

УДК 621.315.3:621.316.99

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140

Учет энергии частичных разрядов в математической модели термофлуктуационных процессов силового кабеля^{*}

М.Н. ДУБЯГО^а, Н.К. ПОЛУЯНОВИЧ^б, Д.В. БУРЬКОВ^с

347922, РФ, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Южный федеральный университет

^а w_m88@mail.ru ^б nik1-58@mail.ru ^с bdv-76@yandex.ru

Показано, что наличие примесей либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоляции, приводит к возникновению токов утечки. Получена формула расчета мощности, выделяемой активной составляющей тока утечки. Получена математическая модель, позволяющая рассчитать мощность ЧР, а также определить расположение включения m_1 в основной изоляции, обусловленное мощностью активной составляющей тока утечки при его возникновении в основной изоляции кабеля.

Расчет изменения теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля, проводится в зависимости от радиальных расстояний методом кусочно-заданных функций с учетом теплового сопротивления включения. Предлагаемая математическая модель (7) позволяет наряду с послойным расчетом изотерм в поперечном сечении кабеля определять наличие включений в изоляционном материале. Предлагаемая математическая модель учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции кабеля, и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. Методика, предлагаемая в разработанной модели, позволяет проводить учет тепловых потерь на основе тепловых и геометрических размеров включения, что не было учтено в указанных выше моделях. Это позволит получить температуру по всем слоям СКЛ, отталкиваясь от радиальных расстояний, параметров включения, обуславливаемых током жилы изоляции, как основных температурообразующих факторов.

Разработано программное обеспечение «Система измерения и расчета термофлуктуационных характеристик СКЛ (SMaCTC)» [1], основанное на математической модели температурного поля в сечении кабеля. Программное обеспечение отличается от существующих возможностью послойного контроля термофлуктуационных процессов по значению температуры на поверхности кабеля.

Ключевые слова: энергия частичных разрядов, термофлуктуационные процессы, изоляционные материалы, силовые кабели, ток утечки, тепловые потери, износ, прогнозирование, неразрушающий метод контроля

* Статья получена 16 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные случаи выхода из строя силового кабеля как важнейшего элемента системы электроснабжения из-за превышения допустимой температуры делают задачу анализа его теплового режима весьма актуальной. Температура является одним из основных факторов, обуславливающих износ изоляции. На стадии проектирования силовых кабельных линий (СКЛ) по методике, изложенной в IEC 60287, определяют их пропускную способность, учитывая все возможные факторы, возникающие при эксплуатации; выбирают коэффициенты, обеспечивающие запас по нагреву, поэтому в ряде случаев кабели оказываются недогруженными, а иногда работают на пределе термической стойкости.

В соответствии с общими представлениями о разрушении изоляции определяющими должны быть либо энергия единичного частичного разряда (ЧР) $W_{\text{ЧР}}$, либо мощность разрядов и $P_{\text{ЧР}}$. В изоляции может развиваться тепловой пробой [2], связанный с разогревом диэлектрика при протекании тока проводимости и развитием диэлектрических потерь [3]. Однако непосредственное измерение $P_{\text{ЧР}}$ и $W_{\text{ЧР}}$ в большинстве случаев практически невозможно, так как они очень малы. Количество выделяемого в диэлектрике тепла пропорционально диэлектрическим потерям.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенный обзор литературных источников в области исследований термофлуктуационных процессов на основе тепловых схем замещения СКЛ показал, что при разработке математических моделей анализа активных потерь, влияющих на состояние основной изоляции кабеля, учитывались электродинамические усилия жил и собственного электромагнитного поля, приводящие к нагреву изоляции и, как следствие, к возникновению токов утечки. Было показано, что, несмотря на существенное различие в рабочих режимах, происходит их комбинированное воздействие на изоляцию кабеля [4]. В работе Зайцева Е.С. и других авторов [5] была разработана математическая модель распределения температуры в высоковольтном экранированном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена, позволяющая проводить анализ, зная лишь его тепловые характеристики и условия окружающей среды. Однако ни одна из рассмотренных математических моделей не учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции СКЛ, и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. В связи с этим актуальной является задача исследования влияния на изотермические характеристики СКЛ, градиента температур включений в основной изоляции.

