

## **Анализ характеристик и исследование теплового пробоя изоляционных материалов, вызванного частичными разрядами\***

**Н.К. ПОЛУЯНОВИЧ<sup>1</sup>, М.Н. ДУБЯГО<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> 347922, РФ, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: [nik1-58@mail.ru](mailto:nik1-58@mail.ru)

<sup>2</sup> 347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет, ассистент. E-mail: [w\\_m88@mail.ru](mailto:w_m88@mail.ru)

Одним из важнейших факторов, определяющих бесперебойность и надежность систем электроснабжения потребителей, является состояние ее электроизоляционных материалов (ЭИ). Основным элементом систем электроснабжения предприятий и учреждений являются кабельные линии (КЛ). Электротехническое состояние КЛ определяется ее изоляцией, при этом наибольшее распространение получили методы, основанные на испытаниях КЛ повышенным напряжением. Но такие испытания приводят к сокращению ресурса эксплуатации либо к пробое. Также эти методы являются интегральными, не позволяющими оценить действительное техническое состояние линий и определить проблемные места, степень их опасности, остаточный ресурс. В связи с этим задача увеличения срока службы изоляционных материалов посредством диагностики КЛ неразрушающим методом диагностики является актуальной задачей. Для диагностики состояния изоляционных материалов предлагается термофлуктуационный метод, что является новой концепцией технического обслуживания по текущему состоянию КЛ, выстроенной на прогнозировании запаса надежности. В работе решается задача увеличить надежность электроснабжения потребителей на основе исследования режимных параметров работы КЛ, а именно влияния температурного поля и эксплуатационных факторов на изоляционные свойства КЛ. Основной задачей работы является оценка ресурса на основе математической модели старения и выявленных изменений свойств изоляции КЛ. Такой подход может применяться при создании устройств диагностики и прогнозирования состояния КЛ и определения степени ее деградации.

**Ключевые слова:** прогнозирование ресурса, электроизоляционные материалы, термофлуктуационные процессы, тепловой пробой, частичные разряды, диагностический метод, надежность электроснабжения

---

\* Статья получена 17 января 2018 г.

Работа поддержана грантом Южного федерального университета №ВнГр-07/2017-15

## ВВЕДЕНИЕ

В изучение параметров, определяющих устойчивую и безотказную работу КЛ методами технической диагностики, внесли свой вклад многие ученые [2, 6, 9, 11–14]. Эти методы позволяют локализовать проблемные места в изоляционных материалах (ИМ), определить степень их опасности, оценить остаточный ресурс КЛ. Диагностические методы контроля технического состояния объектов систем электроснабжения (электроэнергетики) являются неразрушаемыми технологиями [4, 6, 10] и относятся к числу многофакторных наукоемких технологий прежде всего по причине сложного анализа результатов диагностических исследований [7, 8]. Исследованиями в области диагностики изоляции (в частности, исследованием частичных разрядов (ЧР)) занимались отечественные и зарубежные ученые [9–12]. Внешним проявлением процессов развития ЧР является нагрев изоляции [13, 14]. Актуальным является вопрос анализа динамики изменения характеристик ЧР во времени, позволяющего оценить состояние изоляции и ее остаточного ресурса [12].

Температурный метод регистрации ЧР базируется на регистрации температурного сопротивления внутри изоляции [14, 18], но лишь в зависимости от токов экранов. К недостаткам существующих температурных методов регистрации ЧР можно отнести тот факт, что они рассматривают старение диэлектрика под действием внутренних термомеханических напряжений и внешних механических воздействий [15]. Тепловое старение ИМ изучается уже давно. Разработано множество методов, позволяющих диагностировать процессы в ИМ КЛ. В работе [16] автор проводит моделирование нестационарных тепловых процессов в одножильном силовом кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена. Приведенная математическая модель представлена в виде системы квазилинейных дифференциальных уравнений параболического типа, решение которой осуществлялось с помощью конечно-разностного метода, краевые и начальные условия не учитывались. В [17] приведена двумерная стационарная математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса в закрытом и открытом кабельных лотках. Для составной конструкции КЛ, представленной в виде прямоугольного сечения, моделирование тепловых процессов выполнялось с учетом энергии излучения и конвективного теплообмена. Решение поставленной задачи осуществлялось с применением метода конечных элементов [18].

Оптимальным с точки зрения оценки надежности электрических сетей и систем электроснабжения, получения достоверной и полной информации о состоянии изоляции кабелей и гарнитур является сочетание методов интегральной и локальной диагностики, основанных на термодинамическом подходе исследования развития теплового пробоя. Поэтому в работе рассматривается проблема оценки и прогнозирования остаточного ресурса КЛ электрической сети (ЭС) в условиях воздействия тепловых режимов эксплуатации. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- установить влияние температурного режима работы линии, внешних эксплуатационных факторов и режимов работы на изоляционные свойства КЛ электрических сетей;

- на основе математической модели старения и выявленных изменений свойств изоляции от эксплуатационных факторов предложить методику оценки ресурса КЛ.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ИМ кабельных линий электрических сетей имеются разнообразные неоднородности в виде включений, прослоек между отдельными слоями, микротрещин, отслоения изоляции и др. За счет перераспределения электрического поля из-за различной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и удельной проводимости  $\gamma$ , т. е.  $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$  или  $\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2$ , в местах этих неоднородностей возникает высокая локальная напряженность поля. Развитие разряда в области включения, где имеет место высокая локальная напряженность поля, вызывает неполный пробой изоляции – ЧР.

Успешное решение данной проблемы невозможно без представления о физических процессах и факторах, вызывающих возникновение и развитие ЧР в ИМ, поэтому целью работы является разработка физических принципов определения включений в ИМ методом ЧР.

Тепловой пробой связан с разогревом диэлектрика при протекании тока проводимости и развитием диэлектрических потерь. Развитие теплового пробоя в общих чертах может быть представлено в виде следующей последовательности (рис. 1).

