УДК 621.315.21

Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени

В.Д. Лебедев, Е.С. Зайцев
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: evgeniy1589@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время в высоковольтных кабельных линиях 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена для мониторинга состояния кабелей внедряют систему измерения распределенной температуры экранов в режиме реального времени. Это открывает возможность контролировать пропускную способность высоковольтных кабельных линий, но при этом необходим расчет температур жил кабелей. В существующей литературе в качестве расчетной методики указывается стандарт IEC 60853-2, но он предназначен для проектных расчетов температуры жилы, когда кабель еще не введен в эксплуатацию. Существующие литературные источники не содержат сведений о применении указанной методики для расчета температуры жилы в режиме реального времени. В связи с этим разработка математического алгоритма для расчета температуры жилы однофазного кабеля в режиме реального времени является актуальной задачей.

Материалы и методы: Математическое моделирование нестационарного теплового поля в сечении кабеля выполнено с помощью метода сосредоточенных теплоемкостей. Тепловая схема замещения построена на основе метода Ван-Вормера. Оценка адекватности полученных алгоритмов выполнена путем сравнения расчетных данных с данными эксперимента по нагреву осесимметричной конструкции, аналогичной однофазному кабелю.

Результаты: Получен математический алгоритм для расчета температуры жилы высоковольтного однофазного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени на основе данных о распределенной температуре экрана и токовой нагрузке в жиле. Установлено совпадение результатов расчета нагрева экспериментальной осесимметричной конструкции, аналогичной однофазному кабелю, с экспериментальными данными, при этом отклонения значений рассчитанной температуры от температуры, полученной экспериментальным путем, не превышают 2,5 °С.

Выводы: Полученный математический алгоритм может быть использован в системах диагностики высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена для контроля их пропускной способности и защиты от перегрева в режиме реального времени.

Ключевые слова: высоковольтная кабельная линия, однофазный кабель, пропускная способность, распределенная температура, тепловая схема замещения, теплоемкость, тепловое сопротивление, коэффициент Ван-Вормера, нестационарное тепловое поле, дискретная модель.

Calculation of core temperature of single-phase high-voltage cables with XLPE insulation in real time

V.D. Lebedev, E.S. Zaytsev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: evgeniy1589@mail.ru

Abstract

Background: Currently, a distributed screen temperature monitoring system is being implemented in 110–500 kV high-voltage cable lines (HVCL) with XLPE insulation for monitoring of their condition. This makes it possible to control the capacity of HVCL, but then the calculation of the cable core temperature is necessary. The standard IEC 60853-2 is specified in the existing literature as a calculation method. But it is intended for design calculations of conductor temperature when the cable is still out of operation. The authors have not found in the existing literature how the method outlined in IEC 60853-2 is used to calculate the core temperature in real time. Therefore, it is now urgent to develop a mathematical algorithm for the calculation of single-phase cable core temperature in real-time.

Materials and methods: The mathematical modeling of temperature transients in cable cross section is carried out by the method of lumped heat capacities. The thermal equivalent circuit is based on the method of Van Wormer. The adequacy of the obtained algorithms is assessed by comparing the calculated data with the experimental data obtained by heating an axisymmetric structure similar to the single-phase cable.

Results: A mathematical algorithm has been developed to calculate core temperature of high-voltage single-phase cable with XLPE insulation in real time on the basis of distributed screen temperature data and current load in the core. The calculation results of the experimental structure heating coincide with the experimental data. The deviations of the calculated temperature values from the temperature obtained experimentally do not exceed 2,5 °C.

Conclusions: The resulting mathematical algorithm can be used in diagnostic systems of high voltage cable lines with XLPE insulation to control their capacity and to protect them from overheating in real time.

Key words: high-voltage cable line, single-phase cable, capacity, distributed temperature, thermal equivalent circuit, heat capacity, thermal resistance, Van Wormer coefficient, temperature transient, discrete model.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.011-016

Введение. В разделе 2.1.2 Положения ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе¹ указано, что при планировании схемы развития Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) должны предусматриваться системы мониторинга (автоматической диагностики) допустимой загрузки оборудования и ЛЭП в режиме реального времени.

