

Maksimov Aleksandr Viktorovich – Southern Federal University; e-mail:kafmps@tppark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

Gelozhe Yury Andreevich – GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia, phone: +78634371637, e-mail: rts@tsure.ru; the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

УДК 621.315.2/075.8

М.Н. Дубяго

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СТАРЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Определены критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Сделан обзор и классификация математических моделей старения и определения остаточного ресурса электроизоляционных материалов силовых кабельных линий, из которого выявлено, какие параметры влияют на старение изоляции, какие учитывают математические модели старения и определения остаточного ресурса. Проведен анализ математических моделей старения изоляции СКЛ и развития ее предельного состояния. Разработан алгоритм электрического старения и пробоя изоляции. Показана связь между параметрами, характеризующими механическое и тепловое старение изоляции, соответствующее истощению ресурса кабелей. Проведен анализ построения моделей физико-химических процессов старения – для кабелей переменного тока а также исследования процессов старения и разрушения изоляции. Приведены выражения для расчетаработанного и остаточного ресурса изоляции. Показано, что оценка израсходованного и остаточного ресурса изоляции, может быть получена по результатам измерений параметров изоляции в зависимости от эксплуатационных параметров с использованием математической модели старения.

Электродеструкция; изоляция; ресурс; неразрушающая диагностика.

M.N. Dubyago

DEVELOPMENT OF MODEL OF AGEING AND DEFINITION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF ISOLATION OF POWER CABLES

Criteria of an assessment of extent of aging of power cables with the paper impregnated isolation are defined. The review and classification of the mathematical models of aging and definition of a residual resource of electric insulating materials of power cable lines was done, that allows us to conclude what parameters influence the isolation aging, what parameters consider mathematical models of aging and definition of a residual resource. The analysis of mathematical models of aging of isolation of PCL and development of its limit state is carried out. The algorithm of electric aging and isolation breakdown is developed. Communication between the parameters characterizing mechanical and thermal aging of isolation corresponding to exhaustion of a resource of cables is shown. The analysis of creation of models of physical and chemical processes of aging – for cables of alternated current was carried out and also research of processes of aging and isolation destruction was fulfilled. Expressions for calculation of the worked and residual resource of isolation are given. It is shown that the assessment of the spent and residual resource of isolation can be received by results of measurements of parameters of isolation depending on operational parameters with use of mathematical model of aging.

Electric destruction; isolation; resource; nondestructive diagnostics.

Введение. В условиях эксплуатации происходит старение электрической изоляции кабелей. 37 % всех отказов силового электрооборудования связано с нарушением электрической прочности изоляции. Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки. Физический износ силовых кабельных линий (СКЛ) с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) находится на уровне 70–80 %, но они продолжают работать, так как не выработали своего ресурса. Поэтому на практике необходимо знать наработку кабеля и, что особенно важно, его остаточный ресурс. Ресурс электрической изоляции существенно зависит от температуры и от напряженности электрического поля, но методика, основанная на этих параметрах, является разрушающей и подходит только для вновь разрабатываемых кабелей, проходящих ресурсные испытания в лабораториях или на полигонах. Так, например, техническое состояние СКЛ определяется постоянным испытательным напряжением, превышающим номинальное в 6 раз (табл. 1) или повышенным напряжением частотой 0,1 Гц. Однако это не позволяет получить достоверную информацию о реальном состоянии изоляции СКЛ. Экономическая потребность в фактическом продлении эксплуатационного ресурса систем энергоснабжения предприятий приводит к необходимости ускоренного внедрения эффективных методов диагностики кабелей и оборудования. Повреждение КЛ 6–10 кВ является причиной 80–90 % от всех отключений. Необходима разработка более точных и научно обоснованных методов расчета, а также совершенствование методик диагностирования кабелей, и в том числе методик оценки их остаточного ресурса, опирающихся на новые, нетрадиционные подходы [15].