В кабелях с встроенным оптоволоконным продольным датчиком температуры [4] измеряется нагрев поверхности по всей его длине, так как оптоволоконно находится в защитной оболочке или в экране кабеля. Измерить температуру наиболее нагретой точки кабеля (жилы), где и происходит наиболее интенсивный тепловой износ изоляции, можно только косвенным методом. Поэтому важной задачей являются исследования в области косвенного изме-

рения температуры на основе математической модели тепловых процессов, которые могут быть использованы в алгоритмах программного обеспечения устройств непрерывного диагностирования силовых кабелей.

2. ПОСЛОЙНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР КАБЕЛЯ

2.1. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЧР, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ТОКОМ УТЕЧКИ

Тепловые процессы в СКЛ вызваны активными потерями (рис. 1) которые преобразуются в тепловой поток, проходящий от жил через диэлектрик к внешней среде.

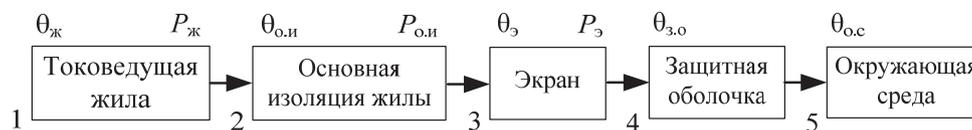


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов кабеля

Fig. 1. Structural diagram of the cable thermal processes

Мощность электрических потерь в жилах кабеля определяется по известной формуле:

$$P_{эл} = I^2 R . \tag{1}$$

Активная мощность преобразуется в тепловой поток [5]

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta L} S t . \tag{2}$$

Изменение теплового потока, проходящего через слой изоляции кабеля в единицу времени, также представляет собой активную мощность и измеряется в [Вт]:

$$P_Q = \frac{dQ}{dt} . \tag{3}$$

Здесь Q – количество теплоты, переданное через слой вещества толщиной ΔL и площадью S при поддержании на его плоскостях разности температур ΔT за время t ; λ – удельная теплопроводность материала [8, 9].

Процессы разрушения изоляции под действием теплового потока подробно исследованы, например, в работе [10]. Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов, связанных с наличием примесей, либо продуктов окисления, возникающих в результате нагрева в изоля-

ции, приводит к возникновению токов утечки, определяемых в общем случае равенством [9]:

$$I_y = U\omega C, \quad (4)$$

где U – напряжение между слоями диэлектрика; ω – угловая частота тока; C – емкость между слоями диэлектрика.

Расчет изменения теплового потока, проходящего через слои изоляции кабеля, проводится в зависимости от радиальных расстояний методом кусочно-заданных функций, в котором учитывается место расположения дефекта основной изоляции (m_1). Оно зависит от степени нагрева жилы и тепловых свойств основной изоляции (о.и). Радиальные расстояния считаются от центра жилы, что позволяет получить картину распределения градиента температур.

Мощность, выделяемую активной составляющей тока утечки, можно рассчитать по формуле

$$P_B = P_{Bt} + \frac{I_{ж}^2}{S_{ж}\gamma_{ж}} + \frac{I_{в}^2}{S_{в}\gamma_{в}} \ln\left(\frac{m_1}{h_{ж}}\right) + \frac{I_{в}^2}{S_{в}\gamma_{в}\lambda_{в}} (h_{ж}^2 - h^2), \quad (5.1)$$

$$P_{Bt} = P_{гр} + \frac{I_{ж}^2}{2\pi\lambda_{о.и}S_{ж}\gamma_{ж}} \ln\left(\frac{h_{о.и}}{m_1}\right), \quad (5.2)$$

где h – радиальное расстояние (переменная); $h_{ж}$ – радиус внешнего края основной изоляции; m_1 – место расположения дефекта; $S_{ж}$ – площадь сечения жилы; $\delta_{в}$ – плотность тока включения; $h_{в}$ – размер включения; $\lambda_{в}$ – теплопроводность включения; $\gamma_{в}$ – проводимость включения; $\gamma_{ж}$ – проводимость жилы; $h_{о.и}$ – внешний радиус основной изоляции; $\lambda_{о.и}$ – теплопроводность основной изоляции; $P_{гр}$ – тепловой поток на границе включения и основной изоляции.

