

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

О.Г. ШИРОКОВ, Д.И. ЗАЛИЗНЫЙ, Д.М. ЛОСЬ

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

Введение

В теории математического моделирования тепловых процессов в силовых трансформаторах имеется два основных направления. Первое направление – это тепловые модели, применяющиеся при проектировании трансформаторов. Эти модели, как правило, очень сложны, так как в качестве исходных данных используют большое количество конструктивных параметров трансформатора и основаны на таких методах, как метод конечных элементов или метод уравнений подобия. Второе направление – тепловые модели, применяемые при эксплуатации трансформаторов. Подобные модели максимально упрощены и в качестве исходных данных используют паспортные данные трансформатора.

В математических моделях второго направления трансформатор рассматривается как система трех однородных тел: обмотки, масла и магнитопровода [1]. Такая модель принята за основу в нормативных документах ГОСТ 14209-85 [2] и МЭК 354 [3]. Но, в силу своего упрощения, эта модель не учитывает многие факторы, влияющие на нагрев трансформатора.

В данной статье предложена настраиваемая тепловая модель, которая является более точной по отношению к реальным тепловым процессам в силовом трансформаторе, чем существующие упрощенные модели.

1. Расчетные соотношения для температуры масла трансформатора по упрощенной тепловой модели

Тепловая модель масляного трансформатора как системы из четырех однородных тел, включающих обмотку, масло, магнитопровод и охлаждающую среду, рассмотрена в [1, 4]. Эта модель позволяет рассчитать температуры обмотки, масла и магнитопровода силового трансформатора в наиболее нагретых точках. Поскольку в эксплуатации доступна к измерению температура верхних слоев масла, то будем рассматривать тепловую модель относительно данного параметра. Выражения для расчета температуры масла в операторном виде можно записать следующим образом [4]:

$$\theta_M(p) = \vartheta_{XX} + W_1(p)(K_H(p))^2 + W_2(p)\theta_{OХЛ}(p), \quad (1)$$

где

$$W_1(p) = \frac{k_1 p + k_0}{H(p)}, \quad (2)$$

$$W_2(p) = \frac{k_3 p^2 + k_2 p + 1}{H(p)}, \quad (3)$$

$$H(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1, \quad (4)$$

\mathcal{G}_{XX} – составляющая температуры масла от потерь холостого хода трансформатора;
 $K_H(p)$ – операторное изображение коэффициента нагрузки трансформатора;
 $\theta_{OXL}(p)$ – операторное изображение температуры охлаждающей среды;
 $k_0 \dots k_3$ – коэффициенты передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$;
 $a_1 \dots a_3$ – коэффициенты характеристического уравнения $H(p)$.

Коэффициенты $k_0 \dots k_3$ и $a_1 \dots a_3$ рассчитываются по паспортным данным трансформатора в соответствии с соотношениями, приведенными в [4].

Для режима холостого хода трансформатора выражение (1) запишется в виде

$$\theta_M(p) = \mathcal{G}_{XX} + W_2(p)\theta_{OXL}(p). \quad (5)$$

Поставим задачу параметрической идентификации передаточных $W_1(p)$ и $W_2(p)$, а также величины \mathcal{G}_{XX} в соотношении (1) по графику нагрузки трансформатора, графику температуры охлаждающей среды и температуре масла, измеренной непосредственно на трансформаторе. То есть сделаем тепловую модель, настраиваемой [5].

2. Идентификация тепловой модели в статике

Вначале выведем расчетные соотношения для параметрической идентификации величины \mathcal{G}_{XX} в соотношении (1). Для этого можно найти постоянные составляющие квадрата коэффициента нагрузки $K_H^2(t)$, температуры охлаждающей среды $\theta_{OXL}(t)$ и температуры масла $\theta_{MT}(t)$, измеренной непосредственно на трансформаторе.

Введем обозначения: $K_{H,PC}$ – постоянная составляющая квадрата коэффициента нагрузки; $\theta_{OXL,PC}$ – постоянная составляющая температуры охлаждающей среды; $\theta_{MT,PC}$ – постоянная составляющая температуры масла, измеренной непосредственно на трансформаторе.

Тогда, в соответствии с правилами преобразования Фурье, для величины $K_{H,PC}$ можно записать, что

$$K_{H,PC} = \frac{1}{T} \int_0^T K_H^2(t) dt,$$

где T – период расчета.

Переходя к дискретной форме записи, получим

$$K_{H,PC} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (K_H^2)_j, \quad (6)$$

где j – номер интервала отсчета; m – общее число отсчетов.

