

УДК 621.315

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, М. Н. НОВИКОВ,  
Н. М. ХОДАНОВИЧ, А. Ю. ШУТОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Аналитический обзор публикаций и постановка задачи**

Основным нормативным документом, устанавливающим расчет тепловых процессов в силовых кабелях, является МЭК 60287. Его идентичные варианты имеются в российских ГОСТ [1]–[5].

ГОСТ 60287-1-1 [1] рассматривает методику расчета номинальной токовой нагрузки силового кабеля исходя из допустимой температуры жилы. При этом рекомендуется учитывать изменение теплового сопротивления окружающей среды из-за высыхания почвы и прямого солнечного излучения, действующего на кабель. В ГОСТ 60287-1-2 [2] рассматривается влияние вихревых токов в металлической оболочке кабеля на основе эмпирических формул, в которых используется набор табличных коэффициентов с возможностью их интерполяции. В ГОСТ 60287-1-3 [3] предлагается методика расчета потерь в металлических оболочках кабелей, обусловленных циркулирующими в этих оболочках токами, на основе матричных методов. В ГОСТ 60287-2-1 [4] рассматривается методика расчета тепловых сопротивлений с учетом формы жил кабеля и видов его изоляции. В ГОСТ 60287-2-2 [5] приводится методика корректировки соотношений из ГОСТ 60287-2-1 с учетом влияния соседних кабелей. Большинство формул имеют эмпирический характер.

Номенклатура русскоязычных публикаций, где излагаются методики теплового расчета кабельных линий, крайне малочисленна. Среди учебной литературы основной интерес представляет учебник для вузов [6]. По рассматриваемой тематике в нем достаточно подробно описан расчет стационарных тепловых процессов в кабеле, а также рассматриваются простейшие тепловые схемы замещения силового кабеля и краткие рекомендации по их расчету.

Среди русскоязычных научных публикаций авторам данной статьи удалось найти только несколько публикаций [7]–[9].

Количество зарубежных публикаций достаточно велико, но доступ к их полнотекстовым вариантам не всегда возможен. Основные публикации, которые удалось получить авторам статьи, – это [10]–[12].

В [7] проводится анализ зависимостей удельного теплового сопротивления и удельной теплоемкости от температуры для сшитого полиэтилена. Утверждается, что эта зависимость существенна и обязательно должна быть учтена в расчетах тепловых процессов кабелей. Приводятся экспериментальные графики этих зависимостей, а также аппроксимирующие соотношения.

В [8] рассматривается система квазилинейных дифференциальных уравнений параболического типа, описывающая тепловые процессы в одножильном одиночном кабеле, проложенном в воздухе, и соответствующие краевые условия. Дано решение

этой системы с подстановкой аппроксимирующих зависимостей из [7]. Приводятся также экспериментальные и теоретические диаграммы нестационарных тепловых процессов для кабеля АПвП, показывающие достаточную адекватность методики.

В [9] рассматривается методика расчета тепловых полей силового кабеля на основе решения связанной задачи электродинамики и теплопередачи для кабелей из сшитого полиэтилена с помощью уравнения плоскопараллельного квазистационарного поля. Даны расчетные картины тепловых полей с учетом токов в экране кабеля.

Работа [10] является одной из первых, где подробно дан расчет стационарных тепловых процессов в кабелях. Приведенные в данной работе соотношения показывают, что рассмотренные выше стандарты МЭК созданы на их основе.

В [11] приводится методика расчета потерь в жилах и экране кабеля с учетом способов заземления экрана, которую затем предлагается использовать при анализе тепловых режимов кабеля.

В [12] рассматривается методика расчета тепловых сопротивлений для кабелей, проложенных под землей. Приведенные соотношения практически полностью совпадают с рекомендуемыми МЭК.

Обобщая анализ вышеприведенных источников литературы, можно классифицировать существующие методики по расчету тепловых процессов в силовых кабелях. Будем различать методики по расчету стационарных и нестационарных тепловых процессов в кабеле, методики без возможности анализа тепловых полей и с возможностью анализа тепловых полей, методики на основе эмпирических зависимостей и на основе дифференциальных уравнений.