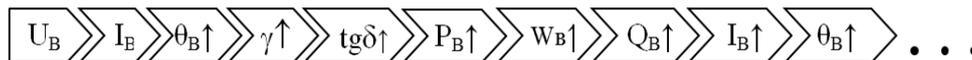


Рис. 1. Развитие теплового пробоя:

$U_{\text{в}}$  – напряжение, возникающее на включении;  $I_{\text{в}}$  – ток, протекающий на включении;  $\theta_{\text{в}}$  – температура во включении;  $\text{tg} \delta$  – тангенс диэлектрических потерь;  $P_{\text{в}}$  – мощность, выделяющаяся при образовании включения;  $W_{\text{в}}$  – энергия, выделяющаяся при образовании включения;  $Q_{\text{в}}$  – теплота, выделяющаяся во включении

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЯВЛЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ

Для выявления закономерностей развития ЧР в газовых включениях определим характеристики ЧР [19], участвующие в разрушении ИМ (рис. 2), где  $C_{\text{в}}$  – емкость газового включения;  $C_{\text{п},1} - C_{\text{п},n}$  – емкость изоляции, расположенной последовательно с газовым включением;  $r_{\text{в}}$  – сопротивление канала в газовом включении;  $C_{\text{из}}$  – емкость остальной части изоляции;  $R_{\text{а}}$  – сопротивление абсорбции;  $R_{\text{пр}}$  – сопротивление проводимости;  $h$  – толщина изоляционного материала;  $h_{\text{п}}$  – толщина изоляции, расположенной последовательно с включением;  $h_{\text{в}}$  – толщина изоляции включения (размер включения);  $\lambda$  – теплопроводность;  $Q_1$  и  $Q_2$  – выделенное и отведенное количество тепла (имеет место при температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ).

Для исследования величины области включения, процесса развития ЧР, а следовательно, механизмов старения и электрического пробоя ИМ необходимо определить параметры ЧР, а именно установить связь между напряжением возникновения  $U_{\text{чр}}$ , его максимальной величиной  $q_{\text{чр}}$  и толщиной включения  $h_{\text{в}}$ .

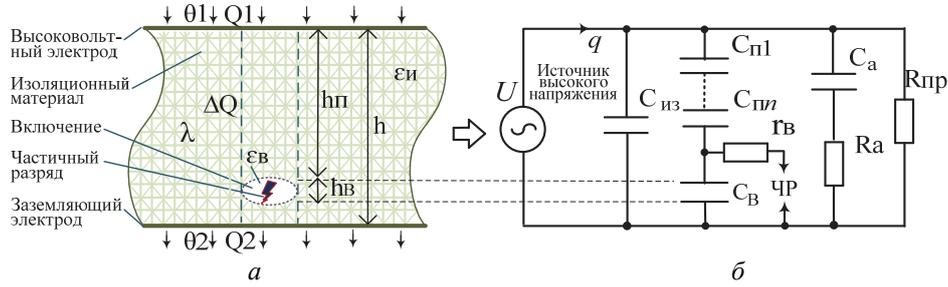


Рис. 2. Схема развития ЧР в изоляции:

*a* – исследуемый ИМ; *б* – эквивалентная электрическая схема замещения в момент возникновения ЧР во включении

Напряженность электрического поля в газовом включении превышает напряженность поля изоляционного материала, так как его диэлектрическая проницаемость значительно выше диэлектрической проницаемости газа ( $\epsilon_{\text{воздуха}} = 1$ ).

Прикладываемое к изоляционному материалу напряжение  $U = U_m \sin \omega t$  на границе газового включения и остального диэлектрика вызывает накопление поверхностного заряда (рис. 2, *a*). Когда напряжение на включении достигнет напряжения начальной ионизации газа, произойдет ЧР емкости включения.

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} \frac{C_{\text{в}} + C_{\text{п}}}{C_{\text{в}}}, \quad C_{\text{п}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}, \quad C_{\text{в}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h_{\text{в}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ЧР}}$  – напряжение появления в изоляции ЧР;  $U_{\text{в.пр}}$  – пробивное напряжение газового включения;  $S_{\text{в}}$  – площадь газового включения. После подстановки  $C_{\text{в}}$ ,  $C_{\text{п}}$  в (1), а также с учетом того, что  $h_{\text{в}} \ll h$ , и неоднородности электрического поля изоляции получим

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} \frac{\epsilon_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{в}}} \frac{h}{\delta K_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{н}} = E_{\text{max}} / E_{\text{ср}}$  – коэффициент неоднородности электрического поля в изоляции, равный отношению максимальной напряженности  $E_{\text{max}}$  к средней напряженности  $E_{\text{ср}}$  в изоляционном промежутке.

Как было показано на рис. 2, изоляционный материал имеет толщину включения  $h_{\text{в}}$ , диэлектрическую толщину  $h$  и диэлектрическую проницаемость изоляционного материала  $\epsilon_{\text{и}} = \epsilon_{\text{п}}$ , где  $h_{\text{в}} \ll h$  при рабочем напряжении  $U_{\text{в}}$ , напряжении на включении

$$U_{\text{в}} = \epsilon_{\text{п}} \frac{h_{\text{в}}}{h} U. \quad (3)$$

Если включение имеет размер  $h_{в1}$  ( $h_{в1} < h_{в2}$ ), то при достижении напряжения питающей сети величины разрядного напряжения  $U_{в.пр}$  произойдет первый разряд, после разряда повторно начнет накапливаться поверхностный заряд и с течением времени  $t_1$  напряжение на включении достигнет напряжения начальной ионизации, вследствие чего произойдет следующий разряд, и т. д. В случае включения с размером  $h_{в2}$  времени для накопления поверхностного заряда потребуется больше ( $t_1 < t_2$ ), следовательно, временной интервал между разрядами будет больше.

С точки зрения опасности нас будет интересовать только высота включения, так как увеличение размера  $h_{в}$  приведет к росту мощности ЧР и последующему пробоему диэлектрика. При напряжении  $U < U_{чр}$  в изоляции не происходит ЧР и электрического старения, при отсутствии других видов старения изоляция может работать неограниченно долго.

Следовательно, чем больше напряжение  $U_{чр}$ , тем выше допустимое для изоляции длительно воздействующее рабочее напряжение. Рост прикладываемого напряжения ведет к линейному росту уровня ЧР, а также к понижению порога их возникновения. При определенном напряжении  $U_{кр}$  – напряжение критических ЧР  $\eta_{чр}$  – интенсивность ЧР резко возрастает (например, вследствие образования дендрита, пузырьков газа), что приводит к резкому разрушению изоляции и снижению срока службы.

