



УДК 520.192.4

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ 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). Разработанное программное обеспечение основано на математической модели температурного поля в сечении кабеля, отличающееся возможностью послойного контроля термофлуктуационных процессов кабеля. Проведен анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температур, при различных нагрузочных режимах кабеля.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMALFLUCTUATION
CHARACTERISTICS OF INSULATION MATERIALS OF POWER CABLES**

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

Southern Federal University (SFU), Taganrog

This article, the studies of thermal fluctuation processes in insulation materials in accordance with the theory of thermal conductivity for solving the problems of diagnosis and prediction of residual life of insulation materials based on the digital recorder, as well as non-destructive temperature method. The analytical dependence of determining the temperature of the most heated insulation point (cable core) taking into account the temperature of the cable surface, the environment and the current of the power cable line core (PCL) is clarified. The developed software is based on a mathematical model of the temperature field in the cable section, characterized by the possibility of layer-by-layer control of thermal fluctuation processes of the cable. The analysis of experimental and calculated characteristics of temperature distributions under different load conditions of the cable is carried out.

Введение и постановка задачи. В настоящее время активно внедряется технология измерения распределённой температуры кабеля, направленная на решение этих проблем и позволяющая контролировать температуру поверхности кабеля в режиме реального времени по всей длине СКЛ [1-3]. Низкая теплопроводность изоляции кабеля приводит к высокому температурному градиенту, поэтому температура наиболее нагретого участка в сечении кабеля (вблизи жилы) значительно отличается от измеренной температуры. Поэтому актуальна задача создания математических моделей и алгоритмов для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода [3-6]. Задачами непрерывного мониторинга теплового режима СКЛ являются [7,8]:

- определение температуры кабеля по времени и месту вдоль трассы СКЛ;
- своевременное предотвращение токовых перегрузок СКЛ;



- прогнозирование допустимой нагрузки при достижении кабелем максимальной рабочей температуры;
- создание оптимальных токовых нагрузок СКЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий.

Послойная модель распределения температур кабеля. Математическая модель (1) [9], позволяющая рассчитать распределение температуры по слоям (рис. 1) и выведена формула, позволяющая определять θ° в жиле.

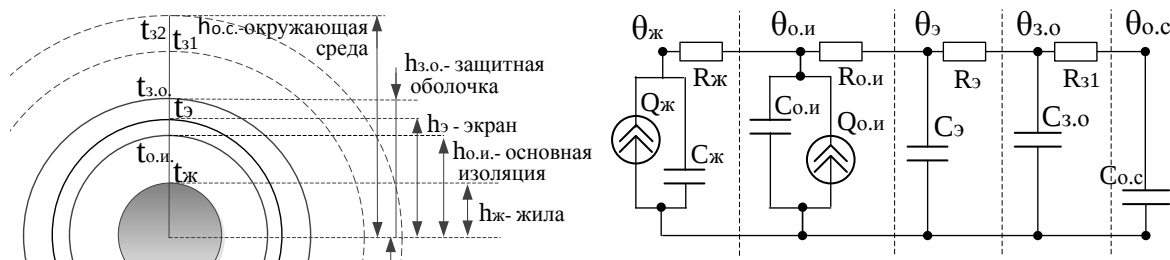


Рис. 1. Сечение кабеля и его тепловая схема замещения

Профиль температур в сечении силового кабеля АПв Пу г-1х30/25-10 определяется системой уравнений, в соответствии с теорией теплопроводности, рис. 2, где $I_ж$, $I_э$ – токи в жиле и экране; γ – коэффициент теплопроводности; $j_ж = I_ж/S_ж$; $j_э = I_э/S_э$; $S_ж$, $S_э$ – площади поперечного сечения жилы и экрана; $\gamma_ж$, $\gamma_э$ – электропроводности жилы и экран.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{о.с} + \left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э} \right) / 2\pi r \gamma, (h = h_{о.с.}) \\ \theta(h_{о.с.}) + \ln\left(\frac{r_{о.с.}}{h}\right) \left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э} \right) / 2\pi \lambda_{о.с.}, (h_{з.о.} \leq h \leq h_{о.с.}) \\ \theta(h_{з.о.}) + \ln\left(\frac{r_{з.о.}}{h}\right) \left(\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} + \frac{I_э^2}{\gamma_э S_э} \right) / 2\pi \lambda_{о.и.}, (h_э \leq h \leq h_{з.о.}) \\ \theta(h_э) + \ln\left(\frac{h_э}{h}\right) \frac{\frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} - \frac{j_э^2}{\gamma_э} h_{о.и.}^2 \pi}{2\pi \lambda_э} + \frac{I_э^2 (h_э^2 - h^2)}{4\lambda \gamma_э}, (h_{о.и.} \leq h \leq h_э) \\ \theta(h_{о.и.}) + \ln\left(\frac{h_{о.и.}}{h}\right) \frac{I_ж^2}{\gamma_ж S_ж} / 2\pi \lambda_{о.и.}, (h_ж \leq h \leq h_{о.и.}) \\ \theta(h_ж) + j_ж^2 (h_ж^2 - h^2) / 4\lambda_ж \gamma_ж, (0 \leq h \leq h_ж) \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с системой уравнений (1) в MatLab были построены профили температур в сечении кабеля и окружающей среды, рис. 2. 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%.