Значительная часть публикаций по исследуемой тематике посвящена расчету стационарных тепловых процессов в кабеле, а МЭК и ГОСТ рассматривают только эти процессы. Нестационарные режимы освещены в литературе достаточно слабо. Это связано прежде всего со сложностью получения достаточно адекватных соотношений и алгоритмов на их основе.

подавляющее большинство существующих методик расчета базируется на эмпирических зависимостях и коэффициентах, что ограничивает их применимость диапазоном воздействующих факторов и условиями окружающей среды. Даже в случае сложной системы дифференциальных уравнений уйти от эмпирических коэффициентов очень сложно. Главная причина такой ситуации – многофакторность задачи.

С точки зрения теплотехники силовой кабель не является сложной системой, однако факторы окружающей среды и электромагнитные процессы усложняют задачу анализа тепловых режимов на несколько порядков. Способ прокладки кабеля, изменение параметров почвы, способы заземления экранов, взаимоиנדукция между жилами, краевой и поверхностный эффекты, электрические параметры изоляции – это и многое другое влияет на тепловые процессы в кабеле. Стремление существующих методик расчета учесть все эти факторы приводит к значительному усложнению алгоритмов и снижению гарантии их адекватности при изменении внешних условий.

Таким образом, существует необходимость разработки более совершенной методики анализа тепловых режимов силовых кабелей, максимально инвариантной к внешним условиям. Поставим задачу разработать математическую модель тепловых процессов силового кабеля, не использующую эмпирические коэффициенты и зависимости, но позволяющую вести расчет температуры наиболее нагретой точки изоляции кабеля с достаточной точностью. Эту задачу невозможно рассмотреть в рамках одной статьи. Вводная часть по решению рассматриваемой проблемы приведена в [13], а данная статья является следующим этапом, но далеко не окончательным.

### Уточнение базовой математической модели тепловых процессов одножильного кабеля

Воспользуемся базовой математической моделью тепловых процессов силового кабеля, проложенного в воздухе [13]. В этой модели кабель рассматривается как система однородных тел, что позволяет существенно упростить расчет. Однако данная модель не учитывает ряд важных факторов, влияющих на нагрев кабеля – диэлектрические потери в изоляции, поверхностный эффект в жилах, потери в экране, способ заземления экрана кабеля.

Запишем систему дифференциальных уравнений для тепловых процессов одножильного кабеля по аналогии с [13], но учитывающую указанные факторы:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = P_4, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\theta_1 - \theta_5$  – соответственно температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, экрана, защитной оболочки и окружающей среды, °С;  $C_1 - C_4$  – теплоемкости соответствующих однородных тел,  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{С}}$ ;  $R_1 - R_4$  – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел,  $\frac{^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$ ;  $P_1 - P_4$  – потери активной мощности, соответственно, в токоведущей жиле, изоляции жилы, экране и защитной оболочке, Вт.

Отметим, что  $\theta_2$  является температурой наиболее нагретой точки изоляции кабеля.

Диэлектрические потери  $P_2$  и  $P_4$  можно рассчитать по известной формуле:

$$P_i = 2 \cdot \pi \cdot U_i^2 \cdot f \cdot C_i \cdot \text{tg} \delta_i, \quad (2)$$

где  $i = \{2; 4\}$ ;  $U_i$  – напряжение, приложенное к изоляции;  $f$  – рабочая частота;  $C_i$  – емкость изоляции;  $\text{tg} \delta_i$  – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

Очевидно, что значение напряжения  $U_i$  зависит от способа заземления экрана кабеля. Если экран заземлен с двух сторон, то падение напряжения на защитной оболочке приблизительно равно нулю [14], а к изоляции жилы приложено фазное напряжение  $U_\phi$ . Если экран заземлен с одной стороны, то на противоположной стороне кабеля на экране наводится напряжение, значение которого зависит от тока жилы и других параметров [14]. В общем случае можно записать:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{U}_\phi - \dot{U}_3; \\ \dot{U}_4 = \dot{U}_3, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\dot{U}_3$  – комплексное значение напряжения на экране кабеля относительно земли.

