

УДК 621.314

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, О. Г. ШИРОКОВ,
Н. М. ХОДАНОВИЧ, А. Ю. ШУТОВ**

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

Введение

Силовой кабель – один из важнейших элементов системы электроснабжения. От его надежной работы зависит бесперебойность питания потребителей электроэнергии. К сожалению, отказ кабеля – периодически встречающееся явление, приводящее, как правило, к существенным материальным затратам. Кроме того, в эксплуатации находится значительное количество кабелей, проработавших более 35 лет. Это существенно повышает вероятность их отказа.

В литературе в качестве основных причин повреждаемости кабелей приводятся: механические повреждения, влияние на изоляцию кабеля высокого напряжения и окружающей среды [1], [2]. Сведения о количестве кабелей, выходящих из строя по причине перегрева, фактически отсутствуют. Однако температура – один из основных факторов, обуславливающих износ полимерной изоляции. Кабели могут подвергаться температурным перегрузкам при аварийных режимах работы электрической сети, что приведет к интенсивному тепловому износу их изоляции и последующему выходу из строя.

На этапе проектирования систем электроснабжения один из критериев выбора сечения жил кабеля – условие нагрева допустимым длительным током, где при расчетах используются эмпирические коэффициенты, учитывающие условия эксплуатации кабеля. В реальных условиях на кабели воздействует случайное сочетание внешних факторов, которые должны периодически учитываться при оценке их остаточного срока эксплуатации. То есть речь идет о необходимости непрерывного диагностирования тепловых режимов силовых кабелей, что, при современных возможностях микропроцессорной техники, вполне может быть реализовано.

Промышленностью выпускают кабели с встроенным оптоволоконным продольным датчиком температуры [3]. Современные аппаратные и программные средства, такие как ПТС-1000 российской фирмы Седатэк, позволяют измерять температуру в любом месте по длине кабеля с точностью до одного метра. Однако недостатком таких систем является возможность контроля температуры только поверхностных слоев кабеля, поскольку оптоволоконно встраивают или в защитную оболочку или в экран кабеля. Наиболее нагретая точка кабеля находится на поверхности жилы, и именно в этой области происходит наиболее интенсивный тепловой износ изоляции кабеля. Очевидно, что измерить температуру наиболее нагретой точки кабеля можно только косвенным методом.

Есть два способа косвенного измерения температуры поверхности жилы кабеля: на основе зависимости электрического сопротивления жилы от температуры и на основе математической модели тепловых процессов. Первый способ предполагает

существенные аппаратные затраты, особенно для высоковольтных кабелей. Вторым способом более предпочтителен в плане аппаратных затрат, но требует соответствующей математической базы. В данной статье рассмотрен вариант базовой математической модели тепловых процессов силовых кабелей, которая при дальнейшем развитии может быть использована в алгоритмах программного обеспечения устройств непрерывного диагностирования этих кабелей.

Расчетные соотношения для тепловых процессов одножильного кабеля

Поставим задачу разработать упрощенную математическую модель тепловых процессов одножильного кабеля, конструктивно состоящего из токоведущей жилы, основной изоляции жилы, защитной оболочки и помещенного в воздушную среду. Далее будем считать такую конструкцию и соответствующую ей математическую модель базовыми.

Вначале необходимо составить структурную схему тепловых процессов для базовой модели, рассмотрев каждый ее элемент как однородное тело [4]. Эта схема приведена на рис. 1.

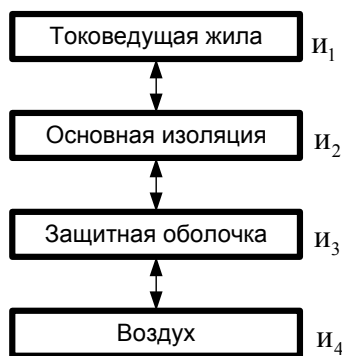


Рис. 1. Структурная схема тепловых процессов одножильного кабеля

На рис. 1 стрелками указано направление теплового потока, который условно идет от центра жилы через слои изоляции в окружающий воздух. При этом воздух также считается однородным телом с заранее заданной температурой, не зависящей от температуры элементов кабеля. Каждое однородное тело имеет температуру θ_i , где i – номер однородного тела. Тепловые процессы в рассматриваемой системе однородных тел описываются следующими дифференциальными уравнениями [4]:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\theta_1 \dots \theta_4$ – соответственно, температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, защитной оболочки и окружающего воздуха ($^{\circ}\text{C}$); $C_1 \dots C_3$ – теплоемкости соответствующих однородных тел ($\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^{\circ}\text{C}}$); $R_1 \dots R_3$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$); P – потери активной мощности в токоведущей жиле (Вт).