Плотность тока

$$\delta_{в} = \frac{I_y}{S_{в}} = \frac{U\omega C_{в}}{S_{в}}.$$

Емкость включения

$$C_{в} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{в} \frac{h_{в}}{2},$$

где $h_{в}$ – размер включения.

Тепловое сопротивление включения

$$R_B = \frac{1}{\gamma_B} = \frac{1}{qN_{UD}(\mu_+ + \mu_-)},$$

где γ_B – тепловая проводимость; N_{UD} – удельное число частиц ($N_{UD} = 2.6786e + 25$); μ_+ , μ_- – подвижности положительно и отрицательно заряженных частиц.

Объем включения

$$U_B = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{h_B}{2}\right)^3.$$

Напряжение на включении

$$U_B = \varepsilon_B \varepsilon_0 \left(\frac{h_B}{h}\right),$$

$$h = h_{o.и} - h_{ж}.$$

где h – радиальное расстояние основной изоляции.

Площадь поверхности включения

$$S_B = \frac{\pi h_B^2}{4}.$$

Заряд включения

$$q = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_B S_B}{h_{o.и} - h_{ж} - h_B}.$$

Для определения места расположения ЧР в систему расчета температур (7) введено выражение

$$m_1 = h_{ж} + \frac{I_{НОМ}}{I_t}(h_{ж} - h_{o.и}), \quad (6)$$

где $I_{НОМ}$ – ток жилы номинальный; I_t – ток жилы в настоящий момент времени.

Таким образом, полученная математическая модель позволяет рассчитать мощность ЧР, а также определить расположение включения m_1 (6) в основной изоляции, обусловленное мощностью активной составляющей тока утечки (5.2), при его возникновении в основной изоляции кабеля.

2.2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для мониторинга термофлуктуационных процессов в СКЛ используется метод встроенных датчиков температуры [12]. Рассмотрим силовую кабель как систему из следующих тепловых однородных тел: токопроводящая жила, основная изоляция, экран, защитная оболочка, внешняя охлаждающая среда (рис. 2, где $\theta_{ж}$, $\theta_{о.и}$, $\theta_{э}$, $\theta_{з.о}$, $\theta_{о.с}$, $\theta_{в}$ – соответственно, температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, экрана, защитной оболочки, окружающей среды и включения ($^{\circ}\text{C}$); $C_{ж}$, $C_{э}$, $C_{о.и}$, $C_{з.о}$, $C_{о.с}$, $C_{в}$ – теплоемкости соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки, окружающей среды и включения; $R_{ж}$, $R_{э}$, $R_{о.и}$, $R_{з.о}$, $R_{в}$ – тепловые сопротивления соответственно жилы, экрана, основной изоляции, защитной оболочки и включения; $Q_{ж}$, $Q_{в}$, $Q_{э}$ – источники тока, замещающие температурный напор, создаваемый током жилы (потери активной мощности в токоведущей жиле), во включении и на экране.

