

**Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго**

**ОЦЕНКА ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРНОГО ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО  
МАТЕРИАЛА ИЗ-ЗА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ  
И РАДИКАЛЬНО-ЦЕПНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ**

*Статья посвящена разработке метода неразрушающего контроля изоляционного материала кабельных систем. Исследована деструкция полимерного материала, вызванная радикально-цепным механизмом разрушения. Приведен механизм деструкции полиэтилена, обусловленный электронной и ионной бомбардировкой, при действии частичных разрядов (ЧР). Показано образование поперечных связей, связанное с активацией двойных связей при передаче энергии электронного возбуждения от полиэтиленовой цепи. При воздействии ЧР количество двойных связей трансвиниленового типа с увеличением дозы поглощенной энергии достигает насыщения. Система диагностики по ЧР с использованием комплекса характеристик включений ЧР ( $S_B$ ,  $q_{CR}$ ,  $h_B$ ) количеством выделяемого тепла ( $Q$ ) и напряжении зажигания ( $U_B$ ), получаемых разработанным программным обеспечением, является эффективной как для оценки текущего состояния изоляции, так и для прогнозирования ее остаточного ресурса. Обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции кабеля. В рамках проведенного исследования построена нейросетевая (НС) модель, описывающая архитектуру кибер-физической системы (КФС) прогнозирования ресурса ЭМ кабельных электрических сетей. Синтезирован алгоритм работы адаптивной системы, подбора параметров и обучения НС с последующим прогнозированием ресурса силовой кабельной линии (СКЛ), позволяющее повысить надежность КФС за счет сокращения времени создания оптимальной конфигурации НС. Полученная НС модель может быть эффективно использована для анализа термофлуктуационных процессов, протекающих в объекте управления – СКЛ, и прогноза поведения объекта. Приведена методика диагностирования изоляционного материала (ИМ) СКЛ в условиях эксплуатации. Анализ полученных результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на электроизоляцию СКЛ различных факторов и определять степень её деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения.*

*Надежность кабельных систем, деструкция полимерного электроизоляционного материала, радикально-цепной механизм разрушения, частичные разряды, диагностика, остаточный ресурс.*

**N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago**

**ASSESSMENT OF DESTRUCTION OF POLYMER ELECTRICAL  
INSULATING MATERIAL DUE TO PARTIAL DISCHARGES  
AND RADICALCHAIN FRACTURE MECHANISMS**

*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. When exposed to CR, the number of transvinylene-type double bonds reaches saturation with an increase in the dose of absorbed energy. The PD diagnostic system using a complex of characteristics of PD inclusions ( $S_B$ ,  $q_{CR}$ ,  $h_B$ ) by the amount of heat generated ( $Q$ ) and ignition voltage ( $U_V$ ) obtained by the developed software is effective both for assessing the current state of insulation and for predicting its residual resource. The detected CR sources indicate the presence of inclusions in the cable insulation. Within the framework of the conducted research, a neural network (NS) model describing the architecture of a cyber-physical system power cable lines (PCL) for predicting the resource of EM cable electrical networks was built. The algorithm of the adaptive system operation, selection of parameters and training of the NS with subsequent prediction of the PCL resource is synthesized, which makes*

*it possible to increase the reliability of the PCL by reducing the time to create the optimal configuration of the NS. The obtained NS model can be effectively used for the analysis of thermal fluctuation processes occurring in the control object – PCL, and the prediction of the behavior of the object. The method of diagnosis of IM CL in operating conditions is given. The analysis of the obtained results showed that the measurement of the parameters of the PD allows us to assess the impact of various factors on the electrical insulation of the CL and determine the degree of its degradation. PD is a measure of the degree of electrical aging.*

*Reliability of cable systems; destruction of polymer insulating material; radical chain mechanism of destruction; partial discharges; diagnostics; residual resource.*

**Введение.** Силовые кабельные линии (далее кабельные линии (КЛ)) являются одним из основных элементов электрических сетей систем электроснабжения и во многом определяют их перспективное развитие [1, 2]. 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) [3, 4].

Частичные разряды в изоляции являются следствием наличия неоднородностей в структуре диэлектрика и характеристик воздействующего на неё напряжения [5]. Практика показывает, что на переменном напряжении происходит наиболее опасное развитие ЧР, приводящее к интенсивному износу изоляции в области включения с последующим пробоем всей изоляции. Это связано с тем, что ЧР вызывают повышение локальной температуры в зоне ЧР за счет выделения здесь энергии. ЧР представляют большую опасность для изоляции из-за быстрого ее разрушения в локальных зонах и последующего пробоя изоляционных промежутков. Основная опасность ЧР связана с риском их быстрого перехода до состояния пробоя и, как следствие, создание аварийной ситуации в кабельной линии. Поэтому 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. Разработка методики определения параметров включений в ИМ методом ЧР является одной из задач данной работы

ЧР являются мерой степени электрического старения. Таким образом это может являться диагностическим параметром качества изоляции СКЛ. Принято считать, что ЧР являются главной причиной старения изоляции [6], особенно выполненной из органических материалов. До недавнего времени о характере ЧР можно было судить только по результатам косвенных экспериментов [10]. При расчете полимерной высоковольтной изоляции возникает ряд вопросов. ЧР снижают надежность и срок службы изоляции КЛ, поэтому для ее расчета неприменимы традиционные методы, основанные на использовании данных о кратковременной электрической прочности диэлектриков [12]. При выборе диэлектриков для высоковольтной полимерной изоляции необходимы сведения об их сравнительной устойчивости к ЧР, оценка деструкции полимерного электроизоляционного материала СКЛ, вызванной ЧР и радикально-цепным механизмом разрушения полимерных материалов. Необходимы исследования ЧР и их разрушающего действия, закономерностей разрушения диэлектрических материалов при воздействии ЧР, возможностей прогнозирования срока службы изоляционного материала КЛ, способов повышения срока службы полимерной изоляции в условиях воздействия ЧР.