В высоковольтных кабельных линиях (ВКЛ) магистральных электрических сетей задачу мониторинга допустимой загрузки (пропускной способности) решают с помощью аппаратных средств мониторинга распределенной температуры поверхности кабеля либо его экрана [1–4], расположенного также вблизи поверхности кабеля. Следует отметить, что измеренная температура экрана кабеля, а также его поверхности может существенно отличаться от температуры жилы. При этом известно, что пропускная способность высоковольтных кабелей определяется температурой жилы в длительном рабочем режиме. Поэтому необходимо решать задачу расчета температуры жилы в режиме реального времени. В литературе [1–4] в качестве расчетной методики указывается стандарт IEC 60853-2², который предназначен для проектных расчетов температуры жилы, когда кабель еще не введен в эксплуатацию. Подробный анализ литературных источников, в том числе и [1–4, 5–7], не позволил выявить методики, применяемые для расчета температуры жилы в режиме реального времени в системах мониторинга.

Наиболее точно задачу определения температуры жилы можно решить с помощью метода конечно-элементного моделирования. Но ввиду того, что расчет следует производить для множества сечений кабеля, потребуется слишком много вычислительных ресурсов ЭВМ. Ниже предлагается решение задачи по расчету температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля в режиме реального времени на основе данных о распределенной температуре в экране и токовой нагрузке жилы кабеля с учетом указанной выше методики³.

Разработка математической модели и алгоритма расчета. На рис. 1 представлено поперечное сечение однофазного коаксиального кабеля типовой конструкции с одной металлической оболочкой (экраном).

Рис. 1. Поперечное сечение однофазного кабеля: 1 – жила; 2 – изоляция из сшитого полиэтилена; 3 – металлический экран; 4 – наружная оболочка

В IEC 60853-2⁴ температуру жилы однофазного кабеля в переходных режимах предлагают рассчитывать на основе электротепловой аналогии с помощью тепловой схемы замещения (рис. 2, где R_{tu} и R_{to} – тепловые сопротивления изоляции и наружной оболочки соответственно, аналогичные электрическим сопротивлениям, К·м/Вт; C_1 и C_2 – тепловые емкости, аналогичные электрическим емкостям, Дж/(м·К); $Q_{ж}$ и $Q_э$ – тепловыделения в жиле и экране соответственно (аналоги электрических источников тока), Вт/м; $T_{ж}$, $T_э$, $T_к$ – температуры в жиле, экране и на поверхности кабеля соответственно (аналоги электрических потенциалов узлов 1, 2 и 3), К).

Рис. 2. Тепловая схема замещения однофазного коаксиального кабеля

В случае если оптоволоконный датчик системы мониторинга распределенной температуры расположен в экране кабеля, то температура экрана $T_э$ известна в каждый момент времени. Поэтому для расчета температуры жилы в переходных режимах не требуются величины $Q_э$, C_2 и R_{to} .

Для повышения точности расчета разделим изоляцию на два слоя с равными тепловыми сопротивлениями. Исходя из условия равенства тепловых сопротивлений слоев изоляции, формула промежуточного радиуса r_{12} будет иметь вид

$$r_{12} = \sqrt{r_1 r_2}. \quad (1)$$

¹ Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. – М., 2013.

² IEC 60853-2. Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2 // Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages, IEC Std. 60853-2, 1989.

³ Там же.

⁴ Там же.

Тогда тепловое сопротивление одного слоя изоляции составит

$$\frac{R_{и1}}{2} = \frac{1}{2\pi\lambda_{и1}} \ln \frac{r_{12}}{r_1}, \quad (2)$$

где $\lambda_{и1}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К).

В этом случае расчетная тепловая схема замещения примет вид, представленный на рис. 3.

Величины C_1 и C_2 в ИЕС 60853-2⁵ определяют по методу Ван-Вормера [8]:

$$C_1 = C_{ж} + \rho_{и1} C_{и1}, \quad C_2 = (1 - \rho_{и1}) C_{и1} + \rho_{и2} C_{и2}, \quad (3)$$

где $C_{ж}$, $C_{и1}$, $C_{и2}$ – тепловые емкости жилы, первого слоя изоляции и второго слоя изоляции соответственно, Дж/(м·К); $\rho_{и1}$ – коэффициент Ван-Вормера для изоляции. Коэффициент Ван-Вормера определяют по формуле

$$\rho_{и1} = \frac{1}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} - \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}. \quad (4)$$

Рис. 3. Расчетная тепловая схема замещения

Формулы для тепловых емкостей $C_{ж}$, $C_{и1}$, $C_{и2}$ имеют вид

$$C_{ж} = c_{ж} \rho_{ж} \pi r_1^2, \quad C_{и1} = c_{и1} \rho_{и1} \pi (r_{12}^2 - r_1^2), \quad (5)$$

$$C_{и2} = c_{и2} \rho_{и2} \pi (r_2^2 - r_{12}^2).$$

Величину тепловыделения в жиле можно определить по закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{ж} = I_{ж}^2 R_{ж} (1 + \alpha_t (T_{ж} - 20)), \quad (6)$$

где $I_{ж}$ – действующее значение тока в жиле, А; $R_{ж}$ – активное сопротивление жилы переменному току на единицу длины кабеля при температуре 20 °С, Ом/м; α_t – температурный коэффициент сопротивления, 1/К.