Таблица 1

Испытательные напряжения СКЛ с БМИ

Вид испытательного напряжения	Номинальное напряжение, кВ					
	До 1	2	3	6	10	20
Выпрямленное напряжение	2,5	12	18	36	60	175
Переменное напряжение – 0,1 Гц специальной формы (косинусный импульс)				12	18	35

Актуальность работы заключается в определении остаточного ресурса изоляции кабельных систем, работающих в различных условиях, является сложной задачей, что связано как с многообразием эксплуатационных факторов, так и с трудностями по выявлению наиболее информативных параметров, адекватно отражающих процессы деградации изоляции [1, 2, 3].

Модели старения электрической изоляции СКЛ. Методика расчета электроизоляции на электрическую прочность основывается на математическом моделировании старения и отказа ЭИ. Данные же явления очень сложны и специфичны, процесс старения и достижения предельного состояния представляет собой совокупность процессов, взаимодействующих между собой сложным образом. Исследование этого факта необходимо для разработки как методов электрического расчета, так и диагностики и оценки остаточного ресурса [12].

Выделяют следующие виды старения и разрушения электроизоляции СКЛ из полиэтилена: термическое старение, электрические триинги, водные триинги.

Последовательность и взаимосвязь процессов, обуславливающих электрическое старение и пробой изоляции, можно представить следующей схемой (рис. 1).

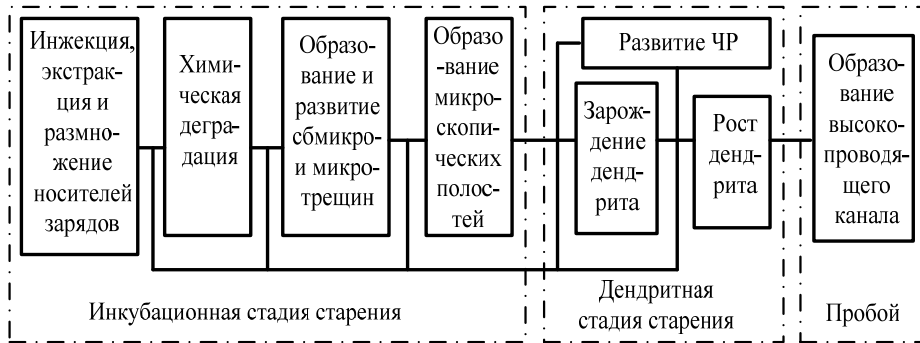


Рис. 1. Алгоритм электрического старения и пробоя изоляции

Зависимость между длительной электрической прочностью E_{np} и временем старения t **маслонаполненных кабелей** описывается соотношением

$$E_{np} = E_{\infty} + \frac{E_{np} - E_{\infty}}{n\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где E_{∞} – асимптотическое значение E_{np} ; n – показатель степени, зависящий от свойств изоляции.

Рабочая напряженность поля вычисляется по формуле

$$E_{раб} = \frac{k_4 * E_{\infty}}{k_1 * k_2 * k_3}, \quad (2)$$

где k_j – коэффициенты запаса, учитывающие различные факторы, в том числе: k_1 – повышение рабочего напряжения, k_2 – влияние технологических дефектов на электрическую прочность, k_3 – снижение давления, k_4 – разброс в значениях E_m . Данный подход предполагает, что основной формой старения изоляции СКЛ в эксплуатации является ионизационное старение. В литературе показано, что при напряженностях вплоть до 25–30 кВ/мм ЧР не оказывают существенного, и тем более определяющего влияния на деградацию эксплуатационных свойств изоляции СКЛ.

Моделируя старение как термоактивационный процесс, ускоряемый электрическим полем под влиянием диэлектрических потерь, т.е. старение как рост тангенса угла потерь $tg\delta$, автор [3] получил выражение, устанавливающее прямую связь между ресурсом ЭИ (τ) и E :

$$\tau = \frac{C * \exp(-\gamma z)}{\ln \frac{tg\delta_{np}}{tg\delta_0}} \int_{tg\delta_0}^{tg\delta_{np}} \frac{\exp(-E^2 * y_1 * \gamma * x)}{x} dx, \quad (3)$$

где $tg\delta_0$ – начальное значение; $tg\delta_{np}$ – предельное значение $tg\delta$, C , y , z , y_1 – параметры, определяемые свойствами изоляции, конструкцией СКЛ и термическими условиями.

