

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д. М. Ковалев

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

Система дифференциальных уравнений, описывающая математическую модель тепловых процессов силового трансформатора, состоящую из четырех однородных тел, имеет следующий вид [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\theta_{\text{охл}} - \theta_{\text{м}}}{R_3} = \Delta P_{\text{охл}}; \\ C_1 \frac{d\theta_{\text{с}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{с}} - \theta_{\text{м}}}{R_1} = \Delta P_{\text{х.х}}; \\ C_2 \frac{d\theta_{\text{н.н.т}}}{dt} + \frac{\theta_{\text{н.н.т}} - \theta_{\text{м}}}{R_2} = \Delta P_{\text{н}}; \\ C_3 \frac{d\theta_{\text{м}}}{dt} - \frac{\theta_{\text{охл}} - \theta_{\text{м}}}{R_3} - \frac{\theta_{\text{с}} - \theta_{\text{м}}}{R_1} - \frac{\theta_{\text{н.н.т}} - \theta_{\text{м}}}{R_2} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где:  $\theta_{\text{охл}}$ ,  $\theta_{\text{м}}$ ,  $\theta_{\text{с}}$ ,  $\theta_{\text{н.н.т}}$  – температуры однородных тел: охлаждающей среды, масла, магнитопровода и обмоток;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – теплоемкости соответствующих однородных тел;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел;  $\Delta P_{\text{охл}}$ ,  $\Delta P_{\text{х.х}}$ ,  $\Delta P_{\text{н}}$  – эквивалентные потери активной мощности в охлаждающей среде, магнитопроводе и обмотках.

На основе системы (1) была разработана компьютерная программа для анализа нагрузочной способности силовых трансформаторов. В программном коде этой программы реализованы алгоритмы для расчета нестационарных тепловых процессов масла, магнитопровода и обмоток трансформатора. В случае температуры масла алгоритм записывается следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_M(j) = \vartheta_{x,x,M} + \vartheta_{H,M}(j) + \vartheta_{OxL,M}(j); \\ \vartheta_{x,x,M} = R_3 \cdot \Delta P_{x,x}; \\ \vartheta_{H,M}(j) = \sum_{i=1}^3 [\xi_i(j)]; \\ \xi_i(j) = \vartheta_{M,i} [K_H(j)]^2 + (\xi_i(j-1) - \vartheta_{M,i} [K_H(j)]^2) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}; \\ \vartheta_{OxL,M}(j) = \sum_{i=1}^3 [\chi_i(j)] \xi_i; \\ \chi_i(j) = d_i \theta_{OxL}(j) + (\chi_i(j-1) - d_i \theta_{OxL}(j)) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_i}}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $j$  – номер интервала расчета;  $i$  – номер экспоненциальной составляющей;  $\vartheta_{x,x,M}$ ,  $\vartheta_{H,M}(j)$ ,  $\vartheta_{OxL,M}(j)$  – составляющие температуры масла от потерь холостого хода, нагрузочных потерь и температуры охлаждающей среды;  $\xi_i(j)$  – экспоненциальные составляющие температуры масла от нагрузочных потерь;  $\vartheta_{M,i}$  – коэффициенты при экспоненциальных составляющих  $\xi_i(j)$ ;  $\chi_i(j)$  – экспоненциальные составляющие температуры масла от температуры охлаждающей среды;  $d_i$  – коэффициенты при экспоненциальных составляющих  $\chi_i(j)$ ;  $\Delta t$  – интервал расчета;  $\tau_i$  – тепловые постоянные времени;  $K_H(j)$  – коэффициент нагрузки.

Внешний вид главного окна разработанной программы показан на рис. 1.