Аналогично для $\theta_{OXL,PC}$ и $\theta_{MT,PC}$ можно записать

$$\theta_{OXL,PC} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_{OXL})_j. \quad (7)$$

$$\theta_{MT,PC} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\theta_{MT})_j. \quad (8)$$

Выражение (1) для постоянных составляющих величин $K_H^2(t)$, $\theta_{OXL}(t)$, $\theta_{MT}(t)$ и установившихся значений передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$ примет вид:

$$\theta_{MT,PC} = \mathcal{G}_{XX} + k_0 K_{H,PC} + \theta_{OXL,PC}.$$

Откуда получим

$$\mathcal{G}_{XX} = \theta_{\text{МТ.ПС}} - k_0 K_{\text{Н.ПС}} - \theta_{\text{ОХЛ.ПС}}. \quad (9)$$

Для режима холостого хода трансформатора выражение (9) запишется в виде

$$\mathcal{G}_{XX} = \theta_{\text{МТ.ПС}} - \theta_{\text{ОХЛ.ПС}}. \quad (10)$$

Таким образом, идентификацию величины \mathcal{G}_{XX} можно провести в соответствии с соотношениями (6–9).

3. Идентификация тепловой модели в динамике

Коэффициенты k_0 и k_1 в формуле (2) могут быть найдены, если известны коэффициенты k_2, k_3 и $a_1 \dots a_3$ в формулах (3) и (4) [4]. Поэтому процесс идентификации тепловой модели достаточно провести для режима холостого хода трансформатора.

Рассмотрим параметрический идентификационный алгоритм для тепловой модели силового трансформатора в режиме холостого хода без учета величины \mathcal{G}_{XX} в соотношении (5). Тогда идентифицируемой передаточной функцией будет функция $W_2(p)$ и соответственно коэффициенты k_2, k_3 и $a_1 - a_3$.

За основу выберем идентификационный алгоритм, рассмотренный в [5]. Его можно классифицировать как градиентный алгоритм с настраиваемой ортогональной параллельной моделью в виде фильтра Лаггера [7].

Разделим передаточную функцию $W_2(p)$ на полином n -й степени (n – порядок системы) $(p + \lambda_1)(p + \lambda_2)(p + \lambda_3)$. В результате, после преобразования в частичные доли, получим

$$W_2(p) = \frac{\frac{\beta_4}{p + \lambda_1} + \frac{\beta_5}{p + \lambda_2} + \frac{\beta_6}{p + \lambda_3}}{1 - \beta_0 - \frac{\beta_1}{p + \lambda_1} - \frac{\beta_2}{p + \lambda_2} - \frac{\beta_3}{p + \lambda_3}} = \frac{\theta_{\text{МТ}}(p)}{\theta_{\text{ОХЛ}}(p)}, \quad (11)$$

где

$$\begin{cases} \beta_0 = a_3 + 1; \\ \beta_1 = \frac{(\lambda_1)^3 a_3 - (\lambda_1)^2 a_2 + \lambda_1 a_1 - 1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}; \\ \beta_2 = \frac{(\lambda_2)^3 a_3 - (\lambda_2)^2 a_2 + \lambda_2 a_1 - 1}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_1)}; \\ \beta_3 = \frac{(\lambda_3)^3 a_3 - (\lambda_3)^2 a_2 + \lambda_3 a_1 - 1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)}; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \beta_4 = \frac{(\lambda_1)^2 k_3 - \lambda_1 k_2 + 1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}; \\ \beta_5 = \frac{(\lambda_2)^2 k_3 - \lambda_2 k_2 + 1}{(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_1)}; \\ \beta_6 = \frac{(\lambda_3)^2 k_3 - \lambda_3 k_2 + 1}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)}. \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициенты $\lambda_1 \dots \lambda_3$ – это параметры фильтров Лаггера, позволяющих не вычислять в алгоритме производные высших порядков. Величины $\beta_0 \dots \beta_6$ являются непосредственно настраиваемыми.

Для удобства расчетов введем промежуточные параметры $z_i(p)$, равные:

$$z_i(p) = \theta_{\text{MT}}(p) - \theta_{\text{MT.ПС}}; i = 0; \quad (14)$$

$$z_i(p) = \frac{\theta_{\text{MT}}(p) - \theta_{\text{MT.ПС}}}{p + \lambda_i}; 1 \leq i \leq 3; \quad (15)$$

$$z_i(p) = \frac{\theta_{\text{ОХЛ}}(p) - \theta_{\text{ОХЛ.ПС}}}{p + \lambda_{i-3}}; 4 \leq i \leq 6. \quad (16)$$

Пусть $e(p)$ – ошибка идентификации, рассчитываемая во временной области по формуле:

$$e(t, \beta_i) = \theta_{\text{M}}(t, \beta_i) - \theta_{\text{MT}}(t), \quad (17)$$

где $\theta_{\text{M}}(t, \beta_i)$ – температура масла, рассчитанная по настраиваемой тепловой модели;

$\theta_{\text{MT}}(t)$ – температура масла, измеренная непосредственно на трансформаторе.