Емкость изоляции можно рассчитать по формуле для цилиндрического конденсатора [15, с. 377]:

$$C_i = \frac{\pi \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln \left( \frac{r_{\text{внешн } i}}{r_{\text{внутр } i}} \right)}, \quad (4)$$

где  $r_{\text{внешн } i}$ ,  $r_{\text{внутр } i}$  – соответственно внешний и внутренний радиусы изоляции;  $\varepsilon_i$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала изоляции;  $l$  – длина кабеля.

Потери мощности в экране  $P_3$  также зависят от способа заземления экрана кабеля. Если экран заземлен с двух сторон, то по нему протекает значительный ток, сравнимый с током в жиле [14]. Если экран заземлен с одной стороны, то ток через него приблизительно равен нулю [14]. Зная действующее значение тока в экране  $I_3$ , по аналогии с потерями в жиле [13] можно рассчитать потери мощности в экране:

$$\begin{aligned} P_3 &= I_3^2 \cdot R_{\text{эл3}} = I_3^2 \cdot \rho_3 \frac{l}{S_3} = \\ &= I_3^2 \cdot \rho_{20} (1 + \alpha_3 (\theta_3 - 20)) \frac{l}{\pi \cdot \left( (r_{\text{внешн } 3})^2 - (r_{\text{внутр } 3})^2 \right)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $R_{\text{эл3}}$  – электрическое сопротивление экрана;  $\rho_3$  – удельное электрическое сопротивление экрана;  $S_3$  – общая площадь сечения экрана;  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление экрана при температуре 20 °С;  $\alpha_3$  – ТКС материала экрана;  $r_{\text{внешн } 3}$ ,  $r_{\text{внутр } 3}$  – соответственно внешний и внутренний радиусы экрана;  $l$  – длина кабеля.

Поверхностный эффект (скин-эффект) проявляется в увеличении электрического сопротивления проводника на переменном токе  $R_{\omega}$  по сравнению с сопротивлением на постоянном токе  $R_0$ . Приближенные формулы, описывающие этот эффект в однородных цилиндрических проводниках, записываются в виде [4, с. 484]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{R_{\omega}}{R_0} &= 1 + \frac{k^4}{3} && \text{при } k < 1; \\ \frac{R_{\omega}}{R_0} &= 0,997 \cdot k + 0,277 && \text{при } 1 < k < 10; \\ \frac{R_{\omega}}{R_0} &= k + \frac{1}{4} + \frac{3}{64 \cdot k} && \text{при } k > 10; \\ k &= \frac{r_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot \omega}}{4}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $r_1$  – радиус проводника, т. е. радиус жилы кабеля;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала жилы;  $\gamma$  – удельная электропроводность материала жилы.

Тогда формулу для расчета потерь в жиле кабеля можно записать следующим образом:

$$P_1 = I_1^2 \frac{R_\omega}{R_0} \rho_{20} (1 + \alpha_1 (\theta_1 - 20)) \frac{l}{\pi \cdot r_1^2}, \quad (7)$$

где  $I_1$  – ток, протекающий по жиле кабеля, А;  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление материала жилы кабеля постоянному току при температуре жилы кабеля  $\theta_1 = 20$  °С, Ом·м;  $\alpha_1$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала жилы кабеля,  $\frac{1}{\text{°C}}$ ;  $l$  – длина кабеля.

Теплоемкости и тепловые сопротивления в системе (1) рассчитываются по формулам, приведенным в [13].

Используя соотношения (2)–(7), а также соотношения, приведенные в [13], можно составить алгоритм для численного решения системы (1).

### Расчет температур элементов кабеля методом Рунге–Кутты

Воспользуемся одним из самых распространенных численных методов решения систем дифференциальных уравнений – методом Рунге–Кутты [16, с. 390]. Этот метод характеризуется высокой скоростью сходимости и простотой расчетов.

Представим систему (1) в форме Коши:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i}, \quad (8)$$

где  $i \in [1, 4]$  – номер расчетной температуры;  $R_0 = \infty$ .