### 3. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

При оценке состояния ИМ и степени опасности проблемных мест КЛ применяются следующие параметры ЧР: кажущийся разряд ( $q$ , Кл), мощность ( $P$ , Вт), регулярность возникновения ( $R$ ), частота следования импульсов ( $N$ ), наибольшее неоднократно встречающееся значение кажущегося разряда ( $q_{max}$ , Кл) напряжение возникновения ЧР ( $U_i$ ), напряжение погасания ЧР ( $U_e$ ) и другие. Каждый из единичных ЧР сопровождается прохождением через включение определенного заряда  $q$  и приводит к изменению напряжения на внешних электродах всего образца на  $\Delta U_{в}$ . Соотношение между кажущимся зарядом ЧР и практическим зарядом  $q$  имеет вид

$$q_{чр} = \Delta U_{в} C_{п} = q \frac{C_{п}}{C_{в} + C_{п}}, \quad (4)$$

Значение зависит от размеров включений и приложенного напряжения. Величина зависит от качества изоляции (от  $10^{-16}$  до  $10^{-6}$ ) и связана с физическим механизмом развития разрядов [11]. Изменение напряжения  $\Delta U_{в}$  незначительное, так при  $\Delta U_{в} = 10^{-12}$  Кл и  $C_{в} = 1000$  пФ имеем  $\Delta U_{в} = 10^{-3}$  В [19].

Если включение имеет форму прослойки, вытянутой поперек силовых линий поля, то удобно относить емкости  $C_{п}$  и  $C_{в}$  к единице поверхности

включения. Тогда формула (4) может быть представлена в следующем виде:

$$q_{\text{ЧР}} = q \frac{\frac{\varepsilon_{\text{П}}}{h - h_{\text{В}}}}{\frac{\varepsilon_{\text{П}}}{h - h_{\text{В}}} + \frac{\varepsilon_{\text{В}}}{h_{\text{П}}}} = \frac{q}{1 + \frac{\varepsilon_{\text{П}}}{\varepsilon_{\text{В}}} \left( \frac{h}{h_{\text{В}}} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что кажущийся заряд ЧР уменьшается с увеличением толщины диэлектрика  $h$ .

Интерес представляет интегральная количественная характеристика ЧР, т. е. суммарный заряд  $Q$  за интервал времени  $T$  – сумма кажущихся зарядов частичных разрядов за определенный интервал времени

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n,$$

Для большинства ИМ с ростом напряжения количество областей, в которых возникают ЧР, не остается постоянным, а увеличивается, что приводит к более сильной зависимости числа разрядов в секунду и мощности ЧР от напряжения.

Таким образом, основную информацию об источнике ЧР несут кажущийся заряд и частота следования импульсов ЧР.

Практическая мощность ЧР разряда  $R_{\text{ЧР}}$  равна

$$P = \frac{1}{t_{\text{и}}} [q_1 U_1 + q_2 U_2 + q_3 U_3 + \dots + q_m U_m] = \frac{1}{t_{\text{и}}} \sum_{i=1}^k q_m U_m,$$

где  $U_1, U_2, \dots, U_m$  – мгновенные значения напряжения на изоляции в моменты разрядов;  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – величины кажущихся зарядов ЧР за исследуемый интервал времени;  $t_{\text{и}}$  – время измерения ЧР. Величина  $q_m U_m$  характеризует энергию единичного разряда,  $R_{\text{ЧР}}$  представляет собой потери энергии на ЧР.

Если заряды существенно различны, то средняя мощность равна

$$R_{\text{ЧР}} = \sum_{i=1}^k \frac{W_{\text{ЧР}(i+1)} + W_{\text{ЧР}i}}{2} (n_{i+1} - n_i),$$

где  $W_{\text{ЧР}i}$  –  $i$ -й уровень энергии.

Таким образом, мощность ЧР зависит от интенсивности ЧР (количество разрядов за период питающего напряжения) и от размера газового включения.

Потери энергии на частичные разряды. Возникновение каждого единичного ЧР приводит к выделению в изоляции объекта энергии  $W_{\text{ЧР}}$ . Эта энергия частично тратится на разогрев испытуемого объекта, а частично расходуется на разрушение ИМ. Если емкость  $C_{\text{и}} \gg C_{\text{п}}$ , то

$$W_{\text{ЧР}} = \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{в}}}{2} (U_{\text{в.пр}}^2 - U_{\text{в.г}}^2).$$

Связь между  $q_{\text{ЧР}}$  и  $W_{\text{ЧР}}$  определяется выражением

$$W_{\text{ЧР}} = \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{в}}}{2} (U_{\text{в.пр}}^2 - U_{\text{в.г}}^2).$$

Мощность ЧР зависит от размера включения [49]. Увеличение размера включения (а именно увеличения пробивного промежутка  $h_{\text{в}}$ ) является увеличением начального напряжения ионизации, следовательно, импульс тока и напряжения будет иметь большую амплитуду, а мощность ЧР возрастет (рис. 2). Увеличение мощности разряда приведет к интенсивному росту включения по направлению к электродам, что впоследствии приведет к полному пробоя изоляции. Рост размера включения происходит по дендритной структуре.

Интенсивность ЧР в случае газового включения с большими размерами будет меньше, но при этом его мощность (амплитуда) будет больше. Анализируя мощность импульса ЧР по количеству выделенного тепла (температуре СКЛ), можно говорить о степени развития включения в изоляции.

Если происходит общее изменение структуры ИМ (например, изменение химической структуры, связанное с увеличением  $\text{tg}\delta$ , с возможностью развития теплового пробоя), то необходимо иметь в виду прежде всего мощность ЧР.

#### 4. ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В соответствии с общими представлениями о разрушении изоляции определяющими должны быть либо энергия единичного разряда, либо мощность разрядов. При повышенных температурах, когда условия теплоотвода затруднены и может нарушаться условие теплового равновесия, между выделенным и отведенным количеством тепла может развиваться тепловой пробой [38]. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям, т. е.

$$Q_{\text{выд}} = U^2 \omega C \text{tg} \delta_t, \quad (6)$$

где  $\text{tg} \delta_t = \text{tg} \delta_0 e^{a(\theta - \theta_0)}$ .

