



УДК 520.192.4

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

А.А. Гираев, gamir0550@mail.ru, М.Н. Дубяго, w_m88@mail.ru,

Н.К. Полуянович, nik1-58@mail.ru

Южный федеральный университет (ЮФУ), Таганрог

В данной статье проведены исследования термофлуктуационных процессов в изоляционных материалах в соответствии с теорией теплопроводности для решения задач диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляционных материалов на основе цифрового регистратора, а также неразрушающего температурного метода. Уточнена аналитическая зависимость определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жила кабеля) с учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы силовой кабельной линии (СКЛ). Проведен анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры, при различных нагрузочных режимах кабеля.

Ключевые слова: контроль, изоляция, термофлуктуационные характеристики кабелей

CONTROL AND DIAGNOSTICS OF THE THERMALFLUCTUATION CHARACTERISTICS OF INSULATION MATERIALS OF POWER CABLES

A.A. Giraev, M. N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

Southern Federal University (SFU), Taganrog

In this article researches of thermofluctuation processes in insulating materials according to the theory of thermal conductivity for the solution of problems of diagnostics and forecasting of a residual resource of insulating materials on the basis of the digital recorder, and also a non-destructive temperature method are carried out. Refined analytical relationship determining the temperature of the hottest point of the insulation (cable core) given the surface temperature of the cable, the environment and the current conductors of the power cable Li-NII (CLA). The analysis of experimental and design characteristics of temperature distributions under different load conditions of the cable is carried out.

Keywords: control, insulation, thermal characteristics of cables

Важной характеристикой кабельной линии из сшитого полиэтилена является пропускная способность, которая в свою очередь определяется тепловым режимом, исходя из которого, определяют площадь поперечного сечения кабеля [1-3, 11]. Решением проблемы контроля температуры кабеля во время работы, является ее мониторинг с помощью распределённого оптоволоконного датчика температуры, либо датчик прикреплённого к поверхности кабеля или расположенного в экране кабеля [4,5,10]. Определение температуры жилы [6] производится в соответствии с системой уравнений (1). В MatLab были построены профили температур в сечении кабеля и окружающей среды, рис. 1. Расчёты выполнены при токе в жиле кабеля до 640,А. Ток в оболочке кабеля определяется режимом работы кабеля (током жилы). Ток в оболочке был принят в процентном отношении от тока жилы 0%, 20%, 40% и 60%. Параметры силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10: $d_1=0.019$ м; $d_2=0.026$ м; $d_3=0.029$ м; $d_4=0.035$ м.; удельной теплопроводности материалов: $\gamma_1=390 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$; $\gamma_2=0.35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$; $\gamma_3=390 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$; $\gamma_4=0.12 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{°C}}$; удельной теплоемкости материалов: $c_1=385 \frac{\text{с}\cdot\text{Вт}}{\text{°C}\cdot\text{кг}}$; $c_2=2200 \frac{\text{с}\cdot\text{Вт}}{\text{°C}\cdot\text{кг}}$; $c_3=385 \frac{\text{с}\cdot\text{Вт}}{\text{°C}\cdot\text{кг}}$; $c_4=$



1470 $\frac{с \cdot Вт}{°C \cdot кг}$; плотности материалов: $\beta_1 = 8940 \frac{кг}{м^3}$; $\beta_2 = 920 \frac{кг}{м^3}$; $\beta_3 = 8940 \frac{кг}{м^3}$; $\beta_4 = 1390 \frac{кг}{м^3}$, проведено моделирование.