Развитие данного подхода должно учитывать такие факторы, как эффект “тренировки” электроизоляции, сопровождающийся уменьшением $tg\delta$, температурную зависимость $tg\delta$, а также то обстоятельство, что изоляция СКЛ часто проявляет себя как система не с сосредоточенными, а с распределенными параметрами.

Для полимерной изоляции разработано множество математических моделей, связывающих ресурс (τ) с основными воздействующими факторами – E и δ . Распространение получил подход [4], основанный на двух соотношениях – степенном законе старения

$$E^n * \tau = const \quad (4)$$

и двух- или трехметрическом распределении Вейбулла

$$F(E) = 1 - \exp\left(-\frac{E-E_I}{E_0-E_I}\right)^b, \quad (5)$$

где $F(E)$ – вероятность отказа; b – параметр формы; E_0 – параметр масштаба; E_I – параметр сдвига распределения.

Метод расчета, основанный на выражении (4), справедлив для дефектов типа газовых включений, основным механизмом старения изоляции при этом являются частичные разряды (ЧР).

Семейство математических моделей электрического старения изоляции предложено научной школой Болонского университета. В качестве примера можно привести следующую модель [5]:

$$L = \frac{\frac{hp}{kT} \exp\left(-\frac{DS^l}{k}\right) \exp\left(\frac{DH}{kT}\right) \exp\left[-\frac{e\Gamma_0}{kT} \exp\left(-\frac{\Gamma_1}{T}\right) E\right]}{\left[(E-E_0) - (E_{t0}-E_0) \exp\left(-\frac{CT}{CT_{t0}}\right)\right]^\mu}, \quad (6)$$

где L – ресурс ЭИ; T – абсолютная температура; hp – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; E_0 – критическое значение E ,

$$CT = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0},$$

где T_0 – отсчетное (референтное) значение T ; T_{t0} – пороговое значение T ; E_{t0} – значение E_0 при $T = T_0$; μ , DS^l , DH , Γ_0 , Γ_1 – параметры.

Данное семейство моделей учитывает существование критических напряженностей $E_{кр}$. Недостатком описанных моделей являются эмпирические формулы, лишенные теоретического обоснования и связи с реальными механизмами и условиями старения и отказа СКЛ. Из соотношений [5] не ясно, что собой должен представлять ресурс изоляции – время до пробоя или до зарождения электрического триинга. Большое количество параметров, содержащихся в формулах типа (6), позволяет использовать эти формулы фактически под любой массив опытных данных, который в условиях длительных и дорогостоящих экспериментов по определению кривой жизни всегда ограничен.

Определенный прогресс, по сравнению с вышеприведенными, представляет собой модель старения, предложенная J.P. Crene [6]:

$$L = \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{\Delta G}{kT}\right) \cos h\left(\frac{e\lambda E}{kT}\right), \quad (7)$$

где ΔG – свободная энергия активации; λ – ширина энергетического барьера; e – элементарный электрический заряд, прочие обозначения соответствуют (6).

Здесь [6] теоретически обосновывается модель, в которой первичным актом деструкции полимерной изоляции является разрыв межмолекулярных связей, т.е. разрушение диэлектрика представляет собой чисто физический процесс. Опытным путем исследователи [7] доказали, что электродеструкция материала сопровождается разрывом межатомных связей, т.е. представляет собой химический или физико-химический процесс. Далее, Crene рассматривает L как время до пробоя и использует для подтверждения (7) зависимости времен до пробоя от приложенного напряжения, полученные для кабелей разных конструкций. Модель (7) содержит два независимых параметра (ΔG и λ) и не полностью учитывает механизмы электрического старения. Даже в случае испытаний совершенно однотипных образцов (7) не корректно описывает кривую жизни СКЛ, так как время до пробоя складывается из двух составляющих – времени до зарождения электрического триинга и времени его прорастания через изоляционный материал. Этим стадиям развития пробоя соответствуют существенно различные механизмы деградации полимера.

