

# МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Н. М. Ходанович, А. Ю. Шутов

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель Д. И. Зализный

Силовой кабель - один из важнейших элементов системы электроснабжения, от надежной работы которого зависит бесперебойность питания потребителей электроэнергии. Кабели могут подвергаться температурным перегрузкам при аварийных режимах работы электрической сети, что приведет к интенсивному тепловому износу их изоляции и последующему выходу из строя.

Одним из способов косвенного измерения температуры жилы кабеля является математическое моделирование тепловых процессов в кабеле. В данном докладе рассмотрена подобная математическая модель.

Рассмотрим двухжильный кабель, помещенный в воздушную среду и конструктивно состоящий из токоведущих жил, основной изоляции жил и защитной оболочки. Каждый элемент рассматриваем как однородное тело, т. е. тело, температура в каждой точке которого неизменна.

Тепловой поток 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.

Процесс теплообмена происходит между жилами кабеля и их изоляциями, между изоляциями жил, между изоляциями жил и защитной оболочкой, а также между защитной оболочкой и окружающей средой.

Теплообмен между жилами и окружающей средой осуществляется только через половину площади поверхности рассматриваемых однородных тел. Это обусловлено влиянием воздушных прослоек, тепловое сопротивление которых намного выше, чем тепловые сопротивления остальных элементов кабеля, а также отсутствием гра-

диента температур во внутренней области между жилами из-за равенства токов в жилах.

Если учесть равенство всех потерь мощности в жилах кабеля, то получим следующую систему уравнений, описывающую тепловые процессы в рассматриваемой системе однородных тел:

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

где  $\theta_1, \dots, \theta_4$  – температуры однородных тел: токоведущей жилы, основной изоляции жилы, защитной оболочки и окружающего воздуха;  $C_1, \dots, C_3$  – теплоемкости соответствующих однородных тел;  $R_1, \dots, R_3$  – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел;  $P$  – потери активной мощности в токоведущей жиле.

Алгоритм для расчета температуры изоляции жилы  $\theta_2$  рассматриваемого кабеля в случае постоянной температуры воздуха  $\theta_4$  можно записать в виде системы:

$$\begin{cases} w_i = \frac{-(b_1 \cdot p_i + b_0)}{4 \cdot a_3 \cdot (p_i)^3 + 3 \cdot a_2 \cdot (p_i)^2 + 2 \cdot a_1 \cdot p_i + a_0}; \\ \Phi = -\frac{1}{p_i}; \\ P_j = I_2 \cdot c_{20} \cdot (1 + 6 \cdot (\theta_{2,j-1} - 20)) \cdot \frac{4 \cdot l}{p \cdot d_1^2}; \\ \vartheta_{i,j} = w_i \cdot P_j + (\vartheta_{i,j-1} - w_i \cdot P_j) \cdot e^{\frac{\Delta t}{\Phi}}; \\ \theta_{2,j} = \sum_{i=1}^3 \vartheta_{i,j} + \theta_4, \end{cases}$$

где  $i \in \{1;2;3\}$  – номер экспоненциальной составляющей теплового процесса;  $j$  – номер отсчета;  $p_i$  – корни характеристического уравнения выражения (2);  $\Phi$  – 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;  $\Delta t$  – интервал времени между  $j$ -м и  $j+1$  отсчетами.

Данный алгоритм позволяет учесть зависимость электрического сопротивления жилы от температуры.

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. На жиле кабеля под изоляцией расположен полупроводниковый датчик температуры, сопротивление которого зависит от температуры. К датчику температуры подключен измерительный преобразователь «сопротивле-

ние – ток», выходом соединенный с микроамперметром. Для того чтобы получить значения измеряемых величин, показания приборов необходимо умножить на масштабные коэффициенты (множители). Схема экспериментальных исследований приведена на рис. 1.

