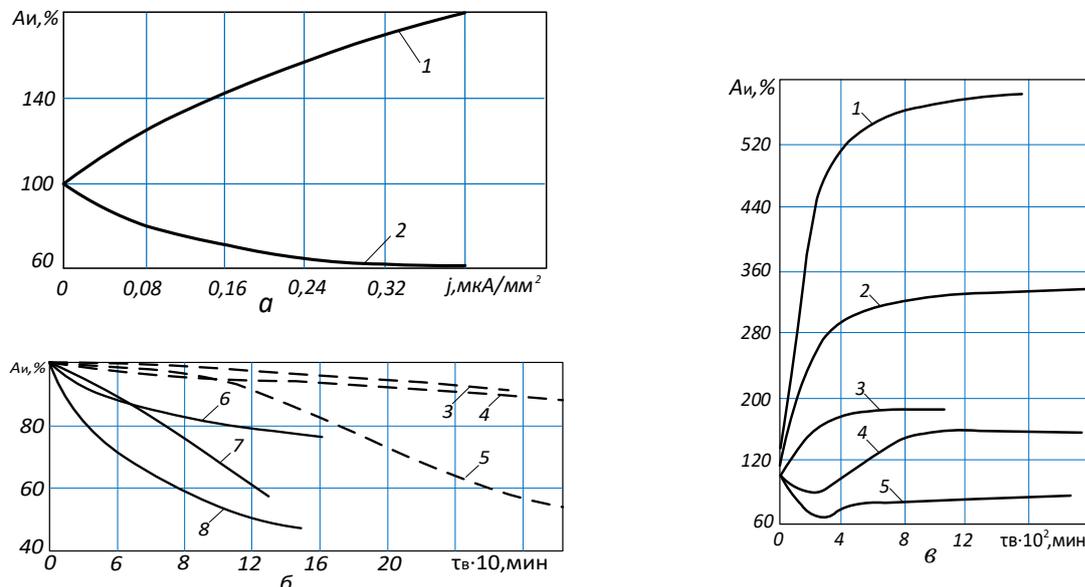


Рисунок 1. Зависимости интенсивности A_i от плотности тока j

Экспериментальные исследования. Для исследования процесса развития ЧР а, следовательно, механизмов старения и электрического пробоя ИМ, необходимо определить параметры ЧР, а именно установить связь между напряжением возникновения $U_{чр}$, его максимальным значением кажущегося заряда $q_{чр}$ и высотой включения h_v . На рисунке 2 представлены результаты измеренных уровней интенсивности ЧР, а также распределение ЧР в изоляции вдоль КЛ.

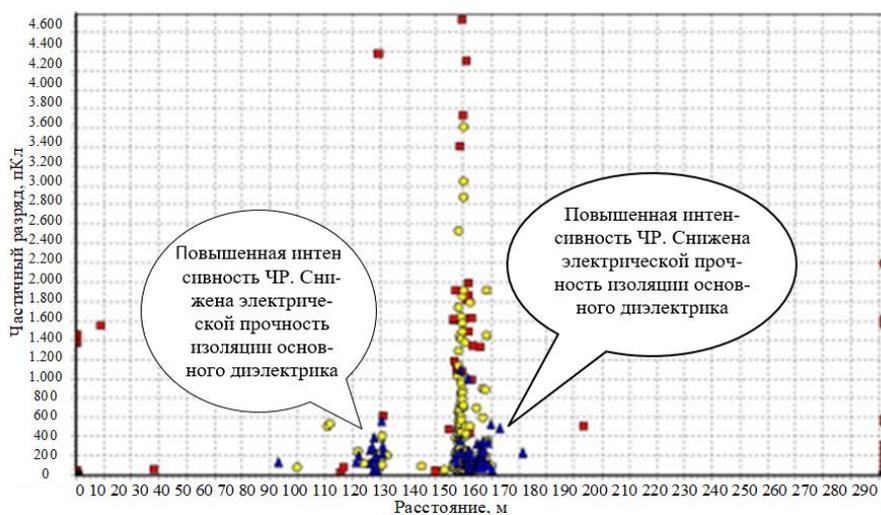


Рисунок 2. Распределение и интенсивности ЧР в изоляции КЛ

Результаты проведенного обследования кабельной линии позволяют оценить ее техническое состояние, так как: – на отметках 100–110 м, 130–150 м по всем фазам от ТП–173 зафиксирована повышенная интенсивность ЧР; – обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции в кабельной линии.

3. Заключение

Разработана методика диагностирования остаточного ресурса электроизоляции КЛ, основанная на контроле параметров и технического состояния. Предложенная методика отличается от существующих использованием напряжения, выделяемого самим ЧР. Обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции кабеля. Если происходит общее изменение структуры ИМ, например, изменение химической структуры, связанное с развитием теплового пробоя, то необходимо иметь в виду прежде всего мощность (Р) ЧР. Предложенная методика диагностирования ИМ СКЛ в условиях эксплуатации позволяет оценивать текущее состояние изоляции (место и степень пробоя, геометрические характеристики включений) и прогнозировать остаточный ресурс кабельных линий электрических сетей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дубяго М. Н., Полуянович Н. К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с.
2. Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях [Текст] // Ленинград: Энергия, Ленинград, отд., 1979. – 224 с.
3. Anders G. J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39. – № 3. – P. 619–626.
4. Н. С. Ильченко, В. М. Кириленко. Полимерные диэлектрики. // Техника, 1977, 160 с.
5. Dubyago, M., Poluyanovich, N. Partial Discharge Signal Selection Method for Interference Diagnostics of Insulating Materials // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019 8792693, pp. 124-127.

Поступила в редколлегию 07.02.2024 г.