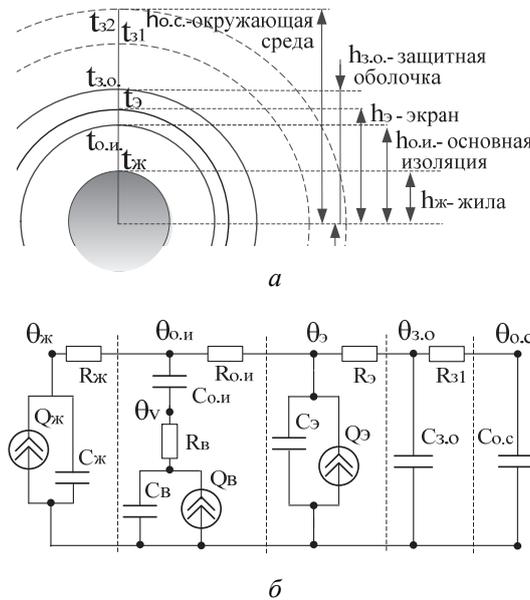


Рис. 2. Сечение кабеля и его тепловая схема замещения

Fig. 2. Cable cross-section and its thermal replacement scheme

В работе [7] кабель для расчета его тепловых процессов рассматривается как система однородных тел. Однако данная модель не учитывает такой фактор, как влияние на нагрев кабеля, т. е. диэлектрические потери в изоляции, а именно ЧР. Предлагаемая математическая модель (7) позволяет наряду с послойным расчетом изотерм в поперечном сечении кабеля (рис. 3) определять наличие включений в изоляционном материале. Расчет выделяемого в изоляционном материале (диэлектрике) тепла $Q_{о.и}$, пропорционального диэлектрическим потерям во включениях (энергия частичных разряда $W_{чр}$),

производится по аналогии расчета выделяемого тепла Q в жиле (экране) [7], но только с учетом мощности, выделяемой активной составляющей тока утечки:

$$\theta(h) = \left\{ \begin{array}{l} \theta_{0,c} + \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi h \chi} \quad (h = h_{0,c}), \\ \theta(h_{0,c}) + \ln\left(\frac{h_{0,c}}{h}\right) \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi \lambda_{0,c}} \quad (h_{3,0} \leq h \leq h_{0,c}), \\ \theta(h_{3,0}) + \ln\left(\frac{h_{3,0}}{h}\right) \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{э}^2}{\gamma_{э} S_{э}} \right)}{2\pi \lambda_{0,и}} \quad (h_{э} \leq h \leq h_{3,0}), \\ \theta(h_{э}) + \ln\left(\frac{h_{э}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} - \frac{j_{э}^2}{\gamma_{э}} h_{0,и}^2 \pi}{2\pi \lambda_{э}} + \frac{j_{э}^2 (h_{э}^2 - h^2)}{4\lambda_{э} \gamma_{э}} \quad (h_{0,и} \leq h \leq h_{э}), \\ \theta(h_{0,и}) + \ln\left(\frac{h_{0,и}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}}}{2\pi \lambda_{0,и}} + \frac{j_{0,и}^2 (h_{0,и}^2 - h^2)}{4\lambda_{0,и} \gamma_{0,и}} \quad (m_1 + 2r_{в} \leq h \leq h_{0,и}), \\ \theta(h_{гр}) + \frac{\left(\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}} + \frac{I_{в}^2}{\gamma_{в} S_{в}} \right) \ln\left(\frac{m_1}{h_{ж}}\right)}{2\pi \lambda_{в}} + \frac{I_{в}^2 (h_{ж}^2 - h^2)}{\gamma_{в} S_{в} \lambda_{в}} + \frac{I_{ж}^2 \ln\left(\frac{h_{0,и}}{m_1}\right)}{2\pi \lambda_{ж} \gamma_{ж} S_{ж}} \\ (m_1 \leq h \leq m_1 + h_{в}), \\ \theta(h_{0,и}) + \ln\left(\frac{h_{0,и}}{h}\right) \frac{\frac{I_{ж}^2}{\gamma_{ж} S_{ж}}}{2\pi \lambda_{0,и}} + \frac{j_{0,и}^2 (h_{0,и}^2 - h^2)}{4\lambda_{0,и} \gamma_{0,и}} \quad (h_{ж} \leq h \leq m_1), \\ \theta(h_{ж}) + \frac{j_{ж}^2 (h_{ж}^2 - h^2)}{4\lambda_{ж} \gamma_{ж}} \quad (0 \leq h \leq h_{ж}). \end{array} \right. \quad (7)$$

Профиль температур в сечении исследуемого силового кабеля АПвПу г-1х30/25-10 определялся системой уравнений (7) в соответствии с теорией теплопроводности (рис. 2), где $I_{ж}$, $I_{э}$ – токи в жиле и экране; χ – коэффициент теплопроводности $a = \lambda/c \cdot p$ [$\text{м}^2/\text{с}$]; $j_{ж} = I_{ж} / S_{ж}$; $j_{э} = I_{э} / S_{э}$; $S_{ж}$, $S_{э}$ – площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_{ж}$, $\gamma_{э}$ – электропроводности жилы и экрана; $\delta_{0,и} = I_{у} / S_{0,и} = U \omega C_{0,и} / S_{0,и}$.