Активное сопротивление жилы переменному току, в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60287-1-1⁶, можно определить по формуле

$$R_{ж} = R_{ж0} \left(1 + \frac{\left(\frac{8\pi f}{R_{ж0}} k_s \cdot 10^{-7} \right)^2}{192 + 0,8 \left(\frac{8\pi f}{R_{ж0}} k_s \cdot 10^{-7} \right)^2} \right), \quad (7)$$

где $R_{ж0}$ – активное сопротивление жилы постоянному току при температуре 20 °С, Ом/м; f – частота тока, Гц; k_s – коэффициент, определяемый конструкцией жилы.

Переходный процесс в полученной схеме поддается аналитическому описанию только в случае, когда температура в экране и действующее значение тока в жиле изменяются по известным законам. При решении задачи в режиме реального времени законы изменения тока в жиле и температуры в экране не известны, а их графики имеют сложную форму, поэтому расчет необходимо выполнять численным методом. В [9] описан подходящий способ расчета переходных процессов на основе дискретных моделей электрических цепей, построенных с помощью неявного метода интегрирования – метода трапеций. Воспользуемся им для расчета температуры жилы на основе тепловой схемы замещения, изображенной на рис. 3.

В соответствии с этим методом, исходную схему на каждом шаге интегрирования представляют схемой, содержащей только действующие в цепи источники, резистивные элементы и зависимые источники, заменяющие индуктивные и емкостные элементы. Таким образом, дискретная модель расчетной схемы замещения будет выглядеть так, как показано на рис. 4, при этом $R_{C1} = h/2C_1$, $R_{C2} = h/2C_2$, где h – шаг интегрирования по времени, с:

$$Q_{C1,k-1} = \frac{T_{ж,k-1}}{R_{C1}} + q_{C1,k-1}, \quad (8)$$

$$T_{C2,k-1} = T_{2,k-1} + q_{C2,k-1} R_{C2},$$

где $q_{C1,k-1}$ – тепловой поток в емкости C_1 на $k-1$ шаге интегрирования, Вт/м; $T_{2,k-1}$ – температура в узле 2 на $k-1$ шаге интегрирования (аналог электрического потенциала), °К.

Рис. 4. Дискретная модель расчетной схемы замещения

На основе полученной схемы температуру жилы на каждом шаге интегрирования можно рассчитать с помощью законов Кирхгофа и Ома. Данная схема составлена для одного поперечного сечения кабеля. Поскольку на разных участках ВКЛ величина температуры экрана T_3 разная, для расчета температуры жилы на всей длине кабельной линии (КЛ) с некоторым пространственным разрешением

⁵ ИЕС 60853-2.

⁶ ГОСТ Р МЭК 60287-1-1. Кабели электрические. Расчет номинального тока. Ч. 1-1. Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения. Введ. 2009 г.

требуется рассчитывать переходные процессы во множестве поперечных сечений. Пространственное разрешение (количество точек с известной температурой на единицу длины кабеля) зависит от системы мониторинга распределенной температуры и длины КЛ.

Запишем решение для множества i -х поперечных сечений кабеля ($i = 1, 2, \dots, n$).

Начальные условия на первом шаге интегрирования ($k = 1$) будут следующие:

$$\begin{aligned} T_{ж,1}^i &= T_{2,1}^i = T_{3,1}^i = T_3^i(0_+), \\ q_{C1,1}^i &= Q_{ж,1} = Q_{ж}(0_+), \quad q_{C2,1} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Значение температуры точки 2 на k -м шаге интегрирования для i -го сечения можно определить по методу двух узлов:

$$T_{2,k}^i = \frac{\frac{(Q_{ж,k}^i + Q_{C1,k-1}^i)R_{C1}}{R_{C1} + 0,5R_{ти}} + \frac{T_{C2,k-1}^i}{R_{C2}} + \frac{T_{3,k}^i}{0,5R_{м}}}{\frac{1}{R_{C1} + 0,5R_{м}} + \frac{1}{R_{C2}} + \frac{1}{0,5R_{м}}}, \quad (10)$$

где значения $Q_{C1,k-1}^i$, $T_{C2,k-1}^i$ на каждом шаге интегрирования и для каждого сечения нужно определять по формулам (8), а $Q_{ж,k}^i$ – по формуле (6).