Тогда для метода Рунге–Кутты четвертого порядка рекуррентный алгоритм можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} K_{i,1}^j = \Delta t \left( \frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} \right); \\ K_{i,2}^j = \Delta t \left( \frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + \frac{K_{i,1}^j}{2} \right); \\ K_{i,3}^j = \Delta t \left( \frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + \frac{K_{i,2}^j}{2} \right); \\ K_{i,4}^j = \Delta t \left( \frac{P_i}{C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{R_{i-1} \cdot C_i} - \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{R_i \cdot C_i} + K_{i,3}^j \right); \\ \theta_i^j = \theta_i^{j-1} + \frac{1}{6} (K_{i,1}^j + 2 \cdot K_{i,2}^j + 2 \cdot K_{i,3}^j + K_{i,4}^j), \end{cases} \quad (9)$$

где  $i \in [1, 4]$  – номер расчетной температуры;  $R_0 = \infty$ ;  $j \in [1, n]$  – номер итерации ( $n$  – количество итераций);  $\Delta t$  – шаг итерации по времени.

Сформулируем требования к максимальному значению шага итерации  $\Delta t$ . Для этого запишем систему (8) в матричной форме:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\theta} + \mathbf{f}, \quad (10)$$

где  $\boldsymbol{\theta}$  и  $\mathbf{f}$  – матрицы-столбцы;  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица коэффициентов.

В соответствии с [16, с. 397] для уравнений с достаточно большими отрицательными собственными значениями матрицы **A** накладывается следующее ограничение на шаг итерации по времени:

$$\Delta t < \frac{1}{|\lambda_{\max}|}, \quad (11)$$

где  $|\lambda_{\max}|$  – модуль максимального значения среди коэффициентов матрицы **A** в выражении (10).

Тогда, выбрав запас 10 %, в соответствии с (8) и (11) для максимального шага итерации можно записать:

$$\Delta t_{\max} = 0,9 R_k \cdot C_i, \quad (12)$$

где  $k \in \{i-1, i\}$ .

Если шаг итерации выходит за ограничение (12), то итерационный процесс теряет устойчивость. Такие уравнения называются «жесткими» [16, с. 397]. Для характеристики этих уравнений относительно жесткости рассчитывают коэффициент жесткости [16, с. 399]:

$$S = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}. \quad (13)$$

Если  $S > 10$ , то система считается жесткой и для нее справедливо ограничение (11).

**Экспериментальные исследования тепловых процессов в силовом кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена**

Для проверки адекватности полученных расчетных соотношений на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого был поставлен эксперимент с нагреванием и охлаждением образца кабеля N2XSY-120. Это одножильный кабель с основной изоляцией из сшитого полиэтилена, защитной оболочкой из ПВХ – пластиката, медной жилой и медным экраном. Длина образца составляла 28 см. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

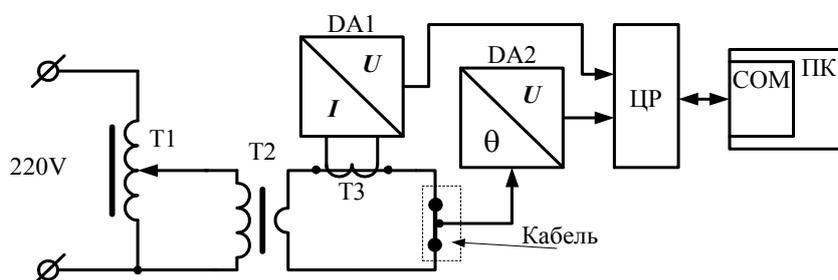


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки

Напряжение с ЛАТРа Т1 подавалось на трансформатор Т2, в магнитопроводе которого имелось свободное окно. Через это окно был проведен один виток провода с подключенным исследуемым образцом кабеля. В изоляции кабеля было просверлено отверстие диаметром 4 мм до жилы, куда разместили полупроводниковый предварительно отградуированный датчик температуры диаметром 2 мм. Затем отверстие было законопачено высверленным материалом. Обеспечение надежного контакта дат-

чика и жилы кабеля подтверждалось с помощью омметра благодаря проводящей поверхности датчика, с которой непосредственно контактировал один из его выводов. Торцы кабеля были теплоизолированы тканью.