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В соответствии с системой уравнений (7) в Matlab построен градиент температур в сечении кабеля и окружающей среды. Расчеты выполнены при токе в жиле кабеля до 640 А. Ток в оболочке кабеля определяется режимом работы кабеля (током жилы), был принят 60 % от тока жилы. Физические свойства материалов и геометрические размеры элементов кабеля АПВПу г-1х30/25-10 сведены в таблице.

Параметры кабеля

Cable parameters

Параметр	Материал	Алюминий	СПЭ	Медь	Воздух
	Удельная теплопроводность (Вт/(м · К))		209.3	0.38	400
Плотность (кг/м ³)		2700	2200	8700	1.2
Удельная теплоемкость (Дж/(кг · К))		920	1900	385	1005
Электропроводность (См/м)		$31,75 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^7$	–

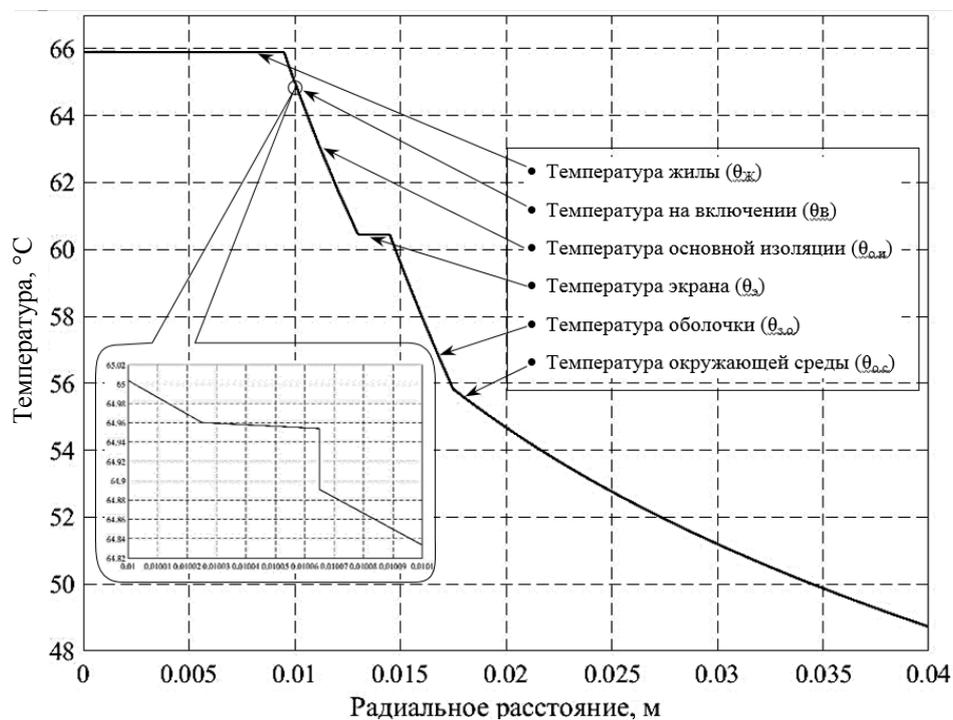


Рис. 3. Графики распределения температуры в характерных точках сечения КЛ

Fig. 3. Graphs of the temperature distribution in the characteristic points of the CL cross-section

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ полученных изотермических зависимостей высокотеплопроводных элементов (жила и экран кабеля) показывает их слабую зависимость от изменения температуры (горизонтальные полки на графике). Температурный градиент, полученный в изоляционном материале (СПЭ-кабель), подтверждает их незначительную теплопроводность. Значительная разница между измеренной температурой ($\theta_{3,0}$) и температурой на жиле кабеля вызывает необходимость перерасчета температуры поверхности кабеля ($\theta_{3,0}$) в температуру жилы ($\theta_{ж}$). То есть достаточно определить температурное поле на поверхности кабеля ($\theta_{3,0}$), а затем на основании системы уравнений теплопроводности (7) получить температуру по всем слоям кабеля.