На основе этой системы уравнений можно синтезировать тепловую схему замещения одножильного кабеля [4], приведенную на рис. 2.

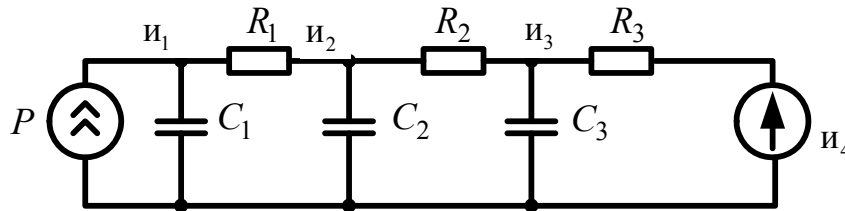


Рис. 2. Тепловая схема замещения одножильного кабеля

Напряжения в узлах такой схемы эквивалентны соответствующим температурам однородных тел и все методы теоретической электротехники справедливы при их расчете. Воспользовавшись операторным методом, для температуры изоляции жилы можно записать:

$$\theta_2(p) = \frac{(b_1 p + b_0) \cdot P(p) + (d_1 p + 1) \cdot \theta_4(p)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (2)$$

где

$$\begin{cases} b_1 = R_2 R_3 C_3; \\ b_0 = R_2 + R_3; \\ d_1 = R_1 C_1; \\ a_3 = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3; \\ a_2 = R_1 R_3 C_1 C_2 + R_1 R_2 C_1 C_2 + R_1 R_3 C_1 C_3 + R_2 R_3 C_1 C_3 + R_2 R_3 C_2 C_3; \\ a_1 = R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_3 C_1 + R_3 C_2 + R_2 C_2 + R_3 C_3. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим порядок расчета тепловых параметров для базовой модели, считая все однородные тела идеальными цилиндрами некоторой длины l .

Существует непосредственная аналогия между расчетом тепловых и электрических сопротивлений [5]. Как известно, электрические сопротивления рассчитываются по формуле:

$$R_{эл} = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (4)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника (Ом·м); l – длина проводника (м); S – площадь сечения проводника (м²).

Если принять, что тепловой поток распространяется от центра токоведущей жилы к периферии кабеля, то аналогией длины проводника для теплового сопротивления элемента кабеля будет длина пути h_1 теплового потока. Тогда для теплового сопротивления жилы кабеля можно записать:

$$R_1 = \frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{h_1}{S_1} = \frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{d_1}{2 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot \gamma_1 \cdot \pi \cdot l}, \quad (5)$$

где γ_1 – удельная теплопроводность материала жилы (меди или алюминия); S_1 – площадь поверхности теплоотдачи жилы; d_1 – диаметр жилы.

Изоляция жилы кабеля и защитная оболочка представляют собой полые цилиндры толщиной h_2 . Их тепловые сопротивления будут зависеть не только от значения h_2 , но и от значений диаметров внутренней и внешней поверхностей. Поэтому расчет тепловых сопротивлений нужно вести интегрально. Рассмотрим расчет на примере изоляции жилы.

Пусть x – некоторое расстояние от поверхности жилы кабеля до произвольной точки в области изоляции жилы. Пусть dx – бесконечно малое приращение величины x . Тогда приращение теплового сопротивления изоляции жилы в рассматриваемой точке будет равно:

$$dR_2 = \frac{1}{\gamma_2} \cdot \frac{dx}{\pi \cdot (d_1 + 2 \cdot x) \cdot l}.$$

Интегрируя в пределах от 0 до h_2 , а также учитывая, что $h_2 = \frac{d_2 - d_1}{2}$, получим:

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot \gamma_2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \int_0^h \frac{dx}{\left(\frac{d_1}{2} + x\right)} = \frac{1}{2 \cdot \gamma_2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{d_1}{2} + x \right) \Bigg|_0^h = \frac{\ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)}{2 \cdot \gamma_2 \cdot \pi \cdot l}, \quad (6)$$

где γ_2 – удельная теплопроводность изоляции жилы; d_2 – диаметр изоляции жилы.