Тогда

$$U_{\text{пр}} = \varphi(c) \sqrt{\frac{A_{\text{усл}} \chi}{a_{\text{tg}} \varepsilon f \text{tg} \delta_0}} 10^6, \text{ В.}$$

Здесь  $\chi$  – коэффициент теплопроводности диэлектрика;  $A_{\text{усл}}$  – коэффициент, зависящий от условий охлаждения;  $a_{\text{tg}}$  – температурный коэффициент изменения  $\text{tg} \delta_0$ ;  $\varphi(c)$  – функция, зависящая от параметра  $c$ .

Тепловыделение в ИМ происходит за счет диэлектрических потерь:

$$Q_{\text{изи}} = P_{\partial i} = \Delta U_t^2 \omega C_i \text{tg} \delta_i, \quad (7)$$

Здесь  $\Delta U_i$  – падение напряжения на рассматриваемом слое;  $\omega$  – угловая частота;  $C_i$  – емкость слоя рассматриваемого участка;  $\operatorname{tg} \delta_i$  – значение тангенса диэлектрических потерь на участке  $\theta_i$ .

При определении температуроперепадов исходим из теплового закона Ома:

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R}, \quad \text{где } R = \frac{\Delta}{\chi \cdot S}. \quad (8)$$

Здесь  $R$  – тепловое сопротивление;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $S$  – поверхность охлаждения;  $\Delta$  – толщина диэлектрика;  $\Delta\theta$  – перепад температуры.

Согласно уравнению Фурье для теплового потока

$$\Delta Q = \lambda \frac{d\theta}{dx}. \quad (9)$$

При конвективном теплообмене

$$Q = a_k S (\theta_{\text{пв}} - \theta_0). \quad (10)$$

Здесь  $a_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $S$  – рассеивающая поверхность охлаждения;  $\theta_{\text{пв}}$  – температура поверхности изделия;  $\theta_0$  – начальная температура.

Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене является сложной функцией различных величин (размера и формы конструкции, скорости течения воздуха и т. д.), расчет коэффициентов теплоотдачи проводят на основе критериев подобия [20].

Зная количество выделяемого СКЛ тепла, можем определить температуру на жиле кабеля:

$$\theta_{\text{ж}} = \theta_{\text{пв}} + \frac{nI^2 \rho_{20} T_k K_p}{S} \left( 1 + \frac{a_k Q}{aS} \right), \quad (11)$$

где  $\theta_{\text{ж}}$  – расчетная температура жилы кабеля, °С;  $\theta_{\text{пв}} = 23$  °С – измеренная температура поверхности кабеля;  $n = 1$  – число жил кабеля;  $I$  – максимальный ток кабеля при проведении измерений, А;  $\rho_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °С;  $T_k = 0,0028$  °С·м/Вт – сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покрытий кабеля;  $K = 1,02$  – поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре (при прокладке в воздухе равен 1,02; в земле – 0,98);  $\alpha = 0,004308$  1/°С – температурный коэффициент сопротивления материала жилы [39];  $S = 0,0038465$  – сечение жилы кабеля, м<sup>2</sup>.

Таким образом, для регистрации термофлуктуационных процессов в ИМ выделяемое количество тепла  $Q$  (10) в результате ЧР будем оценивать с помощью пропорциональной ей величине через температуру на поверхности КЛ (11). Критериями оценки работоспособности кабелей по данному методу

являются напряжение возникновения ЧР ( $U_V$ ), уровень ЧР ( $Q$ ), коэффициент старения ( $P_{CT}$ ), коэффициент нелинейности ( $Q_S$ ), а также частота и их интенсивность.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ

Применение метода измерения и локализации ЧР позволяет не только оценивать состояние изоляции КЛ по характеристикам ЧР, но и определять места развивающихся повреждений и включений в КЛ, в которых может произойти пробой изоляции, что исключает аварийные ситуации в энергосетях и дает возможность в плановом порядке производить ремонт КЛ.

Анализ результатов измерения позволяет определить следующие параметры:

- среднее и максимальное значения уровня ЧР;
- схемы распределения разряда по длине кабеля. Система создает качественные и количественные схемы распределения разряда по длине кабеля;
- аномальные процессы на отрезках кабеля на определенном уровне ЧР и число ЧР на испытательном напряжении.

Включения в линии не препятствуют работе, но имеют тенденцию к ухудшению ее технического состояния. Завершающей стадией развития включения является процесс выхода линии из строя, т. е. пробой. Поэтому задача диагностики технического состояния СКЛ состоит в определении степени развития включения, его опасности и остаточном ресурсе эксплуатации до пробоя. Наличие информации о текущем действительном техническом состоянии СКЛ позволяет исключить внезапные аварии. Произведены испытания и комплексная диагностика КЛ районных электрических сетей.

Таблица 1

Технические данные части обследованных КЛ

№	Тип кабеля	Длина линии, м	Количество соединительных муфт	Особенности прокладки / год прокладки	Средняя токовая нагрузка, А
1	ААБ-10 3*150 10 кВ	590	5	в грунте / 06.1983	10
2	ААБ-10 3*150 10 кВ	533,9	2	в грунте / 06.1983	–
3	АСБ-6 3*70 6 кВ	270	3	в грунте / 1990	5
4	ААБ-10 3*150 10 кВ	524,8	3	в грунте / 06.1983	30
5	ААБ-10 3*150-10 кВ	778,7	4	в грунте / 1983	3.5

Работы выполнялись в лаборатории, включающей в себя два вида приборов. Аппаратура OWTS позволяет определять проблемные места в линиях методом ЧР, выполнять их локализацию по всей длине. Приборы CDS предназначены для оценки степени старения и остаточного ресурса эксплуатации линий методом возвратного напряжения и тока релаксации. Техническая и экономическая целесообразность диагностики СКЛ и измерения уровня ЧР иллюстрируется некоторыми выводами, приведенными на рис. 3.