Таким образом целью работы является разработка методики диагностирования остаточного ресурса электроизоляции КЛ, основанная на контроле параметров и технического состояния. Предметом исследования являются изоляционные материалы кабельных электрических сетей, определяющих режимные параметры и пропускную способность систем передачи и распределения электроэнергии.

**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. К дефектам монтажа муфт относятся повреждение или загрязнение изоляции кабеля при монтаже; неполная заливка муфты мастикой; плохая опрессовка соединительных гильз и т.п.

Наличие включений в линии не препятствует работе, но имеет тенденцию к ухудшению ее технического состояния. Завершающей стадией развития включения является процесс выхода линии из строя, т.е. пробой. Время развития включения до пробоя изоляции может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет.

Поэтому задача диагностики технического состояния изоляционного материала КЛ состоит в определении степени развития включения, ее опасности и остаточном ресурсе.

**Характеристики и методы регистрации ЧР.** В КЛ напряжением до 35 кВ к преобладающим причинам понижения электрической прочности ИМ являются повышенная температура [1] и ЧР [2] (микроразряды возникающих в местах неоднородности в ИМ). Исследованиями в области диагностики изоляции и, в частности, исследованием ЧР занимались: Кучинский Г.С. [7], Сухогузов А.П., Архангельский К.С., Вдовико В.П. [8], Федосов Е.М. [9], Овсянников А.Г., Быкодоров В.Ф., Платонов В.В., Усачев А.Е., Исмагилова Ф.Р., Таджибаев А.И., Канискин В.А., Максудова Д.В. [10], Whitehead S., Ван Брант Р. [11].

Характеристики ЧР зависят от приложенного напряжения, температуры кабеля, местоположения, размера включений в ИМ, а также изменяются с течением времени. Повреждения, связанные с ЧР, зависят от различных факторов и могут изменяться в диапазоне от «незначительны» до «опасных», влекущих к отказам в ближайшие сроки и до нескольких лет [1–3].

Эффективность методов регистрации ЧР при диагностике ЭИ кабельных линий в условиях их эксплуатации определяется их высокой чувствительностью к изменениям в структуре изоляционного материала СКЛ и позволяет:

- ◆ выявить места и участки с явно выраженными включениями в изоляционном материале СКЛ еще на ранних стадиях развития ЧР;
- ◆ значительно повысить достоверность диагностики изоляции кабелей [3];
- ◆ произвести оценку характеристик и процесса развития ЧР во включениях [2];
- ◆ определить не только интегральные свойства характеристик ЧР, множества разрядов, но и свойства единичных разрядов [2];
- ◆ своевременно отобразить явления ЧР в ИМ [1, 3];
- ◆ получить информацию об изменениях электрических свойств каждого участка изоляции КЛ, не доведенные еще до пробоя или ошибках монтажа. Внешним проявлением процессов развития ЧР является нагрев изоляции [12–14]. Актуальным является вопрос анализа динамики изменения характеристик ЧР во времени, позволяющий оценить состояние и остаточный ресурс изоляции [10].

Таким образом, к недостаткам существующих методов измерения характеристик ЧР можно отнести невозможность:

- ◆ определить размер включения [1];
- ◆ учесть термофлуктуационные процессы, вызываемые ЧР [1].

Возникновение каждого единичного ЧР приводит к выделению в ИМ энергии  $W_{\text{чр}}$ , которая частично затрачивается на разогрев испытуемого объекта и на разрушение ИМ [2, 5].

Под действием частичных разрядов (ЧР) могут происходить следующие процессы:

- 1) образование газообразных продуктов ионизации - озона, окислов углерода, окислов азота, паров воды и др.;
- 2) химическое разрушение диэлектрика под действием продуктов ионизации, сопровождаемое разрывом химических связей, образованием свободных радикалов, появлением поперечных связей (сшиванием) между макромолекулами, образованием новых групп (карбокисильные, эфирные) в составе макромолекул полимера, а также углерода и др. Эти изменения прослеживаются с помощью ИК-спектроскопии;
- 3) непосредственное воздействие на диэлектрик бомбардировки ионами и электронами, действие излучения, образуемыми при ЧР;
- 4) повышение локальной напряженности электрического поля и температуры, возникающие в зоне ЧР;
- 5) эрозия диэлектрика, ведущая к уменьшению его веса и толщины. Указанные факторы вызывают изменение свойств диэлектрика, определяют механизм его старения и приводят к снижению напряжения начала ионизации. Роль тех или иных факторов может быть различной в каждом конкретном случае в зависимости от вида диэлектрика и условий испытаний.

Разрушающее действие ЧР на диэлектрические материалы обуславливается следующими факторами [2, 6]:

- ◆ 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);
- ◆ воздействием потенциалов (сотни вольт), возникающих в результате внедрения в полимерные материалы зарядов при действии ЧР на тончайшие слои материала у поверхности включения;
- ◆ тепловым воздействием;

Столь большой разницей в оценке разрушающего действия ЧР связан с тем, что обычно основываются на изменениях, которые наблюдаются в диэлектриках в результате такого воздействия, практически игнорируя при этом сам воздействующий фактор.

Одними из основных факторов, воздействующих на ИМ в процессе ее эксплуатации, являются тепловые [1], под влиянием которых происходит деструкция изоляции – необратимое ухудшение ее электроизоляционных свойств.