Аналогично для теплового сопротивления защитной оболочки:

$$R_3 = \frac{\ln \left(\frac{d_3}{d_2} \right)}{2 \cdot \gamma_3 \cdot \pi \cdot l}, \quad (7)$$

где γ_3 – удельная теплопроводность защитной оболочки; d_2 – диаметр защитной оболочки.

Теплоемкости однородных тел рассчитываются как произведения удельных теплоемкостей этих тел на их массы [4]:

$$C_1 = c_1 \cdot G_1 = c_1 \cdot \beta_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot l; \quad (8)$$

$$C_2 = c_2 \cdot G_2 = c_2 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_2^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot l = c_2 \cdot \beta_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2) \cdot l; \quad (9)$$

$$C_3 = c_3 \cdot G_3 = c_3 \cdot \beta_3 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_3^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \right) \cdot l = c_3 \cdot \beta_3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^2 - d_2^2) \cdot l, \quad (10)$$

где c_1, c_2, c_3 – удельные теплоемкости материалов соответствующих однородных тел $\left(\frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{\text{°С} \cdot \text{кг}} \right)$; G_1, G_2, G_3 – массы соответствующих однородных тел (рассчитываются как произведение плотности на объем) (кг); $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – плотности материалов соответствующих однородных тел $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$.

С учетом зависимости электрического сопротивления жилы кабеля от температуры потери активной мощности рассчитываются по формуле [5]:

$$P = I^2 \cdot R_{\text{эл}} = I^2 \cdot \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_1 - 20)) \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d_1^2}, \quad (11)$$

где I – ток, протекающий по жиле кабеля (А); $R_{\text{эл}}$ – электрическое сопротивление жилы кабеля длиной l (Ом); ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление материала жилы кабеля при температуре жилы кабеля $\theta_1 = 20$ °С (Ом · м); α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала жилы кабеля (1/°С).

Поскольку теплопроводность металлов значительно превышает теплопроводность диэлектриков [5], то для тепловых сопротивлений справедливо соотношение:

$$R_1 \ll R_2; \quad R_1 \ll R_3.$$

Учитывая также явление поверхностного эффекта, т. е. вытеснения переменного тока на поверхность проводника, с достаточной точностью можно утверждать, что температура в центре жилы в установившемся режиме приблизительно равна температуре на ее поверхности, или $\theta_1 \approx \theta_2$. Тогда соотношение (11) переписывается в виде:

$$P = I^2 \cdot \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_2 - 20)) \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d_1^2}. \quad (12)$$

Таким образом, при расчетах необходимо иметь данные о геометрических размерах элементов кабеля, их справочные данные, а также значения тока, протекающего по жиле кабеля. Отметим, что значение длины l выбирается произвольно, так как в дальнейших расчетах влияние этого параметра не сказывается, что объясняется сокращением l при произведении тепловых сопротивлений на теплоемкости и следует из сравнения соотношений (5)–(7) и (8)–(10).

Рассмотрев тепловую схему замещения, приведенную на рис. 2, для установившегося режима, получим выражение для установившегося значения температуры жилы кабеля:

$$\theta_{2,\text{уст}} = P \cdot (R_2 + R_3) + \theta_4. \quad (13)$$

Из сравнения соотношений (6), (7), (12) и (13) видно, что значения длины l также не влияют на расчеты для установившегося теплового режима.

Моделирование тепловых процессов в двухжильном кабеле

Как следует из соотношений (11) и (3), расчеты для базовой модели кабеля достаточно сложны. В случае моделирования тепловых процессов в многожильных кабелях потребуется ввести дополнительные однородные тела, что приведет к многократному усложнению расчетов. Поэтому поставим задачу разработать методику приведения параметров исследуемого кабеля к параметрам базовой модели. Для этого рассмотрим двухжильный кабель с пластмассовой (или резиновой) изоляцией, упрощенная конструкция которого показана на рис. 3.