Измерение мгновенных значений тока, протекающего по кабелю, осуществлялось с помощью измерительного трансформатора тока ТЗ и измерительного преобразователя ток – напряжение DA1. Измерение мгновенных значений температуры жилы кабеля осуществлялось с помощью измерительного преобразователя температура – напряжение DA2. Оба измерительных преобразователя были подключены к цифровому регистратору ЦР, который, в свою очередь, посредством интерфейса RS232 передавал данные в персональный компьютер ПК. Программное обеспечение ПК осуществляло расчет действующих значений тока и значений температуры жилы кабеля с интервалом времени приблизительно 3 с.

Измерения температуры окружающего воздуха проводились вручную с помощью ртутного термометра.

Фотография исследуемого кабеля в экспериментальной установке приведена на рис. 2.

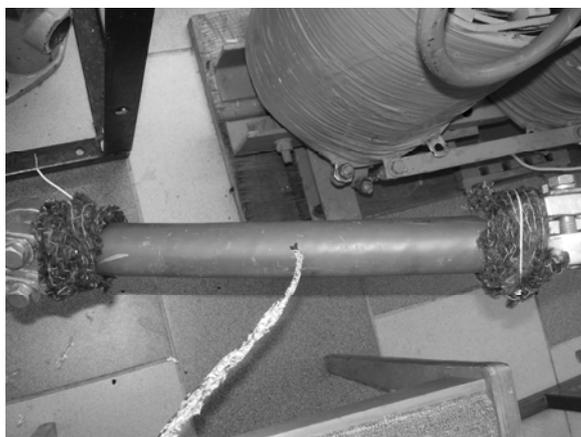


Рис. 2. Фотография исследуемого кабеля

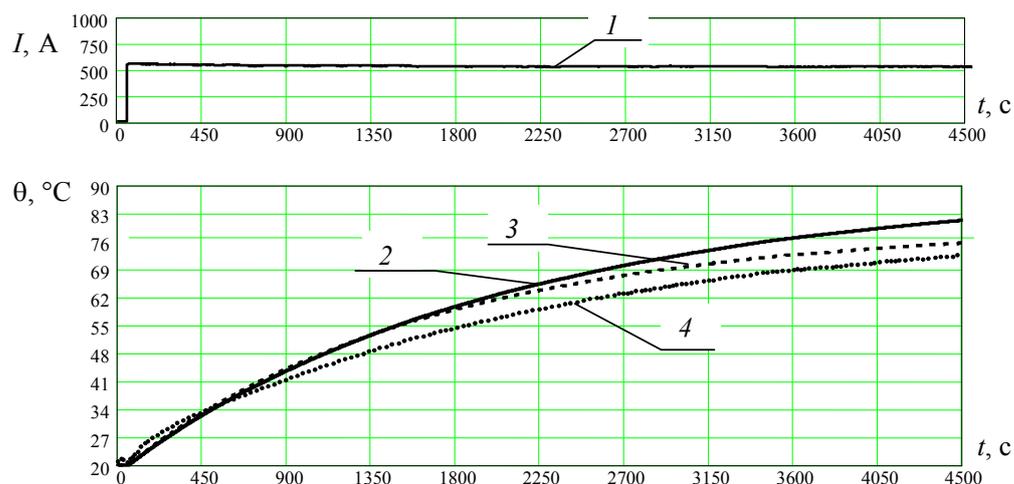


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические диаграммы: 1 – экспериментальная диаграмма тока в кабеле; 2 – расчетная диаграмма процесса нагрева кабеля без учета влияния теплообмена через торцы; 3 – расчетная диаграмма процесса нагрева кабеля с учетом влияния теплообмена через торцы; 4 – экспериментальная диаграмма процесса нагрева кабеля