$$t(r) = \begin{cases} t_{cp} + \frac{\frac{\delta_{жс}^2 \cdot S_{жс} + \delta_3^2 \cdot S_3}{\gamma_{жс} \cdot \gamma_3}}{2\pi \cdot r \cdot a}, & (r = r_5) \\ t(r_5) + \frac{\frac{\delta_{жс}^2 \cdot S_{жс} + \delta_3^2 \cdot S_3}{\gamma_{жс} \cdot \gamma_3}}{2\pi \cdot \lambda_3} \ln\left(\frac{r_5}{r}\right), & (r_4 \leq r \leq r_5) \\ t(r_4) + \frac{\frac{\delta_{жс}^2 \cdot S_{жс} + \delta_3^2 \cdot S_3}{\gamma_{жс} \cdot \gamma_3}}{2\pi \cdot \lambda_3} \ln\left(\frac{r_4}{r}\right), & (r_3 \leq r \leq r_4) \\ t(r_3) + \frac{\frac{\delta_{жс}^2 \cdot S_{жс} - \delta_3^2 \cdot r^2 \cdot \pi}{\gamma_{жс} \cdot \gamma_3}}{2\pi \cdot \lambda_3} \ln\left(\frac{r_3}{r}\right) + \frac{\delta_3^2}{\gamma_3 \cdot 4\lambda} (r_3^2 - r^2), & (r_2 \leq r \leq r_3) \\ t(r_2) + \frac{\frac{\delta_{жс}^2 \cdot S_{жс}}{\gamma_{жс}}}{2\pi \cdot \lambda_3} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right), & (r_1 \leq r \leq r_2) \\ t(r_1) + \frac{\frac{\delta_{жс}^2}{\gamma_{жс}}}{\gamma_{жс} \cdot 4\lambda_{жс}} (r_1^2 - r^2), & (0 \leq r \leq r_1) \end{cases} \quad (1)$$

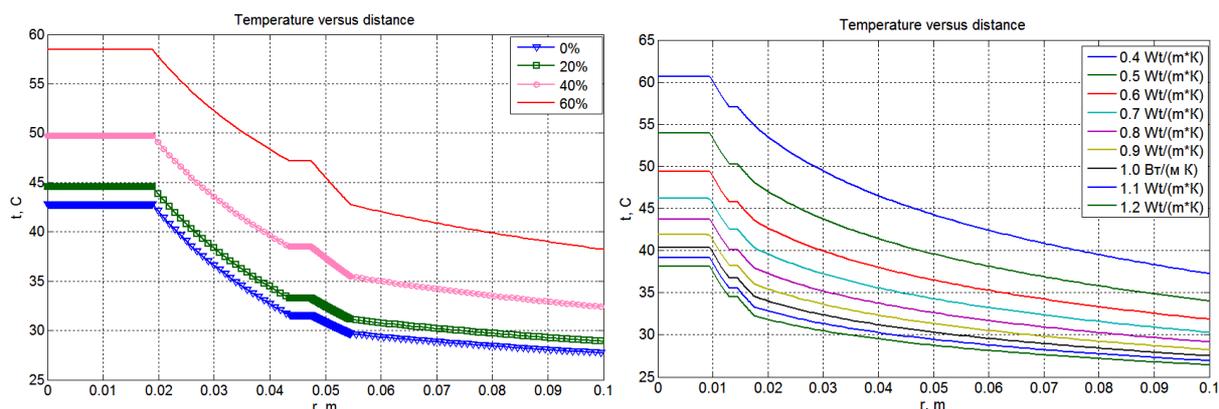


Рис. 1 - Графики распределение температуры в характерных точках сечения КЛ: а – при различных процентах текущего экрана на токопроводе; б – при различных теплопроводностях грунта

С учетом температуры поверхности кабеля, окружающей среды и тока жилы кабеля рассматриваемого СПЭ кабеля, предлагается аналитическая зависимость определения температуры наиболее нагретой точки изоляции (жилы кабеля) [5]:

$$\theta_{ж}(t) = \theta_{3.о.}(t) + \frac{n \cdot I^2 \cdot \rho_{20} \cdot m \cdot T_k \cdot K_p \left[1 + \alpha \cdot (\theta_{доп} - \theta_{о.с.}(t)) \right]}{S} \quad (2)$$