Составим структурную схему тепловых процессов двухжильного кабеля. Такая схема с обозначениями соответствующих температур однородных тел изображена на рис. 4.

Не учитывая влияние воздушных прослоек в кабеле (первоначально), а также, считая, что тепловые сопротивления и теплоемкости идентичных однородных тел

равны, тепловые процессы в рассматриваемой системе однородных тел можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \frac{d\theta_{1,1}}{dt} + \frac{\theta_{1,1} - \theta_{2,1}}{R_1} = P_1; \\ C_1 \cdot \frac{d\theta_{1,2}}{dt} + \frac{\theta_{1,2} - \theta_{2,2}}{R_1} = P_2; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_{2,1}}{dt} + \frac{\theta_{2,1} - \theta_{1,1}}{R_1} + \frac{\theta_{2,1} - \theta_{2,2}}{2 \cdot R_2} + \frac{\theta_{2,1} - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_{2,2}}{dt} + \frac{\theta_{2,2} - \theta_{1,2}}{R_1} + \frac{\theta_{2,2} - \theta_{2,1}}{2 \cdot R_2} + \frac{\theta_{2,2} - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_{2,1}}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_{2,2}}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0, \end{array} \right. \quad (14)$$

где P_1, P_2 – потери мощности в соответствующих жилах кабеля.

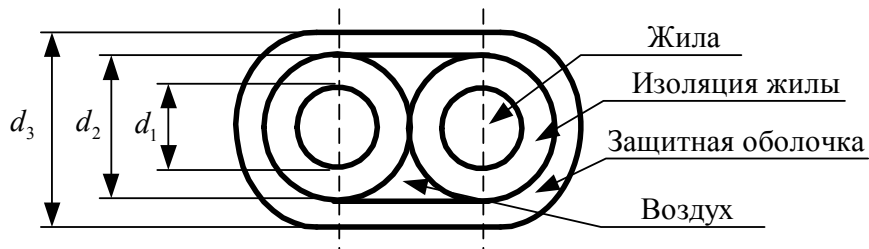


Рис. 3. Упрощенная конструкция двухжильного кабеля с пластмассовой или резиновой изоляцией: d_1 – диаметр жилы; d_2 – диаметр изоляции жилы; d_3 – диаметр защитной оболочки

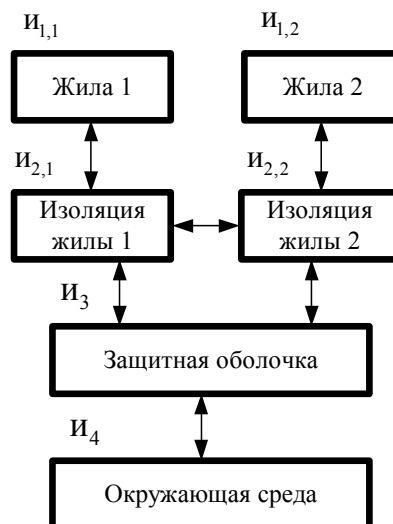


Рис. 4. Структурная схема тепловых режимов двухжильного кабеля

Примем далее для упрощения равенство всех потерь мощности в жилах кабеля:

$$P_1 = P_2 = P. \quad (15)$$

Тогда температуры всех идентичных однородных тел будут равны, или:

$$\begin{cases} \theta_{1,1} = \theta_{1,2} = \theta_1, \\ \theta_{2,1} = \theta_{2,2} = \theta_2. \end{cases} \quad (16)$$

С учетом соотношений (15) и (16) система (14) запишется в виде:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + 2 \cdot \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Разделив на 2 последнее уравнение системы (17), окончательно получим:

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = P; \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = 0; \\ \frac{C_3}{2} \cdot \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{2 \cdot R_3} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Из сравнения систем (18) и (1) следует, что все расчетные соотношения для двухжильного кабеля, приведенного к базовой модели, аналогичны соотношениям (2)–(13), только вместо значения C_3 необходимо использовать $\frac{C_3}{2}$, а вместо значения R_3 использовать значение $2 \cdot R_3$.