**Диагностика СКЛ по частичным разрядам.** Эффективным, неразрушающим методом диагностирования электротехнического оборудования под рабочим напряжением является метод диагностики по частичным разрядам (ЧР), позволяющий выявлять быстроразвивающиеся локальные дефекты [5]. Метод основан на локализации ЧР в проблемных местах кабельной линии по фазам СКЛ. Таким образом, на основании полученных формул составлена математическая модель развития ЧР [1] и формирования теплового пробоя:

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

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

Сущность реализации метода основана на подаче высокого напряжения в СКЛ и инициировании в ней на несколько долей секунд переменного затухающего напряжения (ДАС), под действием которого на участках с включениями СКЛ возгораются ЧР. По известной или измеренной длине СКЛ и, руководствуясь определённой скоростью распространения электромагнитного импульса, методом рефлектометрии определяется локальное место сосредоточения ЧР. Приборы CDS предназначены для оценки степени старения и остаточного ресурса эксплуатации линий методом возвратного напряжения и тока релаксации. Диагностики методом измерения характеристик ЧР является карта распределения ЧР, на которой определяется наличие или отсутствие скрытых включений по всей длине кабельной системы. Иначе говоря, метод измерения характеристик ЧР позволяет ранжировать линии по критериям состояния: «хорошая», «плохая» или «критичная». На основании измерений и проведенных исследований разработана «Методика оценки технического состояния СКЛ по результатам диагностического обследования шадящими и неразрушающими методами» [1] с определёнными критериями оценки. Падение напряжения на воздушном включении толщиной  $h_{\text{в}} \ll h$  (толщина изоляции) составляет [8]:

$$U_{\text{в}} = U_m \frac{\varepsilon h_{\text{в}}}{h + (\varepsilon - 1) h_{\text{в}}}. \quad (2)$$

Если падение напряжения на включении достигнет пробивного напряжения воздуха  $U_{\text{в.пр.}} (h_{\text{в}})$  в соответствии с эмпирическим законом Пашена, то воздушное включение пробьется. Между кажущимся зарядом ЧР во включении и его разрядной площадью получена функциональная связь, выраженная через размеры включения:

$$q_{\text{чр}} = U_{\text{в.пр.}} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}. \quad (3)$$

В практике наиболее часто встречаются включения размером 0,05–1 мм. Результаты экспериментов [10] свидетельствуют о лавинном характере развития ЧР. На основании (3) амплитуда кажущегося заряда  $q_{\text{чр}}$  дает возможность определить разрядную площадь ЧР, а напряжение зажигания  $U_{\text{в}}$  (2) – толщину включений. Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными.

Газовые включения в твердой изоляции могут иметь разнообразную форму: цилиндрических пор, эллипсоидов, щелей и т.д. Если принять, что включение в форме эллипса, то выражение (3) можно записать в виде

$$q_{\text{ЧР}} = \frac{2U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2}{h - 2b}, \quad (4)$$

где  $a, b$  – геометрические параметры эллипса.

Тогда для нахождения размера включения решается квадратное уравнение

$$2U_{\text{в.пр.}} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2 + 2bq_{\text{ЧР}} - q_{\text{ЧР}}h = 0. \quad (5)$$

С помощью данных критериев оценки состояния СКЛ (напряжения возникновения ЧР, уровня ЧР, коэффициента старения; коэффициента нелинейности) стало возможным быстро и детально определять и достаточно точно прогнозировать, в период какого времени в скрытых включениях произойдет пробой. Таким образом, все геометрические параметры включений становятся известными.

Частичные разряды вызывают разрушения полимерных диэлектриков. Разрушение вызвано рядом факторов, к которым, в частности, относятся тепловое воздействие и воздействие химически активных продуктов, образующихся в воздухе (газах) во включении при наличии ЧР. Исследованию относительной устойчивости к ЧР различных диэлектрических материалов в последние годы уделяется серьезное внимание [6]. Особенности разрушающие действия ЧР заключаются в разогреве изоляционного диэлектрика СКЛ вследствие бомбардировки электронами и ионами, а также вследствие контакта газа с нагретым примерно до 1000 К разрядным каналом. Глубина прогрева (радиус объема прогретого диэлектрического материала)  $r = 2\sqrt{Dt}$ , где  $D = \kappa/\rho c$  – коэффициент температурой проводности;  $\kappa$  – теплопроводность;  $c$  – удельная теплоемкость. Для полиэтилена с параметрами  $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$ ,  $\kappa = 3,35 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $c = 2,3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ . Такой разогрев может привести к терморазложению полимера. Температура разогрева за время  $t=0,1 \text{ нс}$  составляет  $1-2^\circ\text{C}$  в объеме радиусом  $(60-80) \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Давление в канале разряда составляет  $100 \dots 1000 \text{ кПа}$ , что приводит к возникновению ударной волны, и может способствовать эрозии в результате воздействия ЧР [10]. В процессе разряда образуются также активные продукты, которые вызывают химическую деструкцию полимера. Рассмотрим некоторые механизмы структурных изменений.

**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:

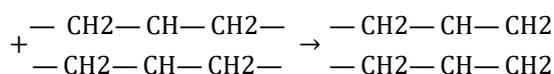


где буквы ч.р. обозначают воздействие ЧР.

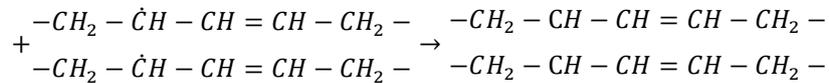
Атом водорода отрывает другой атом у соседней цепи, оставляя новый свободный радикал в положении, благоприятном для реакции с первым свободным радикалом, и образуя молекулярный водород:



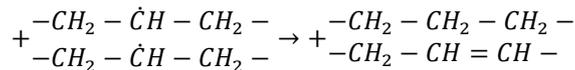
Скорость выделения водорода характеризует разложение диэлектрического материала при воздействии ЧР. Появившиеся свободные радикалы взаимодействуют и образуют связи между цепями:



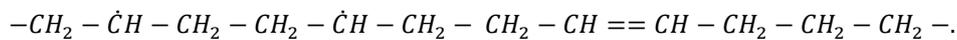
При образовании радикалов типа  $-\text{CH}_2-\dot{\text{C}}\text{H}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-$  сшивание можно представить по схеме [8]



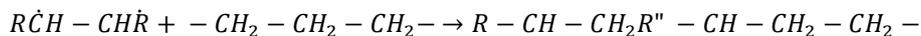
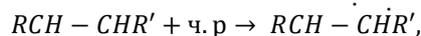
Образование двойных связей трансвинилового типа в полиэтилена (ПЭ) при действии ЧР объясняется как результат взаимодействия двух радикальных центров в соседних полимерных цепях, что сопровождается переносом атома водорода [8]



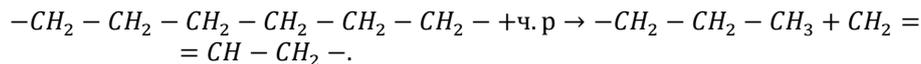
и миграции свободной валентности вдоль цепи до встречи с другой свободной валентностью [16]:



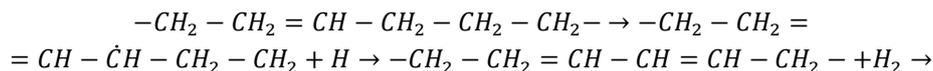
При воздействии ЧР количество двойных связей трансвинилового типа с увеличением дозы поглощенной энергии достигает насыщения. При определенной концентрации этих связей начинается их распад. Это явление, возникающее в результате активации двойных связей при передаче энергии электронного возбуждения от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



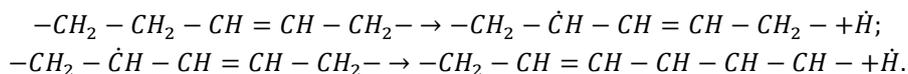
Одновременно с процессом сшивания протекает и процесс деструкции, который сводится к разрыву химической связи в главной цепи ПЭ, в частности, под действием ионизирующего излучения. Разрыв связей между атомами углерода в главной цепи ПЭ с образованием двух осколков цепи [17]



При воздействии ЧР на ПЭ в воздухе происходит также изменение соотношения групп  $\text{CH}_3/\text{CH}_2$ , что является результатом разрыва цепи. При дальнейшей бомбардировке электронами и ионами ЧР последующим этапом является образование сопряженных двойных связей в результате отрыва одного атома водорода от соседней с уже образовавшейся двойной связью метиленовой группы или двух атомов водорода от двух соседних метиленовых групп с образованием аллильного радикала или двух сопряженных двойных связей [17]. Образование второй сопряженной связи возможно также после появления аллильного радикала [17]:



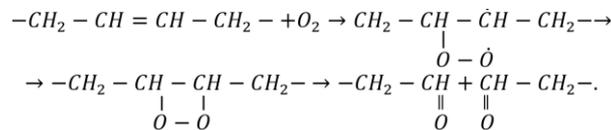
или



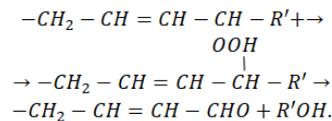
Примерно половина всего выделяющегося водорода образуется при возникновении углерод-углеродных двойных связей [17]. Кроме того, увеличение интенсивности поглощения полосы  $1640\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о разрыве цепей ПЭ [18], а при разрыве главной цепи должны образовываться сопряженные двойные связи винильного типа [18, 19]. Наличие насыщения в изменении интенсивности поглощения полосы  $1640\text{ см}^{-1}$  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.

Возрастание ненасыщенности главной цепи полиэтилена при воздействии ЧР в воздухе способствует дальнейшему повышению скорости его окисления [20, 21]. При облучении ПЭ в кислородсодержащей среде свободные радикалы, возникающие в полимере, реагируют с кислородом, образуя различные продукты окисления. При этом окисление в процессе облучения является в основном поверхностным эффектом [16].

Окисление ПЭ по месту двойной связи, вызванное ЧР, с образованием карбонильных групп и разрывом цепи, протекает по схеме [17]

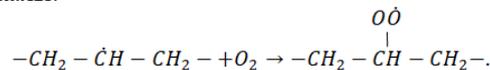


Окисление полимеров рассматривается так же, как процесс, протекающий с разрывом цепи у метиленовых групп (в основном) в альфа-положении к двойным связям [20]. Метиленовая группа, соседняя с двойной связью, более чувствительна к окислению, и этот процесс происходит следующим образом [20]:

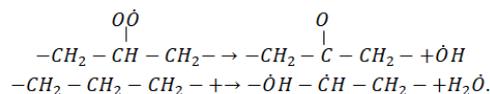


Однако не наблюдается увеличения интегральной интенсивности поглощения в области  $3350\text{--}3450\text{ см}^{-1}$  (группы OH) при воздействии на ПЭ ЧР в среде воздуха в течение 40-45 ч. Таким образом, при гамма-облучении полиэтилена на воздухе происходит образование структур, содержащих группы OH,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

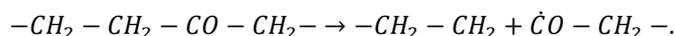
При дальнейшем росте времени воздействия ЧР интенсивность увеличивается, достигая насыщения, так как одновременно с образованием в поверхностном слое ПЭ структур, содержащих группы OH, происходит их разрушение бомбардирующими электронами и ионами ЧР. Принимая во внимание, что окисление полимеров происходит по радикально-цепному механизму, рассмотрим механизм окислительной деструкции ПЭ при воздействии ЧР в окислительной среде. Свободные радикалы, образовавшиеся при этом, вступают в реакцию с кислородом, образуя пероксирадикалы:



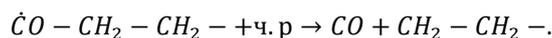
Последующие реакции с участием свободных радикалов, обуславливающие образование карбонильных групп, разрыв основных цепей полиэтилена, выделение  $\text{H}_2\text{O}$ , CO и  $\text{CO}_2$ , которые могут проходить двумя различными путями, представим одну из них схемой [17]



После этого реакция продолжается. Наличие карбонильных групп в главной цепи полиэтилена обуславливает ослабление межуглеродных связей и последующее дробление цепи [13, 15]:



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



Этим процессом, наряду с механическим разрушением окисленных структур на поверхности ПЭ бомбардирующими электронами и ионами ЧР, обуславливается наличие насыщения в зависимости интенсивности поглощения полосы  $1720 \text{ см}^{-1}$  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  $A_{\text{и}}$ . При исследованиях по этому методу интенсивность ЧР, т. е. плотность среднего тока  $j$ , в твердом диэлектрическом слое  $E_{\text{д}}$  изменялись в широких пределах [15].

На рис. 1,а приведены зависимости интенсивности ИК спектра полосы поглощения ПЭ ( $A_{\text{и}}$ ) от плотности тока в диэлектрике ( $j$ ). На рис. 1,б приведены зависимости интенсивности  $A_{\text{и}}$  от времени воздействия  $\tau_{\text{в}}$  ( $\tau_{\text{в}} > 40 \text{ ч.}$ ) при  $j = 0,2 \text{ мкА/мм}^2$  (штриховые линии) и  $2,5 \text{ мкА/мм}^2$  (сплошные линии) полос поглощения инфракрасных спектров ПЭ  $1720$  (1);  $890$  (2);  $721-731$  (5, 7);  $1460-1470$  (4, 6);  $1305 \text{ см}^{-1}$  (5,5). На рис. 1,в приведены зависимости интенсивности  $A_{\text{и}}$  от времени  $\tau_{\text{в}}$  от времени поглощения  $1720 \text{ см}^{-1}$  инфракрасного спектра ПЭ (3), ПЭ + 1% БК СО, ПЭ + 1% ФБНА – фенил-бета-нафтиламин (2), ПЭ + 1% ФБНА, облученного дозой  $0,05 \text{ МДж/кг}$  (4), ПЭ и ПЭ + 1% ФБНА, облученных дозой  $0,5 \text{ МДж/кг}$  (5).

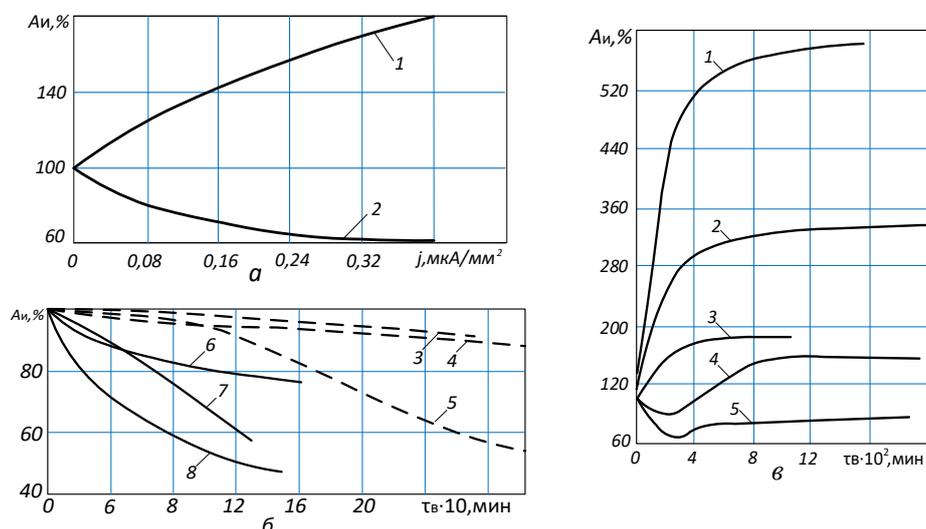


Рис. 1. Зависимости интенсивности ЧР  $A_{\text{и}}$  от: а – плотности тока  $j$ ; б – от времени воздействия  $\tau_{\text{в}}$ ; в – от времени  $\tau_{\text{в}}$  полосы поглощения

Образовавшиеся радикалы вступают в реакцию с кислородом, и цепная реакция разрушения полиэтилена под действием ЧР продолжается. В результате окисления CO в плазме разряда образуется CO<sub>2</sub>.

Таким образом, радикально-цепной механизм разрушения полимерных диэлектрических материалов 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.

**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  $h_{в}$ .

Исследование КЛ от трансформаторной подстанции (ТП)–173 до ТП–174. Проводилось обследование аппаратурой OWTS (Oszillating Wave Teilentladungs System) по всем фазам 3-х жильной кабельной линии АСБ 3×70, протяженностью 270 метров, установленной в 1990 году от ТП–173 до ТП–174. На рис. 2 представлена карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции исследуемой КЛ.

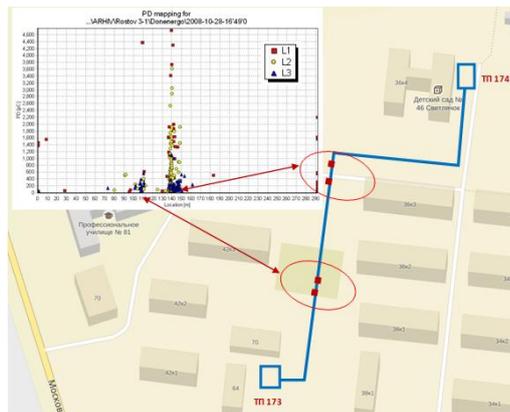


Рис. 2. Карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции КЛ

На рис. 3 представлены результаты измеренных уровней интенсивности ЧР (OWTS M28), PDVI = 4 кВ,  $q = 4730$  пКл., а также распределение ЧР в изоляции вдоль КЛ.