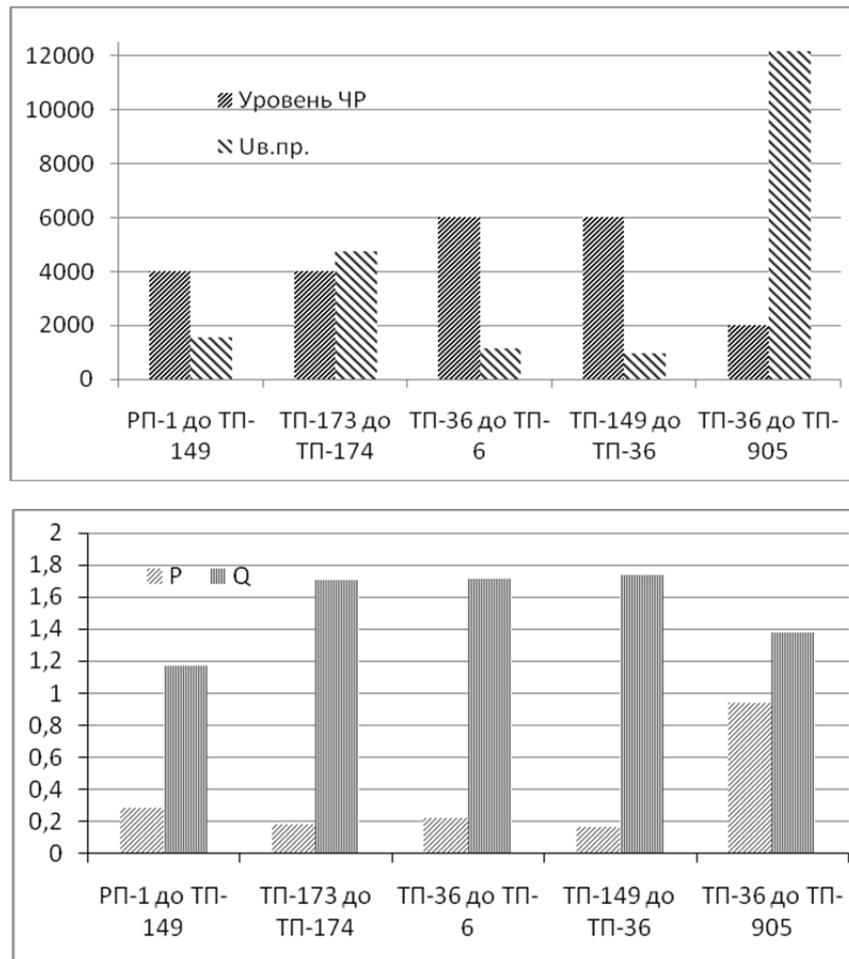


Рис. 3. Результаты технической диагностики СКЛ на предприятиях ЮЗЭС приборами OWTS и CDS

Из диаграммы видно, что кабельная система имеет различное техническое состояние КЛ (имеют различные включения), половина из которых подлежит замене. Очевидно, что при подаче повышенного напряжения на данных участках СКЛ произошел бы пробой изоляции.

Таким образом, техническая диагностика позволяет определять проблемы в КС на их ранней стадии, не доводя эксплуатацию ЭО до аварийной ситуации.

Напряжение возникновения ЧР ниже уровня фазного напряжения ( $PDVI = 4$  кВ), это говорит о том, что при эксплуатации кабеля имеющиеся в нем включения развиваются и вырастают до опасных размеров, что приводит к выходу КЛ из работы.

Результатом 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» (табл. 2). На рис. 5 фазам *A, B, C* соответствуют обозначения *L1, L2, L3*.

Таблица 2

## Граничные значения и тенденции ЧР

Элемент кабельной системы	Тип ИМ	Тенденции развития / предельные значение
Изоляция	Бумажная изоляция	до 10000 пК
	PE / VPE – insulation	$\leq 20$ пК
Муфты	Масляная изоляция	$\geq 10000$ пК
	Масляная/эпоксидная изоляция	5000 пК
	Силикон/EPR изоляция	от 500 до 1000 пК
Концевые муфты	Маслонаполненная концевая разделка	6.000 пК
	Сухая концевая разделка	3500 пК
	Термоусадка-/концевые разделки	250 пК

Эксперимент проводился аппаратурой OWTS по всем фазам КЛ длиной 590 м, которая находилась под напряжением. Распределение основной характеристики ЧР (интенсивности ЧР) на карте представлено на рис. 4.

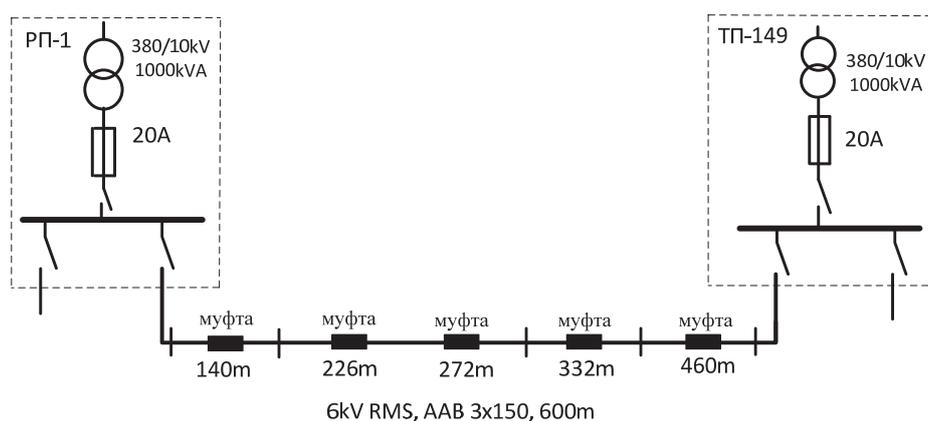


Рис. 4. Участок силовой кабельной системы

Проведена интегральная диагностика ИМ кабельной системы (кабель от РП-1 до ТП-149), где уровень ЧР измерялся диагностической системой OWTSM28 [20], а измерение тока релаксации (или измерение возвратного напряжения) проводилось с помощью прибора CDS.

Обсуждение полученных результатов. Обнаруженные источники ЧР (рис. 4, 5) свидетельствуют о наличии включений в ИМ кабельной системы.

Исследование показало, что на отметках 332 м и 460 м по всем фазам (L1, L2, L3) и концевым заделкам с обеих сторон зафиксирована повышенная интенсивность ЧР согласно табл. 2. Так как места обнаружения ЧР совпадают с расположением муфт (рис. 5), причина появления такого включения может быть связана с нарушением технологии монтажа этих муфт. Таким образом, периодический нагрев и охлаждение кабелей с бумажной изоляцией, пропитанной маслоканифольным компаундом, приводит к постепенному замещению

жидкой пропитки воздухом, появлению воздушных включений в изоляции и деформации оболочки кабеля. В результате этого происходит снижение величины емкости жилы кабеля по отношению к оболочке и другим жилам.