Очевидно, что при количестве жил кабеля, равном n , система уравнений по базовой модели будет аналогична системе (18), только в третьем уравнении появятся параметры $\frac{C_3}{n}$ и $n \cdot R_3$.

Важной особенностью является расчет тепловых сопротивлений. Если рассмотреть конструкцию кабеля, приведенную на рис. 3, то можно увидеть, что теплообмен между жилами и окружающей средой осуществляется только через половину площади поверхности рассматриваемых однородных тел – цилиндров и полых цилиндров (разделение областей теплообмена на рис. 3 условно показано пунктиром). Это обусловлено влиянием воздушных прослоек, тепловое сопротивление которых намного выше, чем тепловые сопротивления остальных элементов кабеля [5], а также отсутствием градиента температур во внутренней области между жилами в силу принятых упрощений (15) и (16). Следовательно, для двухжильного кабеля рассматриваемой конструкции все тепловые сопротивления, рассчитанные по формулам (5), (6), (7), необходимо увеличить в 2 раза.

Рекуррентные соотношения для расчета температуры изоляции жилы θ_2 рассматриваемого кабеля в случае постоянной температуры воздуха θ_4 можно записать в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_i = \frac{-(b_1 \cdot p_i + b_0)}{4 \cdot a_3 \cdot (p_i)^3 + 3 \cdot a_2 \cdot (p_i)^2 + 2 \cdot a_1 \cdot p_i + a_0}; \\ \tau_i = -\frac{1}{p_i}; \\ P_j = I^2 \cdot \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_{2,j-1} - 20)) \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d_1^2}; \\ \vartheta_{i,j} = w_i \cdot P_j + (\vartheta_{i,j-1} - w_i \cdot P_j) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \theta_{2,j} = \sum_{i=1}^3 \vartheta_{i,j} + \theta_4, \end{array} \right. \quad (19)$$

где $i \in \{1; 2; 3\}$ – номер экспоненциальной составляющей теплового процесса; j – номер отсчета; p_i – корни характеристического уравнения выражения (2); τ_i – постоянные времени экспоненциальных составляющих; w_i – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа; $\vartheta_{i,j}$ – составляющие температуры изоляции жилы по каждой экспоненциальной составляющей; Δt – интервал времени между j -м и $j+1$ отсчетами.

Первое выражение системы (19) позволяет перейти от операторного изображения к оригиналу. Третье выражение учитывает зависимость электрического сопротивления жилы кабеля от температуры.

Соотношения (19) позволяют алгоритмизировать расчет временных диаграмм на основе преобразования Лапласа для температуры изоляции жилы кабеля без использования Z -преобразования, что очень удобно.

Экспериментальные исследования тепловых процессов в кабеле

Для подтверждения адекватности разработанной упрощенной математической модели силового кабеля были проведены лабораторные исследования, в которых через двухжильный кабель пропускался переменный ток и регистрировались значения температуры изоляции жилы. Схема экспериментальных исследований приведена на рис. 5.

Напряжение 220 В через автоматический выключатель QF1 подавалось на лабораторный автотрансформатор Т1 (ЛАТР). Вольтметр PV1 показывал значение выходного напряжения ЛАТРа. Это напряжение через тумблер SA1 подавалось на понижающий трансформатор Т2, который был нагружен на короткозамкнутый двухжильный кабель. Значение тока, протекающего в кабеле, контролировалось с помощью амперметра PA1, включенного через измерительный трансформатор тока Т3. Падение напряжения на кабеле измерялось с помощью измерительного преобразователя «напряжение – ток» DA1 и микроамперметра PA2. На жиле кабеля под изоляцией был размещен полупроводниковый датчик температуры (термометр сопротивления). Он представлен на схеме блоком DA2. К датчику температуры был подключен измерительный преобразователь «сопротивление – ток» DA3, выходом соединенный с микроамперметром PA3. В процессе исследований также измерялись значения температуры воздуха.