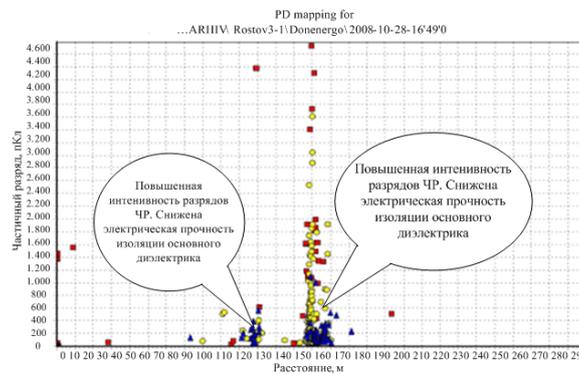


Рис. 3. Распределение и интенсивности ЧР в изоляции КЛ

Результаты проведенного обследования кабельной линии аппаратурой OWTS 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;

Это может быть связано со снижением электрической прочности основного диэлектрика кабеля.

Когда место обнаружения ЧР совпадает с расположением муфт, причиной появления такого включения может быть вызвано нарушением технологии монтажа этих муфт. Рекомендуется ремонт в вышеуказанных отметках в течение 1 года с последующей диагностикой.

По результатам обследования аппаратурой CDS состояние изоляции кабеля оценивается как неудовлетворительное. Степень увлажнённости изоляции кабеля высокая (кабель «влажный»). Степень старения изоляции кабеля высокая (кабель «сильно состаренный»). Рекомендуется при техническом обслуживании ежегодные испытания повышенным напряжением.

По результатам обследования КЛ ее техническое состояние оценивается как неудовлетворительное.

Рассмотрим другой пример. Обследование 3-х жильной кабельной линии ААБ 3×120, 524,8 метра, установленной в 1983 г. от ТП–36 до ТП–6 рис. 4.

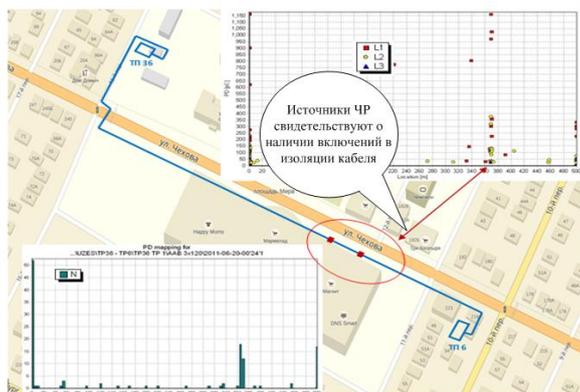


Рис. 4. Карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции КЛ

Проведены измерение уровня ЧР системой OWTS M28, напряжение возникновения ЧР (PDVI) = 6кВ, кажущийся заряд ЧР (q) = 1162 пКл, а также измерение тока релаксации или измерение возвратного напряжения (CDS), P = 0,214, Q = 1,733. Карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции вдоль СКЛ представлена на рис. 5.

Результаты обследования кабельной линии позволяют оценить ее техническое состояние. Для исследованной СКЛ оно оценивается как неудовлетворительное, так как:

- ◆ напряжение возникновения ЧР ниже уровня фазного напряжения, следовательно, при эксплуатации кабеля, имеющиеся в нем включения развиваются;
- ◆ при обследовании аппаратурой OWTS на отметке 370 м (рис. 5) по всем фазам от ТП–36 и концевых заделках с обеих сторон зафиксирована повышенная интенсивность ЧР;
- ◆ обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции кабеля.

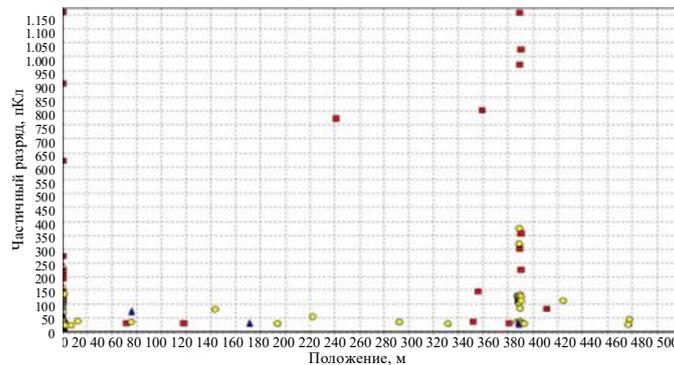


Рис. 5. Распределение интенсивностей ЧР вдоль КЛ

Это может быть связано со снижением электрической прочности основного диэлектрика кабеля, если место обнаружения ЧР совпадает с расположением муфт, причиной появления такого включения может быть вызвано нарушением технологии монтажа этих муфт. Рекомендуется ремонт в вышеуказанных отметках в течение 1 года с последующей диагностикой.

По результатам обследования аппаратурой CDS состояние изоляции кабеля оценивается как удовлетворительное. Степень старения изоляции кабеля средняя (кабель «состаренный») [1].