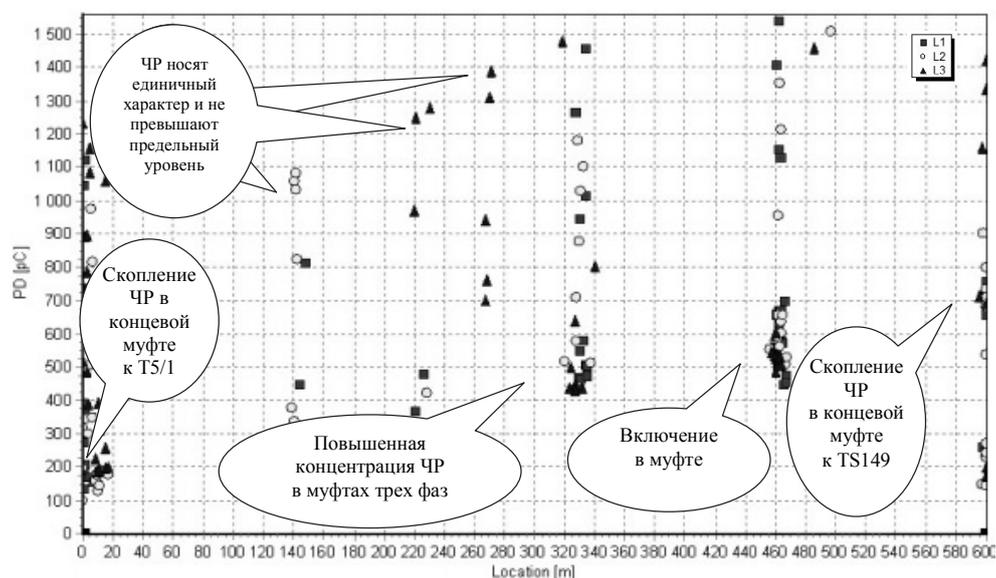


Рис. 5. Карта распределения и интенсивности ЧР в изоляции СКЛ

Результаты исследований участков СКС (напряжение возникновения ЧР  $U_{\text{ЧР}}$  и максимальная величина (уровень) ЧР  $q$ ) сведены в табл. 3.

Таблица 3

#### Исследование диэлектрических параметров состояния СКЛ

Кабельная система	Параметры диэлектрического старения ( $I_{\text{раб}}$ , $U_{\text{воз}}$ )		Рекомендации по техническому обслуживанию			
	$P_{\text{ст}}$	$Q_S$	Степень увлажненности	Степень старения изоляции	Состояние	Диагностирование
РП-1 до ТП-149	0,279	1,172	Влажная	Сильно состарена	Неудовлетворительное	Через один год
ТП-173 до ТП-174	0,18	1,704	Влажная	Сильно состарена	Неудовлетворительное	Через один год
ТП-36 до ТП-6	0,214	1,715	Влажная	Средняя	Удовлетворительно	Через 5 лет
ТП-149 до ТП-36	0,164	1,733	Высокая влажность	Сильно состарена	Неудовлетворительное	Через один год
ТП-36 до ТП-905	0,934	1,377	Очень высокая (сырая)	Сильно состарена	Предпробойное	В течение одного месяца

$P_{\text{ст}}$  – коэффициент старения;  $Q_S$  – коэффициент нелинейности.

Как следует из табл. 3 и 4, исправная изоляция имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины даже при установленном испытательном напряжении (СТО 80380011-РЭ(843)-ИСМ 017-2011, Стандарт «Объемы и нормы щадящих и неразрушающих методов испытания и диагностики кабельных линий 6...110 кВ»). Таким образом, взаимосвязь характеристик ЧР с состоянием электрической изоляции не вызывает сомнений.

Экономическая целесообразность применения системы диагностики, позволяющей на ранней стадии выявить процессы развития повреждений в изоляции КЛ, очевидна (предупреждение производственных потерь при внезапных отказах КЛ, возможность проведения ремонтов КЛ в плановом порядке и др.).

## 6. ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Используются параметры ЧР (напряжение возникновения ЧР  $U_{\text{чр}}$ , максимальная величина ЧР  $q_{\text{чр}}$ ) для определения величины области включения. При этом предполагается, что падение напряжения на воздушном включении толщиной  $h_{\text{в}} \ll h$  (толщина изоляции) составляет

$$U_{\text{в}} = U_m \frac{\varepsilon h_{\text{в}}}{h + (\varepsilon - 1)h_{\text{в}}}. \quad (12)$$

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. Точки пересечения кривых  $U_{\text{в}}(h_{\text{в}})$  и  $U_{\text{в.пр}}(h_{\text{в}})$  определяют диапазон размеров включений от  $h_{\text{в1}}$  до  $h_{\text{в2}}$ , в которых вспыхивают ЧР. По мере увеличения напряжения ЧР охватывают все больший диапазон размеров включений. При этом суммарная частота ЧР увеличивается как за счет роста частоты ЧР в «старых» включениях, активизированных на предыдущих ступенях испытательного напряжения, так и за счет «новых» включений, активизированных при очередном подъеме напряжения. Наблюдая за ростом частоты ЧР при подъеме напряжения, можно оценить количество «новых» включений.

Между кажущейся амплитудой ЧР во включении и его разрядной площадью существует функциональная связь

$$q = U_{\text{в.пр}} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}. \quad (13)$$

Следовательно, напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с (12), а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании (13). Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными. От степени их выполнения в каждом конкретном случае зависит правильность определения геометрических размеров.

Если принять, что включение в форме эллипса, а площадь эллипса вычисляется по формуле  $S_B = \pi ab$  и в классической форме  $b$  соотносится к  $a$  как  $b = 0,5a$ , то выражение (13) можно записать в виде

$$q = \frac{2U_{в.пр} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2}{h - 2b},$$

где  $a, b$  – геометрические параметры эллипса. Тогда для нахождения размера включения решается квадратное уравнение

$$2U_{в.пр} \varepsilon \varepsilon_0 \pi b^2 + 2bq - qh = 0. \quad (14)$$

С помощью данных критериев (напряжение возникновения ЧР, уровень ЧР, коэффициент старения, коэффициент нелинейности) стало возможным быстро и детально определять и достаточно точно прогнозировать, в период какого времени в скрытых включениях произойдет пробой (табл. 4).