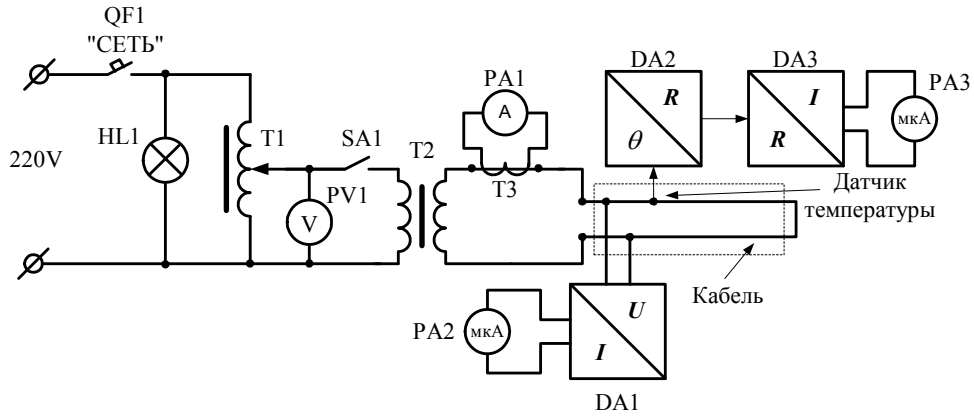


Рис. 5. Схема экспериментальных исследований

В опытах использовался двухжильный кабель типа ПВГ: с медными жилами сечением $1,2 \text{ мм}^2$, изоляцией жил из полиэтилена диаметром 6 мм и оболочкой из ПВХ – пластиката диаметром 18 мм. Длина кабеля 3,9 м. Справочные значения требуемых величин и результаты расчетов тепловых параметров этого кабеля сведены в виде таблицы.

Тепловые параметры исследуемого кабеля

Параметр	γ	c	β	R	C
Размерность	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$	$\frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{\text{°C} \cdot \text{кг}}$ <td>$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$</td> <td>$\frac{\text{°C}}{\text{Вт}}$</td> <td>$\frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{\text{°C}}$</td>	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{°C}}{\text{Вт}}$	$\frac{\text{с} \cdot \text{Вт}}{\text{°C}}$
Жила	390	385	8940	$10,5 \cdot 10^{-5}$	32,5
Изоляция жилы	0,35	2200	920	0,184	427,3
Оболочка	0,12	1470	1390	0,276	563,3

Расчетные (по соотношениям (19)) и экспериментальные диаграммы процесса нагрева кабеля при токе $I = 29,5 \text{ А}$ и процесса охлаждения кабеля при температуре воздуха $\theta_4 = 18,3 \text{ °C}$ приведены на рис. 6.

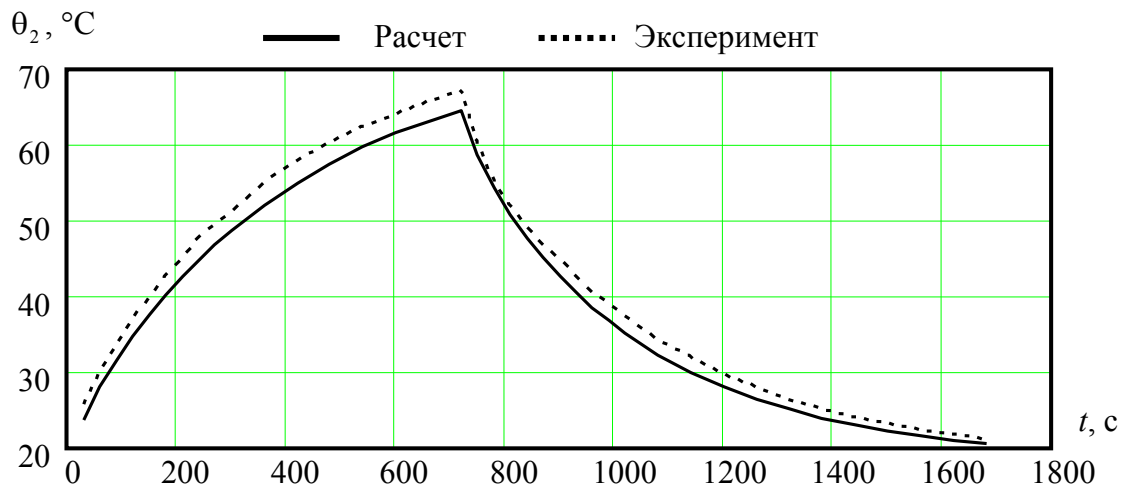


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные диаграммы процесса нагрева и охлаждения кабеля

Расчетные и экспериментальные диаграммы процесса нагрева кабеля при токе $I = 24$ А и процесса охлаждения кабеля при температуре воздуха $\theta_4 = 17,8$ °С приведены на рис. 7.