В [8] рассмотрен метод оценки ресурса изоляции кабелей, основанный на определении корреляционной зависимости между характеристиками изоляции кабеля и характеристиками, прямо связанными с ресурсом кабелей. При определении

наработанного ресурса при температурах, отличных от температуры старения в форсированном режиме, при котором определен коэффициент K_{Π} , наработанный ресурс равен

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{пр}} \exp(\Pi_{\text{н}} - \Pi_{\text{пр}}) / K_{\Pi}.$$

Эта зависимость преобразуется к виду

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{прф}} * \exp \left[\frac{\Pi_{\text{н}} - \Pi_{\text{пр}}}{K_{\Pi}} + \frac{W}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{р}}} - \frac{1}{T_{\text{ф}}} \right) \right],$$

где $\tau_{\text{прф}}$ – предельное значение ресурса в форсированном режиме испытаний; $\tau_{\text{пр}}$ – предельное значение наработки, соответствующее $\Pi_{\text{пр}}$; $\Pi_{\text{пр}}$, $\Pi_{\text{н}}$ – предельное значение и наработанный в процессе эксперимента ресурс; $\tau_{\text{н}}$ – наработанный ресурс в момент измерения параметра $\Pi_{\text{н}}$; $T_{\text{ф}}$ – температура старения в форсированном режиме; $T_{\text{р}}$ – рабочая температура кабеля; $W = 54$ кДж/моль – условная энергия активации процесса разрушения изоляции; K_{Π} – коэффициент изменения параметра (работоспособности от времени старения),

$$K_{\Pi} = \frac{\Pi_{\text{пр}} - \Pi_{\text{н}}}{\ln \tau_{\text{пр}} - \ln \tau_{\text{н}}}.$$

Для применения метода [8] для различных видов изоляции необходимы дополнительные исследования.

В [11] показано, что диэлектрическая проницаемость, электрическое сопротивление и $\text{tg}\delta$ слабо влияют на электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ и деградацию изоляции и не могут служить критерием работоспособности изделия из-за малой чувствительности к старению. Наиболее информативной характеристикой изоляции является величина электрического сопротивления, которая в процессе эксплуатации кабелей может изменяться на несколько порядков. Рассмотрено влияние старения изоляции кабелей в условиях эксплуатации на ее удельное сопротивление. Установлена зависимость величины удельного сопротивления изоляции кабеля от температуры и времени эксплуатации, которая может служить критерием работоспособности изоляции СКЛ в процессе эксплуатации:

$$\rho(t, T) = \frac{\rho_{\text{н}}}{\left[1 + A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]} \exp \left[-\frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{н}}} - \frac{1}{T} \right) - B(t - \tau) \right], \quad (8)$$

где предэкспоненциальная часть характеризует изменение сопротивления изоляции во времени вследствие сорбционных процессов, а экспоненциальная часть отражает изменение сопротивления в температурном ходе и процессе старения.

Здесь $k = 8,31$ кДж/моль; K – молярная газовая постоянная; $T_{\text{н}}$ – начальная температура (293 К); T – температура эксплуатации изоляции (К); B – коэффициент, характеризующий скорость снижения сопротивления изоляции в процессе старения при температуре эксплуатации, равный

$$B = \text{tg}\alpha = \frac{\Delta \lg \rho}{\Delta t} = \frac{\Delta \lg R}{\Delta t}. \quad (9)$$

Уравнение (8) запишем в логарифмическом виде

$$\lg \rho(t, T) = \lg \left[\frac{\rho_{\text{н}}}{\left[1 + A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]} \right] - 0,43 \cdot \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{н}}} - \frac{1}{T} \right) - (t - \tau). \quad (10)$$

По выражению (8) определим сопротивление изоляции кабеля, зная его размеры:

$$а) R_{t,T} = \rho_{t,T} \cdot \frac{\ln \frac{D_k/d}{2 \cdot \pi \cdot l}}, \quad б) R_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \cdot \frac{\ln \frac{D_k}{d}}{2 \cdot \pi \cdot l}, \quad (11)$$

где $\rho_{t,T}$ – удельное сопротивление изоляционного материала при температуре эксплуатации (Ом·м); D_k – диаметр кабеля по изоляции [м]; d – диаметр кабеля по жиле [м]; l – расчетная длина кабеля [м],

$$R_{t,T} = \frac{R_H}{\left[1+A\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)\right]} \exp\left[-\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_H}-\frac{1}{T}\right)-B(t-\tau)\right], \quad (12)$$

$$\lg R(t,T) = \lg\left[\frac{R_H}{1+A\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}\right] - 0,43 \cdot \frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_H}-\frac{1}{T}\right) - (t-\tau), \quad (13)$$

где R_H – сопротивление изоляции изделия в исходном состоянии (Ом).