Таблица 4

**Исследование параметров ЧР и состояния изоляции СКЛ**

Кабельная система	Параметры ЧР		Величина области включения $h_b$ , мм	Рекомендации	
	$U_{в.пр}$ , кВ	$Q$ , пКл		Состояние изоляции	Ремонт в течение
РП-1 до ТП-149	4,0	1540	1,375	Неудовлетворительное	одного года
ТП-173 до ТП-174	4,0	4730	1,375	Неудовлетворительное	одного года
ТП-36 до ТП-6	6,0	1162	0,99	Неудовлетворительное	одного года
ТП-149 до ТП-36	6,0	972	0,9	Неудовлетворительное	одного года
ТП-36 до ТП-905	2,0	12174	1	Предпробойное	одного месяца

$U_{в.пр}$  – напряжение возникновения ЧР (PDIV);  $Q$  – пКл максимальная величина (уровень) ЧР при  $U_0$ .

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что разработка неразрушающего метода диагностики СКЛ является перспективной задачей, которая позволяет увеличить надежность электроснабжения потребителей, решая основную задачу энергоснабжающих организаций. Использовался комплексный подход при диагностике СКЛ, выработан алгоритм исследований возникновения и развития пробоя, при котором математические модели позволяют дать количественную оценку остаточного ресурса кабелей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании расчета характеристик ЧР установлена связь изменения напряжения зажигания ЧР  $U_B$  и кажущегося заряда  $q$  от размера включения в изоляции, а также изменения напряжения зажигания ЧР  $U_B$  и кажущегося

заряда  $q$  от диэлектрической проницаемости изоляции  $\epsilon$ . Показано, что наиболее оптимальным диагностическим параметром деструкции ИМ является температура. Предложена математическая модель прогнозирования появления включения, развития теплового пробоя в ИМ, вызванного ЧР. Приведена методика диагностирования ИМ в условиях эксплуатации. Анализ результатов показал, что измерение параметров ЧР позволяет в комплексе оценивать воздействие на ИМ различных факторов и определять степень ее деградации. ЧР являются мерой степени электрического старения и интенсивности внешних воздействий температурных, оказывают существенное влияние на формирование и развитие включений изоляции. Установлено, что напряжение зажигания дает возможность определить толщину включений в соответствии с предложенной формулой, а кажущаяся амплитуда ЧР – их разрядную площадь на основании предложенной формулы. Таким образом, все геометрические характеристики включений становятся известными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S. The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development / N.K. Poluyanovich // Proceedings of X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2010). – Niš, Serbia, 2010. – P. 265–269.
2. Кустов А.Г. Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования // Энергетика и промышленность России. – 2006. – №7 (71). – С. 18–19.
3. Дубяго М.Н. Разработка модели старения и определения остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 107–114.
4. Шевченко В.А., Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Математическое описание метода мониторинга и прогнозирования неисправностей в силовых кабельных линиях // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы IV Всероссийской научно-технической интернет-конференции (1–31 октября 2010 г.). – Пермь, 2011. – С. 152–162.
5. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752–753. – P. 1153–1157.
6. Патент 2007874 Российская Федерация. Устройство для контроля понижения изоляции в кабельной линии / Н.М. Золотоносов. – № 4891204/09; заявл. 13.12.1990; опубл. 15.02.1994, Бюл. № 28.
7. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges // Advances in Materials Science and Applications. – 2015. – Vol. 4, iss. 1. – P. 23–32.
8. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 459. – P. 70–75.
9. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
10. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
11. Федосов Е.М. Частичные разряды в элементах электротехнических комплексов: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2009.
12. Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика // Вестник УГАТУ. – 2011. – № 3. – С. 98–100.

13. Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных сшитых изоляционных конструкций / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, В.В. Золотарев, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – № 49. – С. 64–73.

14. *Копырюлин П.В.* Совершенствование эксплуатационных свойств кабельных линий с полимерной изоляцией: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Самарский государственный технический университет. – Самара, 2013. – 132 с.

15. Field experiences with the measurement of partial discharges on rotating equipment / I. Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, C. Kane // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, iss. 4. – P. 930–938.

16. *Ларина Э.Т.* Расчет переходных тепловых процессов одножильного силового кабеля с пластмассовой изоляцией, проложенного в воздухе // Электротехника. – 1991. – № 10. – С. 39–42.

17. *Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y.* Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements // Electric Power Systems Research. – 2000. – Vol. 54. – P. 75–81.

18. *Навалихина Е.Ю.* Математическое моделирование процессов сложного тепломассопереноса в кабельном канале: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2015.

19. *Дубяго М.Н.* Исследование характеристик частичных разрядов в электрической изоляции систем электроснабжения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 201–207.

20. *Меркулов В.И.* Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 156 с.

*Полуянович Николай Константинович*, кандидат технических наук, доцент Южного федерального университета, член корреспондент Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова. Основное направление научных исследований – методы эквивалентных преобразований электрических цепей, синтез цепей. Имеет более 250 публикаций, в том числе 2 монографии. E-mail: nik1-58@mail.ru

*Дубяго Марина Николаевна*, ассистент кафедры электротехники и мехатроники Южного федерального университета. Основное направление научных исследований – методы диагностики и прогнозирования изоляционных материалов. Имеет более 80 научных публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: w\_m88@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-157-174

### ***Analysis of Characteristics and Investigation of Thermal Breakdown of Insulating Materials Caused by Partial Discharges***\*

*N.K. POLUYANOVICH<sup>1</sup>, M.N. DUBYAGO<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Institute of Radio Systems and Control, Southern Federal University, 2, Chekhov St., Taganrog, 347922, Russian Federation, associate professor. E-mail: nik1-58@mail.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Radio Systems and Control, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922, Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: w\_m88@mail.ru Oh.*

One of the main factors determining the reliability and operational continuity of consumer power supply systems is its electroinsulating material condition (EI). Cable lines (CL) are one of the basic elements of power supply systems of cities and industrial enterprises and in many respects define their long-term development. The CL technical condition is controlled mainly by the state of isolation. And here methods based on high-voltage tests of cable lines are most widely used. But high-voltage tests lead to a reduction in the service life or to their breakdown. Besides, they are integral methods and do not provide information about the actual technical condition of