Исследование полученного профиля распределения температур показало возможность моделирования наряду с температурным полем кабеля, потерь во включениях (энергии частичных разряда $W_{чр}$). Так, из рис. 3 видно наличие включений в изоляционном материале, их количество и расположение в диэлектрике, что свидетельствует о тепловом износе изоляции, обусловленном мощностью (5.2) определяемой активной составляющей тока утечки, и наблюдается вблизи жилы кабеля. В сравнении с [3, 4] предлагаемая математическая модель учитывает тепловые потери, вызванные ЧР в изоляции СКЛ и их влияние на профиль распределения температур в характерных точках сечения СКЛ. Методика, предлагаемая в разработанной модели, позволяет проводить учет тепловых потерь на основе тепловых и геометрических размеров включения, что не было учтено в указанных выше моделях. Это позволит получить температуру по всем слоям СКЛ, отталкиваясь от радиальных расстояний, параметров включения, обусловленных током жилы изоляции как основным температурообразующим фактором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* «Система измерения и расчета термофлуктуационных характеристик силовых кабельных линий (SMaCTC)»: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ. – № 2018612492 от 16.02.2018.
2. *Меркулов В.И.* Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 156 с.
3. *Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.* Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 367 с.
4. *Коржов А.В., Томашева Е.В.* Энергетическая диаграмма силового кабеля для анализа активных потерь, влияющих на состояние изоляции // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2008. – № 11. – С. 29–31.
5. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е.С. Зайцев, В.В. Корольков, В.Д. Лебедев, В.В. Можжухина //

Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : труды V Международной научной конференции. – Харьков, 2011. – С. 615–622.

6. Широков О.Г., Зализный Д.И. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств // Наукоемкие технологии. – 2008. – № 2. – С. 63–67.

7. Яворский Б.М., Детлаф А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1979.

8. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1974.

9. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

10. Основы кабельной техники / В.А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов; под ред. В.А. Привезенцева. – М.; Л.: Энергия, 1967.

11. IEC 60034-1: 2004. Rotating electrical machines. Pt. 1. Rating and performance. – 137 p.

12. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Термофлуктуационный метод диагностики состояния изоляционных материалов СКЛ и прогнозирование их остаточного ресурса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 66–71.

13. Дубяго М.Н., Пишихонов В.Х., Полуянович Н.К. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7. – С. 230–237.

14. Горелова В.Л., Мельникова Е.Н. Основы прогнозирования систем. – М.: Высшая школа, 1986. – 267 с.

15. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Термодинамический способ выявления деструкции изоляции в задачах диагностики и прогнозирования ресурса кабельных систем // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 3 (46). – С. 25.

16. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 117–127.

17. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2018. – Vol. 5 (16). – P. 1–4.

18. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering 2015 (AEECE 2015). – Amsterdam: Atlantis Press, 2015. – P. 49–54.

19. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. – P. 012036.

20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2019. – Vol. 7, N 1. – P. 415–420.

Дубяго Марина Николаевна, ассистент Южного Федерального университета. Область научных интересов: разработка алгоритмов математического моделирования, исследования и обеспечения надежности систем энергоснабжения и автоматизированных устройств на их основе, а именно поиск новых и совершенствование существующих методов и средств непрерывного контроля и диагностики неисправностей в силовых кабельных линиях, а также теоретические основы исследования тенденций и прогнозирования развития систем энергоснабжения. E-mail: w_m88@mail.ru

Полюянович Николай Константинович, доцент Южного федерального университета. Область научных интересов: электротехника, разработка методов эквивалентного преобразования линейных и нелинейных схем замещения электрических цепей и создание алгоритмов автоматизации методов синтеза схем, разработка методов прогнозирования состояния изоляции силового электрооборудования по режимным параметрам энергосети, исследование нанокompозитных газочувствительных материалов методом импедансной спектроскопии, математические методы исследования режимов и устойчивости электроэнергетических систем. Имеет более 10 авторских свидетельств и патентов РФ и более 100 научных публикаций. E-mail: nik1-58@mail.ru