Тогда формула для температуры жилы кабеля на k -м шаге интегрирования в i -м сечении будет иметь вид

$$T_{ж,k}^i = T_{2,k}^i - \frac{0,5R_{м}}{R_{C1} + 0,5R_{м}}(T_{2,k}^i - T_{1,k}^i). \quad (11)$$

Блок-схема математического алгоритма для численного расчета температурного профиля жилы в режиме реального времени представлена на рис. 5.

Рис. 5. Блок-схема математического алгоритма

Оценка адекватности математической модели и алгоритма на основе физического эксперимента. Выполнение эксперимента с реальным высоковольтным кабелем – весьма сложная задача, поэтому для оценки адекватности расчетных методик была создана экспериментальная конструкция, моделирующая осесимметричное нестационарное тепловое поле в твердой среде. Продольное и поперечное сечения конструкции представлены на рис. 6. В таблице приведены геометрические размеры элементов конструкции и физические характеристики их материалов.

Теплоемкость керамического резистора обладает зависимостью от температуры, аппроксимация которой в диапазоне температур 20–800 °С с точностью 2 % может быть выражена уравнением [10]

$$c_k(T) = 301(1 + 5,56 \cdot 10^{-3}T - 2,61 \cdot 10^{-6}T^2). \quad (12)$$

Нестационарное тепловое поле возникает в конструкции за счет протекания тока по резистивному делителю, состоящему из 15 резисторов, аналогично тепловыделению в жиле высоковольтного кабеля. При выполнении эксперимента величину тока меняли так, что мощность тепловых потерь в резисторах изменялась по ступенчатому графику, представленному на рис. 7 (кривая 1). Под действием этого тепловыделения происходил нагрев конструкции. Измерение температуры осуществляли с помощью специально вмонтированных в тело изолятора терморезисторов (минимальных размеров, выполненных по SMT-технологии). Измерение температуры выполняли по всему сечению моделируемого кабеля, в том числе и на поверхности тепловыделяющих резистивных элементов и поверхности физической модели кабеля (рис. 6). Графики изменения этих температур представлены на рис. 7 (кривые 2, 3).

Затем был произведен расчет изменения температуры на поверхности центрального резистора с помощью предложенного выше алгоритма с учетом (12). Вместо температуры экрана $T_{э,k}$ на каждом шаге интегрирования использовались значения температуры на внутренней поверхности стеклотекстолитовой трубы (рис. 7, график 2).

Отметим, что резистивные элементы делителя не представляют единую бесконечно длинную цилиндрическую поверхность. Однако, расстояния между резисторами значительно меньше диаметра кабеля, поэтому в расчетах было принято допущение об идеальной (бесконечной) тепловыделяющей поверхности эквивалентного резистивного элемента.

График температуры керамического резистора, рассчитанной по предложенному математическому алгоритму, представлен на рис. 7 (кривая 4). График абсолютной погрешности расчета для каждого момента времени,

представленный на рис. 8, демонстрирует высокое совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Анализ полученных данных показывает, что предложенный математический алгоритм

дает хороший результат, поскольку расчетная кривая практически повторяет экспериментальную, а расхождение рассчитанной и измеренной температуры не превышает 3°C, что является допустимым.

Рис. 6. Экспериментальная конструкция: 1 – керамический резистор; 2 – силиконовый герметик; 3 – стеклотекстолит; 4 – силиконовая резина; 5 – датчик температуры на поверхности резистора; 6 – датчик температуры на внутренней поверхности стеклотекстолита

Геометрические размеры и физические характеристики элементов конструкции

Элемент конструкции (рис. 7)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К) $c = f(T)$	Плотность, кг/м ³	Внешний радиус, м	Высота, м
1	38		1985	0,003933	0,0285 (1 шт.)
2	0,1611	1600	1220	0,055	0,64
3	0,3	995	1850	0,064	0,64
4	0,63	972	1190	0,076	0,64

Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Рис. 8. Абсолютная погрешность расчета температуры

Время расчета температуры на всем интервале времени с шагом в 1 с составило 1,5 с при частоте двухъядерного процессора ЭВМ 2,26 ГГц и оперативной памяти 3 Гб. При этом количество циклов расчета составило 21143. Так как пространственное разрешение системы мониторинга распределенной температуры в среднем составляет 1 м, полученный результат эквивалентен одному циклу расчета температурного профиля жилы для кабеля длиной 21 км. С учетом того, что минимальное время опроса датчиков распределенной температуры в экранах составляет 3 мин, можно сделать вывод о достаточном быстродействии предложенного алгоритма.