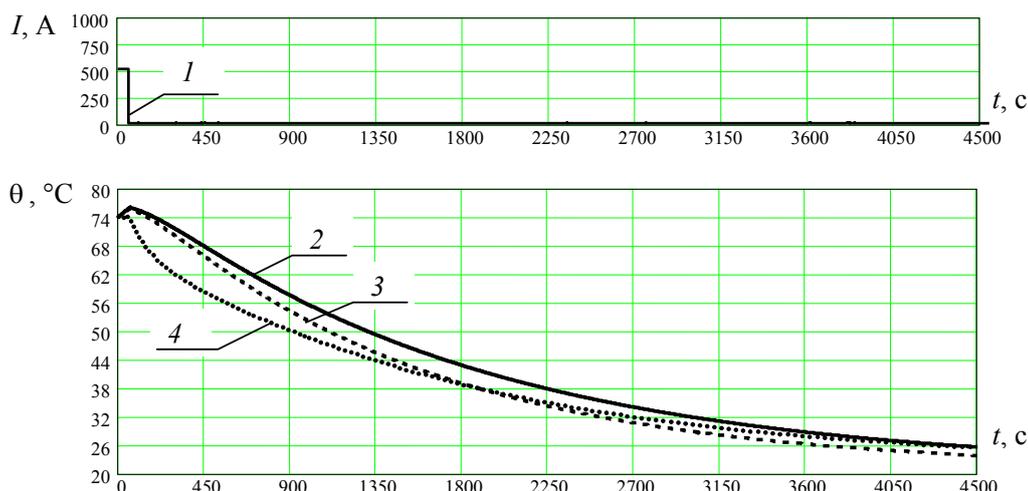


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические диаграммы: 1 – экспериментальная диаграмма тока в кабеле; 2 – расчетная диаграмма процесса охлаждения кабеля без учета влияния теплообмена через торцы; 3 – расчетная диаграмма процесса охлаждения кабеля с учетом влияния теплообмена через торцы; 4 – экспериментальная диаграмма процесса охлаждения кабеля

Диаграммы действующих значений тока в кабеле (кривые 1), а также экспериментальные и теоретические зависимости процесса нагрева кабеля приведены на рис. 3, а процесса охлаждения – на рис. 4 (кривые 2, 3, 4). Теоретические зависимости без учета влияния теплообмена через торцы кабеля (кривые 2) получены на основе соотношений (2)–(9).

Из диаграмм видно, что имеет место значительное расхождение экспериментальных и расчетных кривых температуры. Причиной этому могут быть два фактора: недостаточно высокая адекватность предлагаемой математической модели и влияние теплообмена через торцы исследуемого кабеля, что в исходной модели не учитывалось. Дело в том, что в проведенном эксперименте ткань теплоизолировала только торцы изоляции, а торцы жилы имели теплообмен с алюминиевыми держателями. Из-за малой длины образца этот теплообмен оказал влияние на результат.

Для учета влияния теплообмена через торцы было введено дополнительное однородное тело – алюминиевые держатели, которые при расчете были представлены в виде цилиндров. При этом система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_1 - \theta_5}{R_5} = P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = P_2; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = P_3; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_6}{R_4} = P_4; \\ C_5 \frac{d\theta_5}{dt} + \frac{\theta_5 - \theta_1}{R_5} + \frac{\theta_5 - \theta_6}{R_6} = P_5, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\theta_5$ ,  $\theta_6$  – соответственно температуры алюминиевых держателей и температуры воздуха;  $R_5$  – тепловое сопротивление вдоль жилы кабеля;  $R_6$  – тепловое сопротивление держателей;  $C_5$  – теплоемкость держателей;  $P_5$  – потери мощности в держателях.

В результате решения системы (14) методом Рунге–Кутты были получены кривые 3, приведенные на рис. 3 и 4. Из диаграмм видно, что учет влияния теплообмена через торцы кабеля позволил несколько снизить погрешность моделирования в установившемся режиме.

Приведенные диаграммы свидетельствуют о явной корреляции экспериментальных и расчетных кривых температуры, что говорит о верном направлении при выборе базовой математической модели.

Очевидно, что рассмотренные экспериментальные и теоретические исследования нуждаются в продолжении. Для правильной постановки эксперимента необходим достаточно длинный образец кабеля (длиной не менее 50 внешних диаметров). Таких образцов на кафедре пока нет и достать их очень проблематично в силу высокой стоимости современных силовых кабелей. Однако авторы надеются, что эти проблемы будут решены.