---

\* Received 17 January 2018.

lines, their problem areas, their degree of danger, and residual life. Therefore there is a task of increasing CL lifetime and reducing damaging DC effects on it. To do this it is proposed to replace the CL test with a high voltage non-destructive method of diagnostics. A thermal fluctuation method of diagnostics of CL insulation condition is proposed in the paper. The use of this non-destructive method allows increasing the reliability of power supply to consumers. Non-destructive equipment diagnostics is a new concept of maintenance based on the current state and on the prediction of the reliability margin. In this paper the problem is considered on the basis of a mathematical model of establishing the effect of the line temperature field, regime parameters and operational factors on insulating properties of CLs. The main task of the paper is to evaluate the service life on the basis of the mathematical model of aging and revealed changes in the properties of CL insulation. The developed approach can be used to create devices for diagnosing and predicting the state of CLs and to determine the degree of degradation.

**Keywords:** electrical insulating materials, partial discharges, thermal fluctuation processes, thermal breakdown, prediction of resource, diagnostic technique, reliability of electricity supply

## REFERENCES

1. Poluyanovich N.K., Rassoha D.P., Formanyuk V.S. The automatic electric isolation defects diagnosing system's algorithm development / N.K. Poluyanovich. *Proceedings of X Triennial International SAUM Conference on Systems, Automatic Control and Measurements (SAUM 2010)*. Niš, Serbia, 2010, pp. 265–269.
2. Kustov A.G. Sushchestvuet li v Rossii diagnostika silovykh kabel'nykh linii i elektrooborudovaniya [does diagnostics of power cable lines and electrical equipment exist in Russia]. *Energetika i promyshlennost' Rossii – Power and Industry of Russia*, 2006, no. 7 (71), pp. 18–19.
3. Dubyago M.N. Razrabotka modeli stareniya i opredeleniya ostatochnogo resursa izolyatsii silovykh kabelei [Development of an aging model and determination of the residual life of power cable insulation]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southem Federal University. Engineering sciences*, 2014, no. 4 (153), pp. 107–114.
4. Shevchenko V.A., Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. [Mathematical description of the method of monitoring and forecasting faults in power cable lines]. *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. CALS-tekhnologii v energetike: materialy IV Vserossiiskoi nauchno-tekhnikheskoi internet-konferentsii* [Energy. Energy innovation in the energy sector. CALS-technologies in the energy sector. Materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Internet Conference], Perm', October 1–31, 2010, pp. 152–162. (In Russian).
5. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 752–753, pp. 1153–1157.
6. Zolotonosov N.M. *Ustroistvo dlya kontrolya ponizheniya izolyatsii v kabel'noi linii* [Device for monitoring the reduction of insulation in the cable line]. Patent RF, no. 2007874, 1994.
7. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Analysis of insulation materials of cable systems by method of partial discharges. *Advances in Materials Science and Applications*, 2015, vol. 4, iss. 1, pp. 23–32.
8. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Study of characteristics of partial discharge for assistment of condition of electrical insulating materials of power supply system. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 459, pp. 70–75.
9. Kuchinskii G.S. *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruktivnykh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad, Energiya Publ., 1979. 224 p.
10. Vdoviko V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges to diagnosis of high voltage equipment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2007. 155 p.
11. Fedosov E.M. *Chastichnye razryady v elementakh elektrotekhnicheskikh kompleksov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Partial discharges in the elements of electrotechnical complexes. PhD eng. sci. diss.]. Ufa, 2009.

12. Ismagilov F.R., Maksudov D.V. Matematicheskoe modelirovanie razvitiya chastichnykh razryadov v protsesse stareniya dielektrika [Mathematical modeling of the development of partial discharge in the aging process of the dielectric]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik UGATU*, 2011, no. 3, pp. 98–100.

13. Zolotarev V.M., Karpushenko V.P., Zolotarev V.V., Antonets Yu.A., Naumenko A.A. Tangens ugla dielektricheskikh poter' mnogosloinykh sshitykh izolyatsionnykh konstruktssii [The tangent of dielectric loss angle insulation multilayered stitched constructions]. *Vestnik NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2011, no. 49, pp. 64–73.

14. Kopyryulin P.V. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv kabel'nykh linii s polimernoi izolyatsiei*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of operational properties of cable lines with polymeric insulation. PhD eng. sci. diss.]. Samara, 2013. 132 p.

15. Blokhintsev I. Golovkov M., Golubev A., Kane C. Field experiences with the measurement of partial discharges on rotating equipment. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, vol. 14, iss. 4, pp. 930–938.

16. Larina E.T. Raschet perekhodnykh teplovykh protsessov odnozhil'nogo silovogo kabelya s plastmassovoi izolyatsiei, prolozhennogo v vozdukh [Calculation of transient thermal processes of a single-core power cable with plastic insulation laid in air]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1991, no. 10, pp. 39–42. (In Russian).

17. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements. *Electric Power Systems Research*, 2000, vol. 54, pp. 75–81.

18. Navalikhina E.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov slozhnogo teplomassopere-nosa v kabel'nom kanale*. Diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling of complex heat and mass transfer in the cable channel. PhD eng. sci. diss.]. Perm', 2015.

19. Dubyago M.N. Issledovanie kharakteristik chastichnykh razryadov v elektricheskoi izol-yatsii sistem elektrosnabzheniya [Study of characteristics of partial discharge in electrical insulation of power supply system]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2013, no. 11, pp. 201–207.

20. Merkulov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie v elektroizolyatsionnykh konstruktssiyakh* [Mathematical modeling in insulating structures]. Tomsk, TPU Publ., 2001. 156 p.

Для цитирования:

Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Анализ характеристик и исследование теплового пробоя изоляционных материалов, вызванных частичными разрядами // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 157–174. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-157-174.

For citation:

Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Analiz kharakteristik i issledovanie teplovogo proboya izolyatsionnykh materialov, vyzvannykh chastichnymi razryadami [Analysis of characteristics and investigation of thermal breakdown of insulating materials caused by partial discharges]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 157–174. doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-157-174.