где $\theta_{ж}$ – расчетная температура жилы кабеля, °C; $\theta_{3.о.} = 23^\circ\text{C}$ – измеренная температура поверхности кабеля (защитная оболочка); $n = 1$ – число жил кабеля; I – максимальный ток кабеля при проведении измерений, А; $\rho_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное электрическое сопротивление жилы кабеля при 20 °C; $T_k = 0,0028^\circ\text{C} \cdot \text{м/Вт}$ – сумма термических сопротивлений изоляции и защитных покровов кабеля;



m – экспериментальный множитель; $K_p = 1,02$ – поправочный коэффициент для приведения электрического сопротивления к расчетной температуре [26]; $\alpha = 0,004308 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент сопротивления материала жилы; $\theta_{\text{доп}} = 90^\circ\text{C}$ – длительно допустимая температура изоляции жилы; $\theta_{\text{о.с.}} = 23^\circ\text{C}$ – измеренная температура окружающей среды; $S = 0,0038465$ – сечение жилы кабеля, м^2 .

Расчетный метод определения температуры наиболее нагретой точки ИМ жилы СКЛ применяя измеренные значения температуры его поверхности, температуры окружающей среды, токов жил по формуле (2) [5]. Уравнения (2) учитывает стационарные тепловые процессы в кабеле и справедливо при установившихся значениях измеряемых величин и позволяет рассчитать температуру жилы кабеля максимально просто. При эксплуатации измеряемые величины изменяются во времени, таким образом, для их учета необходимо вести расчет нестационарных тепловых процессов.

Для проверки адекватности разработанной математической модели, использовалась силовая установка с мощным понижающим трансформатором, позволяющим получить ток 640 А. Была собрана измерительная система [5] для исследования тепловых процессов в одножильных кабелях. Датчики температуры послойно размещались внутри и на поверхности СКЛ, а также на некотором удалении от него. В качестве образца использовались отрезки заведомо исправных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10, длиной 0,85 м.

Таким образом. Максимальная абсолютная погрешность расчета температуры, в сравнение с непосредственно измеренной температурой, не превысила $2,9^\circ\text{C}$. Полученные высокие значения коэффициента корреляции, равные 0,999, говорят о достаточной адекватности математической модели реальным тепловым процессам. Предложенная аналитическая зависимость может применяться в качестве базовой при вычислении тепловых процессов СКЛ в режиме реального времени, так как ее соответствие подкреплено опытными данными. Полученные диаграммы свидетельствуют о явной корреляции экспериментальных и расчетных кривых температуры, что говорит о верном направлении при выборе математической модели.

Список литературы

1. Навалихина, Е.Ю. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в кабельном канале и определение рациональной передаваемой мощности кабелей / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова // Прикладная математика, механика и процессы управления: материалы всероссийской научн.-техн. интернет-конф. студентов и молодых учёных. Пермь, 2013. – Т.1. – С. 217-227.
2. Дубяго М.Н., Пшихопов В.Х., Полуянович Н.К. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий. Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 7 (168). С. 230-237.
3. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Неразрушающий метод прогнозирования остаточного ресурса силовых кабельных линий. Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2012. № 1 (8). С.27-33
4. М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков. Разработка метода прогнозирования процесса старения изоляции на основе термофлуктуационной теории частичных разрядов. Инженерный вестник Дона, №3 (2017).



5. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Буланович Д.И. Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях. В сборнике: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XI всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 164-167
6. Dubyago M.N., Poluyanovich I.A., Poluyanovich N.K. Thermodynamic approach for identifying oxidative processes insulation breakdown. Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 752-753. С. 1153-1157.
7. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. В сборнике: Advances in energy, environment and chemical engineering (AEECE 2015) 2015. С. 49-54
8. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследования изоляции кабельных линий. Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7 (132). С. 200-205.
9. 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. Т. 4. №1. С. 23-32.
10. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Буланович Д.И. Прогнозирование состояния изоляции и выявление дефектов в кабельных линиях. В сборнике: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы XI всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 164-167
11. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н., Щуровский В.А. Методы испытания силового электрооборудования. / Южный Федеральный Университет, Инженерно-технологическая академия, Институт радиотехнических систем и управления, Кафедра электротехники и мехатроники. Таганрог, 2016.

© А..А. Гираев, М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович 2019