**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. Методика увеличивает характеризуемость ЧР, что позволяет в комплексе оценивать воздействие на ИМ основных разрушающих факторов и определять степень её деградации. Методика диагностики изоляции КЛ по ЧР использует комплекс характеристик включений ЧР ( $S_B$ ,  $q_{ЧР}$ ,  $h_B$ ) количеством выделяемого тепла ( $Q$ ) и напряжением зажигания ( $U_B$ ), получаемых разработанным программным обеспечением, является эффективной как для оценки текущего состояния изоляции, так и для прогнозирования ее остаточного ресурса. Значение кажущегося заряда  $q_{ЧР}$  зависит от размеров включений и приложенного напряжения. Увеличение размера включения (а именно увеличение пробивного промежутка  $h_B$ ) обусловлено увеличением начального напряжения ионизации, следовательно, импульс тока и напряжения будет иметь большую амплитуду, а мощность ЧР возрастет. Увеличение мощности разряда приведет к интенсивному росту включения по направлению к электродам, что впоследствии приведет к полному пробоя изоляции. 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 ( $P$ ) 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. Результаты исследований позволяют определять степень её деградации и сформулировать ряд рекомендаций по повышению надежности и срока службы полимерной изоляции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения: монография. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – 192 с.
2. *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Ленинград: Энергия, Ленинград, отд., 1979. – 224 с.
3. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
4. *Шабловский Я.О.* Предупреждение пожароопасных отказов силовых кабелей // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: Матер. международной конференции молодых учёных. – Минск, 2013. – С. 169-172.
5. *Исмагилов Ф.Р.* Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика // Вестник УГАТУ. – 2011. – С. 98-100.
6. *Ван Брант Р.* Физика и химия частичных разрядов и короны: последние достижения и будущие последствия // Уайтхедовские чтения. – 1994.
7. *Золотарев В.М.* Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных сшитых изоляционных конструкций // Вестник: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 49. – С. 64-73.
8. *Копырюлин П.В.* Совершенствование эксплуатационных свойств кабельных линий с полимерной изоляцией: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Сам. гос. техн. ун-т. – Самара, 2013. – 132 с.
9. *Копырюлин П.В.* Зависимости тангенса дельта бумажно-масляной изоляции, используемого при измерении под рабочим напряжением // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 96-99.
10. *Ильченко Н.С., Кириленко В.М.* Полимерные диэлектрики. – К.: Техника, 1977. – 160 с.
11. *Финкель З.Э., Леценко С.С., Брагинский Р.П.* Радиационная химия и кабельная техника. М.: Атомиздат, 1968. – 312 с.
12. *Багиров М.А., Малин В.П., Абасов С.А.* Воздействие электрических разрядов на полимерные диэлектрики. – Баку, «Элм», 1975. – 168 с.
13. *Мадорский С.* Термическое разложение органических полимеров. – М.: Мир, 1967. – 328 с.
14. *Artbauer J., Griac J.* Der Durschlag von Kunststoffen unter Einwirkung von Glimmentlandugen // Elektrische. – 1964. – Н. 4. – S. 120-124.
15. *Гордон Г.Я.* Стабилизация синтетических полимеров. – М.: Госхимиздат, 1963. – 300 с.
16. *Финкель З.Э., Леценко С.С., Брагинский Р.П.* Радиационная химия и кабельная техника. – М.: Атомиздат, 1968. – 312 с.
17. *Макаров Е.Ф.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. – М.: Папирус ПРО, 2004. – Т. 3. – 674 с.
18. *Khaitan et al.* Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey // IEEE Systems Journal. – 2014.
19. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Прогнозирование ресурса кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 3 (205). – С. 51-62.
20. *Полуянович Н.К., Азаров Н.В., Дубяго М.Н.* Нейрокомпьютерное управление пропускной способностью кабельных сетей посредством учета и контроля их параметров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 84-100.
21. *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, No. 3. – P. 619-626.
22. *Anders G.J.* Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – P. 3-11.
23. *Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M.* Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence // Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEM W 2021. – 2021. – P. 455-459.
24. *Dubyago M., Poluyanovich N.* Partial Discharge Signal Selection Method for In-terference Diagnostics of Insulating Materials // Conference Proceedings - 2019 Ra-diation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEM W. – 2019. – 8792693. – P. 124-127.