Время достижения минимального допустимого сопротивления изоляции кабеля на 1 км длины ($R_{кр}$) рассчитывается из (13) по формуле

$$t_p = \frac{1}{B} \left\{ \lg\left[\frac{R_H/R_{кр}}{1+A\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)}\right] - 0,43 \cdot \frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_H}-\frac{1}{T}\right) \right\} + \tau. \quad (14)$$

При длительной эксплуатации кабеля, когда $t > \tau$, уравнение (14) принимает вид

$$t_p = \frac{1}{B} \left[\lg\left(\frac{R_H}{R_{кр} \cdot A}\right) \right] - 0,43 \cdot \frac{W}{K}\left(\frac{1}{T_H}-\frac{1}{T}\right). \quad (15)$$

Таким образом, аналитическое уравнение (15) может быть использовано для расчета ресурса кабелей (t_p) в процессе эксплуатации.

Анализ приведенных математических моделей электрической деструкции изоляции показал недостатки и ограничения рассмотренных моделей, выявив неполное их теоретическое обоснование (неясны границы их применимости, перспективы дальнейшего развития). Модели или совсем не учитывают [6], или учитывают явно в недостаточной степени [3] реальные особенности электроизоляционной системы СКЛ. Отсутствие математических моделей электродеструкции изоляции СКЛ, свободных от указанных недостатков, является причиной отсутствия полноценных методик электрического расчета изоляции. Контроль характеристик, связанных с ресурсом кабелей по совокупности результатов измерений: снижение сопротивления изоляции (или рост токов утечки при испытании постоянным напряжением), рост емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, рост коэффициента абсорбции, рост уровня ЧР) методом совокупных измерений определяет состояние изоляции. В некоторых условиях отдельные определяющие параметры достаточно полно оценивают качество изоляции. Такой подход оправдан для выявления конкретных неисправностей изоляции (увлажнение, старение и т.п.).

Предлагаемый метод. Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий [13] использует неразрушающий метод определения ресурса кабелей, основанный на измерении режимных параметров сети в изоляции силовых кабелей в зависимости от степени ее старения.

Оценка израсходованного и остаточного ресурса изоляции может быть получена методом, основанным на прогнозировании остаточного ресурса изоляции [14], который является одним из методов регрессионного анализа для оценки неизвестных величин по результатам измерений, содержащих случайные ошибки. Метод позволит прогнозировать время до достижения тока (16) уровня пробоя (рис. 5).

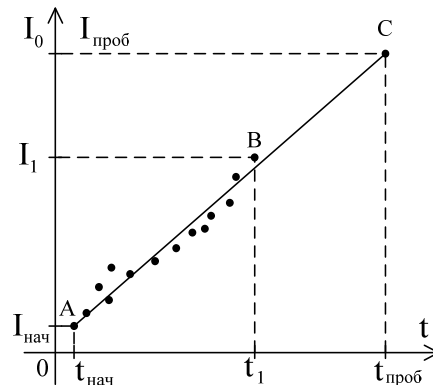


Рис. 5. Использование прямой AC как показателя ожидаемого результата

Выразим функцию (1) через данные n измерений:

$$I_{0t}(t) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n I_{0i} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2} - \frac{(\sum_{i=1}^n I_{0i})(\sum_{i=1}^n t_i^2)(\sum_{i=1}^n t_i)}{(n(\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2)(\sum_{i=1}^n t_i^2)} + \frac{(\sum_{i=1}^n I_{0i} t_i) \cdot (\sum_{i=1}^n t_i) \cdot (\sum_{i=1}^n t_i)}{(n(\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2)(\sum_{i=1}^n t_i^2)} \right] t + \frac{(\sum_{i=1}^n I_{0i})(\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n I_{0i} t_i)(\sum_{i=1}^n t_i)}{n(\sum_{i=1}^n t_i^2) - (\sum_{i=1}^n t_i)^2}. \quad (16)$$