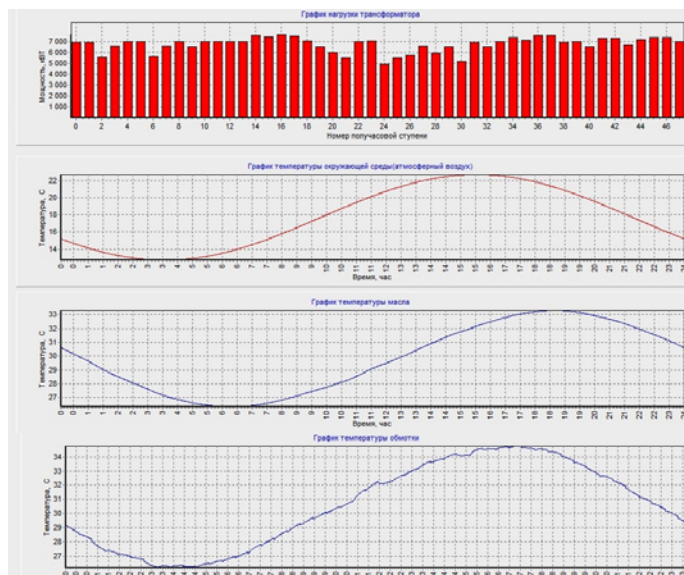


Рис. 1. Главное окно компьютерной программы для анализа нагрузочной способности силовых трансформаторов

Программа имеет два основных модуля: модуль ввода исходных данных и модуль вывода графиков. Первый модуль состоит из двух блоков: блока ввода параметров трансформатора и блока ввода графика нагрузки. В качестве параметров

трансформатора пользователем вводятся: номинальные потери холостого хода и короткого замыкания, номинальная мощность, суммарные массы стали, масла и обмоток, а также параметры эквивалентной температуры окружающей среды. Суточный график нагрузки трансформатора вводится посредством передвижения с помощью мыши каждой получасовой ступени.

В модуле вывода графиков осуществляется отображение диаграмм графика нагрузки трансформатора, температуры масла, магнитопровода, обмоток, а также температуры охлаждающей среды.

Температура охлаждающей среды моделируется в качестве эквивалентной синусоиды [2] с периодом  $T$ , равным суткам:

$$\theta_{\text{охл}}(j) = \theta_{\text{ср}} + \theta_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi j \Delta t}{T} + \varphi\right), \quad (3)$$

где  $\theta_{\text{ср}}$  – среднегодовое значение температуры воздуха [3];  $\theta_m$  – амплитуда суточного изменения температуры воздуха;  $\varphi$  – фазовый сдвиг эквивалентной синусоиды для соответствия максимумов и минимумов температуры воздуха требуемому времени суток.

Разработанная программа была использована для анализа нагрузочной способности трансформаторов ATLV-45000/110/10 главной понизительной подстанции ОАО «БМЗ». Результаты анализа приведены в таблице.

#### Результаты анализа нагрузочной способности трансформаторов ATLV-45000/110/10

День	Максимум нагрузки, %	Максимальная температура масла, °С	Максимальная температура обмоток, °С
Характерный летний	24	35	38
Характерный зимний	24	12	14
Характерный летний	100	70	98
Характерный зимний	100	49	62

Предлагаемое программное обеспечение можно применять при проектировании систем электроснабжения и мониторинга трансформаторов во время эксплуатации. В процессе проектирования при помощи программы можно оценить, насколько подходит тот или иной трансформатор, будет ли отвечать его нагрузочная способность требованиям, которые выдвигаются к проектируемой системе электроснабжения. На стадии проектирования также можно проанализировать динамику изменения температуры трансформатора в случае аварии. Такой анализ поможет определить, какой именно трансформатор необходимо выбрать для надежной и бесперебойной работы энергосистемы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Зализный, Д. И. Расчет температур основных элементов силового масляного трансформатора на основе анализа температуры поверхности его бака / Д. И. Зализный, О. Г. Широков // Изв. высш. учеб. завед. и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2012. – № 4. – С. 18–28.
2. Power transformers – Part 7 : Loading guide for oil immersed power transformers // IEC Revision of Publication 60076, draft 7. – 2005. – 122 p.
3. ГОСТ 14209–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1987. – 30 с.
4. Боднар, В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Боднар. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.