Бурьков Дмитрий Владимирович, доцент Южного федерального университета. Область научных интересов: компьютерные технологии дистанционного образования в области технических специальностей, дидактика и методика образовательного процесса, моделирование систем электроснабжения, электроприводов и других объектов электроэнергетики. Имеет более 40 научных публикаций. E-mail: bdv-76@yandex.ru

Dubyago Marina Nikolaevna, an assistant professor, Southern Federal University. The field of her research covers the development of mathematical modeling algorithms, study and provision of power supply system reliability as well as reliability of automated units based on them. It implies search for new methods and updating of the existing methods and means of continuous monitoring and diagnostics of faults in power cables as well as theoretical fundamentals of trend studies and forecast of power supply system development. E-mail: w_m88@mail.ru

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich, an associate professor, Southern Federal University. His research interests are focused on electrical engineering, development of equivalent conversion methods of linear and non-linear equivalent electric circuits and development of algorithms of circuit synthesis automation methods. He is also involved in developing forecast procedures of power equipment isolation in terms of electric net mode parameters. His research is also related to research into nanocomposite gas sensitive materials by the impedance spectroscopy method as well as to mathematical methods of power system modes and stability. He is the author of 10 author's certificates and RF patents and of over 100 publications. E-mail: nik1-58@mail.ru

Bur'kov Dmitry Vladimirovich, an associate professor, Southern Federal University. His research interests are focused on computer technologies of distance learning in engineering field, didactics and methodology of the training process, modeling of power supply systems, electric drives and other power engineering objects. He is the author of over 40 publications

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140

Accounting for the partial discharge energy in the mathematical model of power cable thermal fluctuation processes*

M.N. DUBYAGO^a, N.K. POLUYANOVICH^b, D.V. BURKOV^c

Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy Lane, Taganrog, 347922, Russian Federation

^a w_m88@mail.ru ^b nik1-58@mail.ru ^c bdv-76@yandex.ru

Abstract

It is shown that the presence of impurities or oxidation products resulting from insulation heating leads to leakage currents. The formula for calculating the power released by the active component of the leakage current is obtained. A mathematical model is obtained to calculate the power of the CR, as well as to determine the location of ml insertion in the base insulation, due to the power of the active composition of the leakage current, when it occurs in the base cable insulation.

The calculation of the change in the heat flux passing through the cable insulation layers is carried out depending on the radial distances by the method of piecewise given functions, taking into account thermal resistance of the insertion. The proposed mathematical model (7) allows determining the presence of insertions in the insulating material along with the layer-by-layer calculation of isotherms in the cross-section of the cable. The proposed mathematical model takes into account the heat losses caused by the CR in the cable insulation and their effect on the temperature distribution profile at the characteristic points of the cross section of the SCL. The technique proposed in the developed model allows for the accounting of heat losses based on the thermal and geometric dimensions of the inclusion, which was not taken into account in the above models. This will make it possible to obtain the temperature for all SCL layers, starting from the radial distances, the insertion parameters caused by the current of the insulation core, as the main rate-forming factor.

The software "System" of measurement and calculation of thermal characteristics of SCL (SMaCTC) [1] based on the mathematical model of the temperature field in the cable section is developed. The software differs from the existing possibility of layer-by-layer control of thermal fluctuation processes by the temperature value on the cable surface.

Keywords: partial discharge energy, thermal fluctuation processes, insulation materials, power cables, leakage current, heat loss, wear, prediction, non-destructive testing method

REFERENCES

1. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. *"Sistema" izmereniya i rascheta termofluktuationnykh kharakteristik silovykh kabel'nykh linii (SMaCTC)* ["System" of measurement and calculation of thermal characteristics of power cable lines]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2018612492, 2018. (In Russian, unpublished).
2. Merkulov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie v elektroizolyatsionnykh konstruktsiyakh* [Mathematical modeling in electrical insulating structures]. Tomsk, TPU Publ., 2001. 156 p.
3. Kuchinskii G.S., Kizevetter V.E., Pinal' Yu.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya* [Insulation of high voltage installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 367 p.
4. Korzhov A.V., Tomasheva E.V. Energeticheskaya diagramma silovogo kabelya dlya analiza aktivnykh poter', vliyayushchikh na sostoyanie izolyatsii [Energy diagram of a power cable for the analysis of active losses affecting the condition of the insulation]. *Vestnik YuUrGU. Seriya:*

* Received 16 January 2019.

Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering, 2008, no. 11, pp. 29–31.

5. Zaitsev E.S., Korol'kov V.V., Lebedev V.D., Mozhzhuhina V.V. [Simulation of thermal processes in a cable with cross-linked polyethylene insulation by means of Matlab and Simulink]. *Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozhenii v srede MATLAB : trudy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Designing engineering and scientific applications in MATLAB: proceedings of the V International scientific conference]. Khar'kov, 2011, pp. 615–622. (In Russian).

6. Shirokov O.G., Zaliznyi D.I. Teplovye skhemy zameshcheniya elektroenergeticheskikh ustroystv [Thermal equivalent circuits of electric power devices]. *Naukoemkie tekhnologii – Science Intensive Technologies*, 2008, no. 2, pp. 63–67.

7. Yavorskii B.M., Detlaf A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Physics handbook for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1979.

8. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. *Spravochnik po elementaroi fizike* [Handbook of elementary physics]. Moscow, Nauka Publ., 1974.

9. Leonov V.M., Peshkov I.B., Ryazanov I.B., Kholodnyi S.D. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 432 p.

10. Privezentsev V.A., Grodnev I.I., Kholodnyi S.D., Ryazanov I.B. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Moscow, Leningrad, Energiya Publ., 1967.

11. *IEC 60034-1: 2004. Rotating electrical machines. Pt. 1. Rating and performance*. 137 p.

12. Poluyanovich N.K., Dubyago M.N. Termofluktatsionnyi metod diagnostiki sostoyaniya izolyatsionnykh materialov SKL i prognozirovanie ikh ostatochnogo resursa [Thermofluctuation method of diagnosing the condition of the insulation materials of the SCR and the prediction of their residual life]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 66–71.

13. Dubyago M.N., Pshikhopov V.Kh., Poluyanovich N.K. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and prediction of insulation materials of power cable lines]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2015, no. 7, pp. 230–237.

14. Gorelova V.L., Mel'nikova E.N. *Osnovy prognozirovaniya sistem* [Fundamentals of systems forecasting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 267 p.

15. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Termodinamicheskii sposob vyyavleniya destruktssii izolyatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya resursa kabel'nykh sistem [Thermodynamic method of detection of insulation destruction in the problems of diagnostics and forecasting of cable systems resource]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Engineering Journal of Don*, 2017, no. 3 (46), p. 25.

16. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Pshikhopov V.Kh. Metod issledovaniya termofluktatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniya izolyatsionnykh materialov [Method of research of thermofluctuation processes in problems of diagnostics and forecasting of insulating materials]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Don State Technical University*, 2017, vol. 17, no. 3 (90), pp. 117–127.

17. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and power supply systems. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2018, vol. 5 (16), pp. 1–4.

18. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering 2015 (AEECE 2015)*. Amsterdam, Atlantis Press, 2015, pp. 49–54.

19. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 229, p. 012036.

20. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Estimation of insulating materials depreciation and forecasting the residual cable resource considering the current core temperature. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 415–420.

Для цитирования:

Дубяго М.Н., Полюянович Н.К., Бурков Д.В. Учет энергии частичных разрядов в математической модели термофлуктуационных процессов силового кабеля // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2 (75). – С. 127–140. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140.

For citation:

Dubyago M.N., Poluyanovich N.K., Burkov D.V. Uchet energii chastichnykh razryadov v matematicheskoi modeli termoflukuatsionnykh protsessov silovogo kabelya [Accounting for the energy of partial discharges in the mathematical model of thermal fluctuation processes of the power cable]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (75), pp. 127–140. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-2-127-140.