Заключение. Неразрушающие методы испытаний не подвергают старению СКЛ, а результаты диагностики дают информацию о наработке и остаточном ресурсе. Необходимы научные исследования для понимания механизмов зарождения дефектов в изоляции и предупреждения их развития. Необходимо разрабатывать методы диагностики по выявлению соответствующего достоверного браковочного критерия изоляции СКЛ. Переход на неразрушающую диагностику позволяет продлить срок службы кабеля и определять изоляционные свойства кабеля с различными типами изоляции и конструкций. Электрическое сопротивление изоляции является наиболее подходящей характеристикой для разработки неразрушающего метода диагностики изоляции кабеля при эксплуатации. Оценка израсходованного и остаточного ресурса изоляции может быть получена по результатам измерений параметров изоляции в зависимости от эксплуатационных параметров с использованием математической модели старения

Вывод. Предложено направление в исследовании СКЛ, базирующееся на усовершенствованном неразрушающем методе определения ресурса изоляции, основанном на измерении режимных параметров сети [13, 14] в зависимости от степени ее старения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лавров Ю. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости электротехники. – 2007. – № 1. – С. 72-75.
2. Сафонов Г.Л., Воробьев П.В. Сорокин А.М., Булдаков А.В. Продление ресурса систем изоляции за счет использования химически активных компонентов // Электротехника. – 2007. – № 3 – С. 51-55.
3. Образцов Ю.В. Разработка усовершенствованных конструкций маслонаполненных кабелей: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИКИП, 1984. – 172 с.

4. *Tsuchiya S., Yonemoto N., Okama M. et al.* Evaluation of installed longdistance EHV XLPE cable systems in Japan // CIGRE. – 1998. – № 21-104. – P. 6.
5. *Mazzanti G., Montanari G.* C.A comparison between XLPE and EPR as insulating materials for HV cables. 1996 IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996, Baltimore, USA, 12 p.
6. *Parpal J.L., Dang C., Crine J.P.* A Review of electrical accelerated ageing data for extruded dielectric cables // 4th International Conference on Insulated Power Cables, JICABLE'95, Versailles, France, № B.8.1. – P. 6.
7. *Banji S.S., Bulinski A.T., Densley R.J.* Degradation of polymeric insulation due to photoemission caused by high electric fields // IEEE Transactions. – 1989. – Vol. E1-24, № 1. – P. 91-98.
8. *Боев М.А., Канискин В.А., Костенко Э.М., Сажин Б.И., Татжибаев А.И.* Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации: Учеб. пособие. Ч. 2. – СПб., 2001.
9. *Kao K.K.* New theory of electrical discharge and breakdown in lowmobility condensed insulators // Journal. Of applied Physics. – 1984. – Vol. 55, № 3. – P. 752-755.
10. *Dissado L.A., Hill R.M.* Self-similarity as a fundamental feature of the regression of fluctuations. Chemilal Physics. – 1987. – Vol. 111. – P. 193-207.
11. *Фризен А.Н., Петров А.В.* Свойства изоляции кабелей для питания погруженных электронасосов добычи нефти // Наука и техника. – 2007. – № 4 (305). – С. 44-49.
12. *Шуялов М.Ю.* Исследование кабелей высокого напряжения. Разработка усовершенствованных методов электрического расчета и микродиагностики: Дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИКИ, 2000. – 172 с.
13. Патент РФ № 112525. Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / Полуянович Н.К., Стульнева А.В., Дубяго М.Н. Оpubл. 10.01.2012 Бюл. №1.
14. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод неразрушающего контроля и прогнозирования развивающихся повреждений изоляции силового кабеля линии // Сб. тр. XI конференции «Системы контроля автоматики и измерения» SAUM-2012. – Ниш, 2012. – С. 418-422.
15. *Пишихов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Беляев В.Е., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П.* Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 192-199.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Дубяго Марина Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: w_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники; аспирантка.

Dubyago Marina Nikolaevna – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508519304; the department of electric technics and mechatronics; postgraduate student.