Заключение

Предложенное решение задачи по расчету температурного профиля жилы высоковольтного кабеля на основе данных о токовой нагрузке и распределенной температуре экрана в режиме реального времени с помощью методики, изложенной в [6], обладает приемлемой точностью и быстродействием, что подтверждается экспериментальными данными.

Разработанный алгоритм может быть внедрен в программное обеспечение существующих аппаратных средств мониторинга распределенной температуры поверхности кабеля. Это позволит в режиме on-line контролировать реальное значение максимальной температуры в сечении кабеля, от которой зависит его пропускная способность.

Список литературы

1. Малышев А.В., Кривошеев Н.В., Маршнер В.К. Мониторинг силовых кабельных линий с системой RTTR и его влияние на оптимизацию пропускной способности кабельной сети // ЭЛЕКТРО. – 2008. – № 2. – С. 22–24.

2. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев, Н.В. Кривошеев, В.К. Маршнер // ЭЛЕКТРО. – 2008. – № 5. – С. 38–40.

3. Якунин А.В. Надежность и безопасность электросетей под постоянным контролем // КАБЕЛЬ-news. – 2010. – № 3. – С. 78–81.

4. Kuljit Singh, Dan Watley. Cable Monitoring Solution – Predict with Certainty // Cabos'11. Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks. – Maceió, Brazil, 2011.

5. John Millar R., Matti Lehtonen. Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modelling // 15th PSCC, Liege, 22–26 August 2005.

6. Echavarren F.M., Rouco L., González A. Dynamic thermal modeling of isolated cables // 17th Power Systems Computation Conference. – Stockholm Sweden, August 22–26, 2011.

7. Olsen R.S., Holboll J., Gudmundsdóttir U.S. Dynamic Temperature Estimation and Real Time Emergency Rating of Transmission Cables // IEEE Press, 2012.

8. Van Wormer F.C. An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients. // Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. – 1955. – Vol. 74, part 3. – P. 277–280.

9. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 271–273.

10. Пивинский Ю.Е., Ромашин А.Г. Кварцевая керамика. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.

References

1. Malyshev, A.V., Krivosheev, N.V., Marshner, V.K. Monitoring silovyykh kabel'nykh liniy s sistemoy RTTR i ego vliyaniye na optimizatsiyu propusknoy sposobnosti kabel'noy seti [Monitoring of power cable lines with an RTTR system and its influence on cable line capacity optimization]. *Elektro*, 2008, no. 2, pp. 22–24.

2. Belyakov, V.V., Malyshev, A.V., Krivosheev, N.V., Marshner, V.K. Monitoring silovyykh kabel'nykh liniy s adaptatsiyey k usloviyam okruzhayushchey sredy v rezhime real'nogo vremeni [Monitoring of power cable lines adjusted to external environment conditions in real time mode]. *Elektro*, 2008, no. 5, pp. 38–40.

3. Yakunin, A.V. Nadezhnost' i bezopasnost' elektrosetey pod postoyannym kontrolem [Reliability and safety of power lines under constant control]. *KABEL'-news*, 2010, no. 3, pp. 78–81.

4. Kuljit, Singh, Dan, Watley. Cable Monitoring Solution – Predict with Certainty. Cabos'11. Second Seminar on

Undergrounding of Electric Distribution Networks. Maceió, Brazil, 2011.

5. John Millar R., Matti Lehtonen. Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modeling. 15th PSCC, Liege, 22–26 August 2005.

6. Echavarren, F.M., Rouco, L., González, A. Dynamic thermal modeling of isolated cables. 17th Power Systems Computation Conference. Stockholm Sweden. August 22–26, 2011.

7. Olsen, R.S., Holboll, J., Gudmundsdóttir, U.S. Dynamic temperature estimation and real time emergency rating of transmission cables. IEEE Press, 2012.

8. Van Wormer, F.C. An improved approximate technique for calculating cable temperature transients. *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs*, 1955, vol. 74, part 3, pp. 277–280.

9. Zeveke, G.V., Ionkin, P.A., Netushil, A.V., Strakhov, S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat, 1989, pp. 271–273.

10. Pivinskiy, Yu.E., Romashin, A.G. *Kvartsevaya keramika* [Quartz ceramics]. Moscow, Metallurgiya, 1974. 264 p.

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами,

телефон (4932) 26-99-04,

e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Зайцев Евгений Сергеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

старший преподаватель кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,

e-mail: evgeniy1589@mail.ru