## REFERENCES

1. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Sovershenstvovanie metodov diagnostiki i prognozirovaniya elektroizolyatsionnykh materialov sistem energosnabzheniya: monografiya [Improvement of methods of diagnostics and forecasting of electrical insulation materials of power supply systems. Monograph]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, 192 p.
2. *Kuchinskiy G.S.* Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktivnykh [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad: Energiya, Leningrad, otd., 1979, 224 p.
3. *Vdoviko V.P.* Chastichnye razryady v diagnostirovani vysokovol'tnogo oborudovaniya [Partial discharges in the diagnosis of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007, 155 p.
4. *Shablovskiy Ya.O.* Preduprezhdenie pozharoопасnykh otkazov silovykh kabeley [Prevention of fire-hazardous failures of power cables], *Preduprezhdenie i likvidatsiya chrezvychaynykh situatsiy: Mater. mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Prevention and response to emergency situations: Proceedings of the international conference of young scientists]. Minsk, 2013, pp. 169-172.
5. *Ismagilov F.R.* Matematicheskoe modelirovanie razvitiya chastichnykh razryadov v protsesse stareniya dielektrika [Mathematical modeling of the development of partial discharges in the aging process of the dielectric], *Vestnik UGATU* [Bulletin of UGATU], 2011, pp. 98-100.
6. *Van Brant R.* Fizika i khimiya chastichnykh razryadov i korony: poslednie dostizheniya i budushchie posledstviya [Physics and chemistry of partial discharges and corona: recent achievements and Future consequences], *Uaytkhedovskie chteniya* [Whitehead Readings], 1994.
7. *Zolotarev V.M.* Tangens ugla dielektricheskikh poter' mnogosloynnykh sshitykh izolyatsionnykh konstruktivnykh [The tangent of the dielectric loss angle of multilayer cross-linked insulating structures], *Vestnik: NTU «KHPi»* [Bulletin: NTU "KhPI"], 2011, No. 49, pp. 64-73.
8. *Kopyryulin P.V.* Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv kabel'nykh liniy s polimernoy izolyatsiyey: diss. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of operational properties of cable lines with polymer insulation: cand. of eng. sc. diss]: 05.09.03. Sam. gos. tekhn. un-t. Samara, 2013, 132 p.
9. *Kopyryulin P.V.* Zavisimosti tangensa del'ta bumazhno-maslyannoy izolyatsii, ispol'zuyushchegosya pri izmerenii pod rabochim napryazheniem [Dependences of the delta tangent of paper-oil insulation used for measuring under operating voltage], *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Izvestiya Vuzov. Electromechanics], 2011, No. 3, pp. 96-99.
10. *Il'chenko N.S., Kirilenko V.M.* Polimernye dielektriki [Polymer dielectrics]. Kiev: Tekhnika, 1977, 160 p.
11. *Finkel' 3.E., Leshchenko S.S., Braginskiy R.P.* Radiatsionnaya khimiya i kabel'naya tekhnika. M.: Atomizdat, 1968. – 312 s.
12. *Bagirov M.A., Malin V.P., Abasov S.A.* Vozdeystvie elektricheskikh razryadov na polimernye dielektriki [The effect of electrical discharges on polymer dielectrics]. Baku: Elm, 1975, 168 p.
13. *Madorskiy S.* Termicheskoe razlozhenie organicheskikh polimerov [Thermal decomposition of organic polymers]. Moscow: Mir, 1967, 328 p.
14. *Artbauer J., Griac J.* Der Durschlag von Kunststoffen unter Einwirkung von Glimmentlandugen, *Elektrie*, 1964, H. 4, pp. 120-124.
15. *Gordon G.Ya.* Stabilizatsiya sinteticheskikh polimerov [Stabilization of synthetic polymers]. Moscow: Goskhimizdat, 1963, 300 p.
16. *Finkel' 3.E., Leshchenko S.S., Braginskiy R.P.* Radiatsionnaya khimiya i kabel'naya tekhnika [Radiation chemistry and cable technology]. Moscow: Atomizdat, 1968, 312 p.
17. *Makarov E.F.* Spravochnik po elektricheskim setyam 0,4–35 kV i 110–1150 kV [Electric voltage regulator 0.4–35 kV and 110-1150 kV]. Moscow: Papyrus PRO, 2004, Vol. 3, 674 p.
18. *Khaitan et al.* Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey, *IEEE Systems Journal*, 2014.
19. *Poluyanovich N.K., Dubyago M.N.* Prognozirovanie resursa kabel'nykh liniy s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the resource of cable lines using the method of artificial neural networks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 3 (205), pp. 51-62.
20. *Poluyanovich N.K., Azarov N.V., Dubyago M.N.* Neyrokomp'yuternoe upravlenie propusknoy sposobnost'yu kabel'nykh setey posredstvom ucheta i kontrolya ikh parametrov // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 3 (227), pp. 84-100.

21. 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, No. 3, pp. 619-626.
22. Anders G.J. Rating of Cables on Riser Poles, in Trays, in Tunnels and Shafts - a Review, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, Vol. 11, No. 1, pp. 3-11.
23. Poluyanovich N., Azarov N., Dubyago M. Neural network method for monitoring thermofluctuation processes in cable lines taking into account the interference influence, *Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021*, 2021, pp. 455-459.
24. Dubyago, M., Poluyanovich, N. Partial Discharge Signal Selection Method for In-terference Diagnostics of Insulating Materials, *Conference Proceedings - 2019 Ra-diation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW*, 2019, 8792693, pp. 124-127.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

**Полуянович Николай Константинович** – Южный федеральный университет; e-mail: niki1-58@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

**Дубяго Марина Николаевна** – e-mail: w\_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; ст. преподаватель.

**Poluyanovich Nikolay Konstantinovich.** – Southern Federal University; e-mail: niki1-58@mail.ru;; Taganrog, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – e-mail: w\_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics, senior lecturer.

УДК 621.371: 538.574

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-258-267

**А.И. Семенихин, А.В. Климов, А.Н. Савицкий**

### **АНИЗОТРОПНАЯ ИМПЕДАНСНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ МЕТАПОВЕРХНОСТЬ ДЛЯ САМОАДАПТИВНОГО ГАШЕНИЯ РАССЕЯННЫХ ВОЛН ЛЮБЫХ ПОЛЯРИЗАЦИЙ**

Статья посвящена актуальной проблеме – снижению эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов цилиндрической формы с помощью анизотропных метаповерхностей (МП). Целью работы является исследование анизотропных импедансных МП для самоадаптивного (к частоте облучения) гашения ЭПР цилиндрических металлических поверхностей при облучении волнами любой поляризации. Для достижения поставленной цели проанализированы известные принципы работы, конструкции и возможности МП для снижения эффективной площади рассеяния как плоских, так и цилиндрических металлических поверхностей, включая поверхности электрически малого радиуса. Рассмотрены 2D-задачи рассеяния плоской электромагнитной волны ТЕ и ТМ поляризации на модели цилиндрической метаповерхности (ЦМП) в форме кругового цилиндра с анизотропными гомогенизированными импедансными граничными условиями общего вида. Методом собственных функций получены аналитические выражения для матриц рассеяния цилиндрической метаповерхности в базисах линейных (LP) и круговых (CP) поляризации. Матрицы рассеяния позволяют решать различные задачи синтеза тензора импеданса ЦМП по заданным характеристикам рассеяния в LP- и CP-базисах. В частности, синтезирован диагональный тензор импеданса ЦМП, обеспечивающий противозазность полей рассеяния волн ТЕ, ТМ поляризации, а также двух согласно поляризованных рассеянных волн круговых поляризации. Решена задача синтеза тензора импеданса ЦМП по заданному нулевому следу диагональной матрицы рассеяния с самоадаптивным (к частоте облучения) гашением волн любых поляризации в низкочастотной области. Показано, что гашение эффективной площади рассеяния ЦМП в обратном направлении составляет от 60 до 10 дБ в сверхшироком диапазоне значений электрического радиуса  $ka$  от 0,02 до 0,4. Рассчитаны характери-