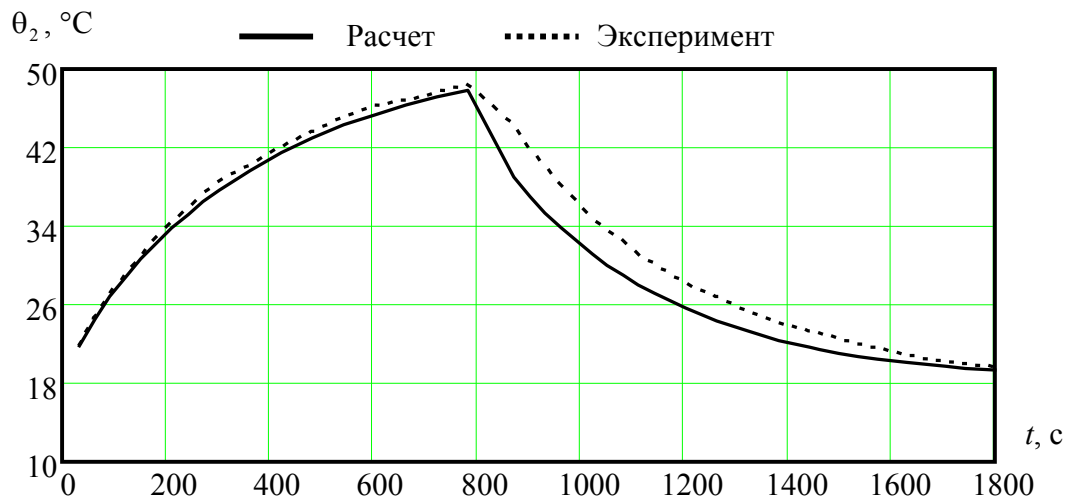


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные диаграммы процесса нагрева и охлаждения кабеля

В результате экспериментальных исследований получены следующие показатели качества разработанной математической модели тепловых процессов силового кабеля: относительная погрешность модели не превышает 20 %, среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по модели не превышает 0,4 °С.

Заключение

Проведенные эксперименты позволяют лишь частично судить об адекватности математической модели. При лабораторных исследованиях не учитывался ряд факторов, влияющих на температуру кабелей, применяющихся в системах электроснабжения: класс напряжений, способ прокладки, параметры окружающей среды, неравномерность температуры воздуха, и т. д. Однако исследования показали, что разработанные расчетные соотношения даже в условиях принятых упрощений достаточно корректно описывают тепловые процессы в кабеле, что позволяет утверждать о верно выбранном направлении. Естественно, требуется дальнейшая проработка данной темы с целью получения алгоритмов для устройств диагностики и тепловой защиты силовых кабелей. Применение таких устройств повысит эксплуатационную надежность систем электроснабжения.

Литература

1. Шувалов, М. Ю. Исследование надежности силовых кабелей среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена / М. Ю. Шувалов, В. Л. Овсиенко, Д. В. Колосков // Кабели и провода. — № 5. — 2007. — С. 25–34.
2. Боксимер, Э. А. Старение кабелей при прокладке в грунте / Э. А. Боксимер, В. И. Рязанов, С. Г. Курганская // Кабели и провода. — № 2. — 2005. — С. 18–22.
3. Карпов, К. Р. Мониторинг подземных высоковольтных кабельных сетей / К. Р. Карпов // Энергослужба предприятия. — № 4. — 2007. — С. 15–17.
4. Широков, О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств. / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Научно-технические технологии. — № 2. — 2008. — С. 63–67.

5. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова. – Москва : Энергия, 1969. – 440 с.

Получено 26.02.2009 г.