Предлагаемая методика расчета может быть применена для кабелей с произвольным количеством жил путем увеличения количества уравнений в системе (8). Пример для трехжильного кабеля приведен в [13]. При этом в [13] рассмотрена методика приведения трехжильного кабеля к эквивалентному одножильному и решению системы дифференциальных уравнений аналитически операторным методом. Такой подход позволяет минимизировать объем вычислений для компьютера, но предполагает равенство токов всех жил кабеля, что не всегда соответствует реальным условиям. Методика численного расчета позволяет оперировать дифференциальными уравнениями напрямую, не снижая их количества, однако при этом существенно возрастает объем вычислений в силу жесткости системы уравнений. Так, для расчета зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, в пакете MathCad на компьютере с процессором Duron 1,3 ГГц время расчета составило порядка одной минуты. Очевидно, что для расчета суточного графика температуры потребуется значительное время даже для современных компьютеров, не говоря о расчете на более длительные интервалы времени. Чтобы снизить объем вычислений для жестких систем, применяют неявные методы Рунге–Кутты [17], однако существенного выигрыша они не дают.

### Заключение

Авторы данной статьи полагают, что увеличение точности при расчете температуры наиболее нагретой точки кабеля можно достичь, используя элемент адаптации, самонастройки при математическом моделировании тепловых процессов в кабеле. Математическая модель должна самостоятельно подстраивать свои параметры под особенности работы кабеля в течение некоторого времени адаптации, а затем переходить в режим контроля. Это, а также экспериментальные исследования и будут предметом для дальнейших исследований авторов.

### Литература

1. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 28 с.
2. ГОСТ Р МЭК 60287-1-2. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-2. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Коэффициенты потерь, обусловленных вихревыми токами в оболочке, для

- двух цепей, расположенных в одной плоскости. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 23 с.
3. ГОСТ Р МЭК 60287-1-3. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 1-3. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки и расчет потерь. Распределение тока между одножильными кабелями, расположенными параллельно, и расчет потерь, обусловленных циркулирующими токами. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 20 с.
  4. ГОСТ Р МЭК 60287-2-1. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 2-1. Тепловое сопротивление. Расчет теплового сопротивления. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 19 с.
  5. ГОСТ Р МЭК 60287-2-2. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 2-2. Тепловое сопротивление. Метод расчета коэффициентов снижения максимально допустимой токовой нагрузки для групп кабелей, проложенных на воздухе и защищенных от прямого солнечного излучения. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 12 с.
  6. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учеб. для вузов / Э. Т. Ларина. – Москва : Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
  7. Расчет допустимых нагрузок одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией / Э. Т. Ларина [и др.] // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 28–31.
  8. Расчет переходных тепловых режимов одножильного силового кабеля с пластмассовой изоляцией, проложенного в воздухе / Э. Т. Ларина [и др.] // Электротехника. – 1991. – № 10. – С. 39–42.
  9. Титков, В. В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля / В. В. Титков // Кабель-news. – 2009. – № 10. – С. 47–51.
  10. Neher, J. M. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems / J. M. Neher, M. H. McGrath / Philadelphia electric company. – October. – 1957. – P. 752–763.
  11. Sarajcev, I. Calculation of losses in electric power cable as the base for cable temperature analysis / I. Sarajcev, M. Majstrovic: eihp.hr.
  12. Leon, F. Calculation of underground cable ampacity / F. Leon // CYME international T&D Inc, 2005.
  13. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией / Д. И. Зализный [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 3. – С. 65–75.
  14. Дмитриев, М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // RusCable.Ru. – № ФС77-28661.
  15. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – Москва : Изд-во Оникс, 2008. – 1056 с.
  16. Боглаев, Ю. П. Вычислительная математика и программирование : учеб. пособие для студентов вузов / Ю. П. Боглаев. – Москва : Высш. шк., 1990. – 544 с.
  17. Иванов, В. В. Методы вычислений на ЭВМ : справ. пособие / В. В. Иванов. – Киев : Наук. думка, 1986. – 584 с.

Получено 11.06.2010 г.