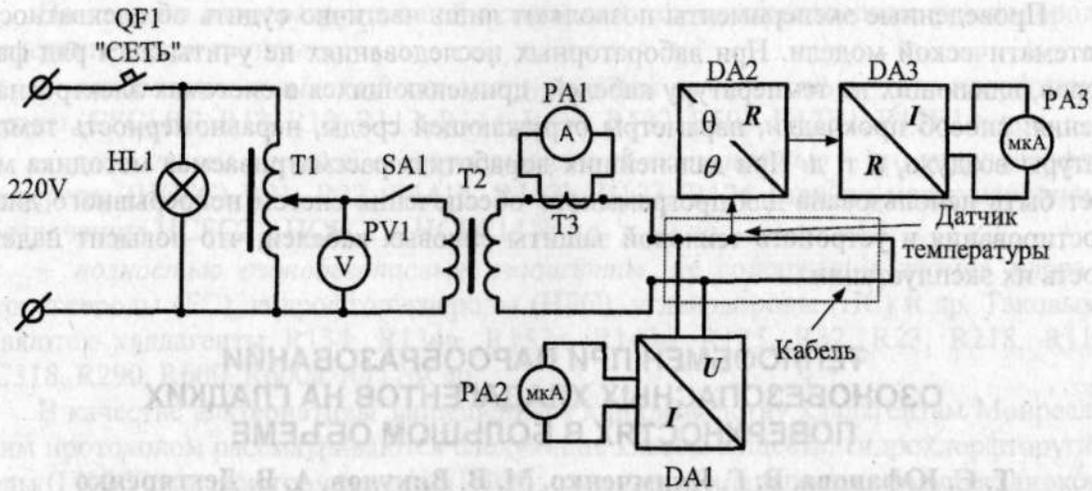


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований

Также эта экспериментальная установка используется для проведения лабораторных работ по курсу «Электротехнические материалы» на кафедре «Электроснабжение».

В опытах использовался двухжильный кабель типа ПВГ с медными жилами сечением  $1,2 \text{ мм}^2$ , изоляцией жил из полиэтилена и оболочкой из ПВХ – пластиката. Длина кабеля 3,9 м.

Расчетные и экспериментальные диаграммы процессов нагрева и охлаждения кабеля приведены на рис. 2.

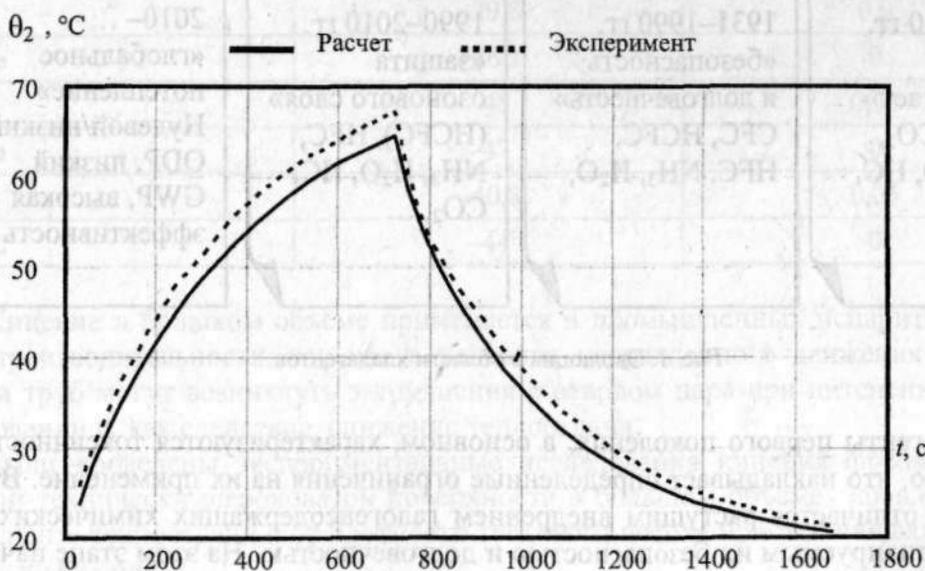


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные диаграммы процесса нагрева и охлаждения кабеля

Сравнивая расчетные и экспериментальные диаграммы процессов нагрева и охлаждения кабеля можно сказать, что модель, несмотря на принятые упрощения, достаточно точно описывает тепловые процессы, происходящие в кабеле: относительная погрешность модели не превышает 20 %, среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по модели не превышает 0,4 °С.

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: способ прокладки, параметры окружающей среды, неравномерность температуры воздуха, и т. д. При дальнейших доработках рассматриваемая методика может быть использована для программного обеспечения систем непрерывного диагностирования и устройств тепловой защиты силовых кабелей, что повысит надежность их эксплуатации.