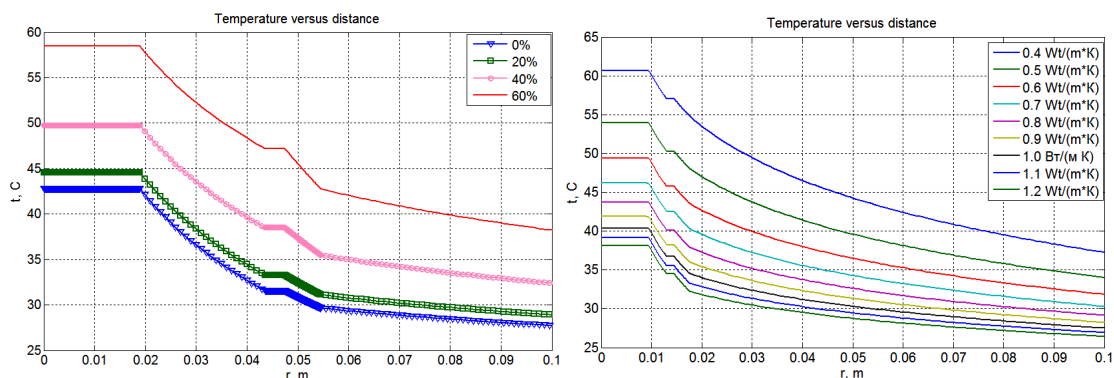


Рис. 2 - Графики распределение температуры в характерных точках сечения КЛ:
а – при различных процентах текущего экрана на токопроводе; б – при различных тепло-
проводностях грунта

Для силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена АПв Пу г-1х30/25-10 с параметрами кабеля: $d_1=0.019$ м; $d_2=0.026$ м; $d_3=0.029$ м; $d_4=0.035$ м.; удельной теплопроводности материалов: $\gamma_1=390 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\gamma_2=0.35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\gamma_3=390 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\gamma_4=0.12 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$; удельной теплоемкости материалов: $c_1=385 \frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; $c_2=2200 \frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; $c_3=385 \frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; $c_4=1470 \frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}$; плотности материалов: $\beta_1=8940 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\beta_2=920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\beta_3=8940 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\beta_4=1390 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, проведено моделирование.

Расчет температур жилы кабеля. В [10, с.526] предложена формула измерения температуры жилы кабеля 6-35 кВ с бумажной изоляцией. 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):

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

где $\theta_{\text{ж}}$ – расчетная температура жилы кабеля, $^\circ\text{C}$; $\theta_{\text{з.о.}} = 23^\circ\text{C}$ – 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). 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 [11] 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°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 [12].

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. Титков, В. Кабельные линии 6–10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим / В. Титков, С. Дудкин // Новости электротехники. – 2012. – № 3.
3. 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.
4. 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
5. 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).
6. 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
7. 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.
8. 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
9. Баранов, В.М. Метод оценки ресурса силовых кабелей [Электронный ресурс] / Баранов В.М //Компания MBLabSoft: офиц. сайт. – Режим доступа: <http://energo.mblabsoft.com/articles/ResourceOfCables.pdf>. – (Дата обращения: 30.08.2016)



10. Макаров, Е.Ф. справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ[Текст] / Е.Ф. Макаров // . – М.: Папирус ПРО, 2004. –Т.3. – 674 с.
11. 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.
12. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. [Текст] Часть 1-1 Уравнение для расчета номинальной токовой нагрузки (100% коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения [Текст]: ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Введ. 2010-01-01. – М.: Стандартиформ, 2009. – I, 28 с.
13. 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.
14. 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
15. 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.