Структурная схема алгоритма настройки параметров $\beta_0 \dots \beta_6$ приведена на рис. 1.

В алгоритмах параметрической идентификации в качестве целевой функции $J(t, \beta_i)$ обычно принимают квадрат ошибки идентификации [5], то есть

$$J(t, \beta_i) = (e(t, \beta_i))^2 = (\theta_{\text{M}}(t, \beta_i) - \theta_{\text{MT}}(t))^2, 0 \leq i \leq 6. \quad (18)$$

Используя для поиска локального минимума целевой функции (18) метод градиентного спуска [5], получим

$$\frac{d\beta_i}{dt} = -\gamma_i \frac{\partial J}{\partial \beta_i} = -2\gamma_i e(t, \beta_i) \frac{\partial e(t, \beta_i)}{\partial \beta_i}, 0 \leq i \leq 6, \quad (19)$$

где γ_i – весовые коэффициенты.

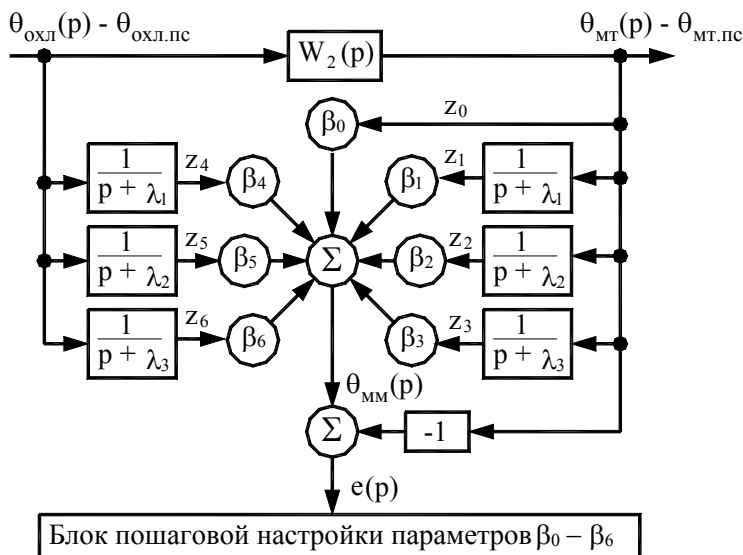


Рис. 1. Структурная схема идентификационного алгоритма

Подставив в (19) оригиналы выражений (14–16), а также выражение (17), получим алгоритм настройки параметров $\beta_0 \dots \beta_6$:

$$\frac{d\beta_i}{dt} = -2\gamma_i e(t, \beta_i) z_i(t), \quad 0 \leq i \leq 6. \quad (20)$$

4. Анализ погрешностей расчета температуры масла трансформатора по тепловой модели ГОСТ 14209-85 и по настраиваемой тепловой модели на основе экспериментальных данных

Экспериментальные исследования временных зависимостей температуры масла и температуры охлаждающей среды проводились авторами данной статьи в 2003 году в г. Гомеле на подстанции «Центролит-220» (автотрансформатор типа АТДЦТН-63000/220). Дата начала измерений: 19.08.2003 г., время начала измерений: 8:48, длительность измерений: 168 часов. В течение всего времени измерений на автотрансформаторе было включено две группы вентиляторов системы охлаждения. Максимальный коэффициент нагрузки автотрансформатора за время измерений был равен 0,095. Из выражения (1) видно, что такая нагрузка не сказывается существенным образом на изменении температуры масла автотрансформатора. Поэтому можно считать, что измерения проводились для режима холостого хода автотрансформатора.

На рис. 2 приведена экспериментальная временная диаграмма для температуры охлаждающей среды (в данном случае температуры воздуха).

На рис. 3–4 приведены экспериментальные и расчетные временные диаграммы для температуры верхних слоев масла автотрансформатора.

Расчетная кривая температуры масла, приведенная на рис. 3, получена на основе тепловой модели ГОСТ 14209-85 [2] и рассчитана по формуле:

$$(\theta_M)_j = \frac{\theta_{M.НОМ}}{6} + 20 \lg \frac{\sum_{i=1}^n 2^{\frac{(\theta_{охл})_i}{6}}}{n},$$

где j – номер интервала расчета; n – количество равных временных интервалов, на которые необходимо разбить график температуры охлаждающей среды; $\theta_{M.НОМ}$ – номинальная температура масла, которая для трансформаторов систем охлаждения ДЦ, в соответствии с ГОСТ 14209-85, составляет 40 °С.

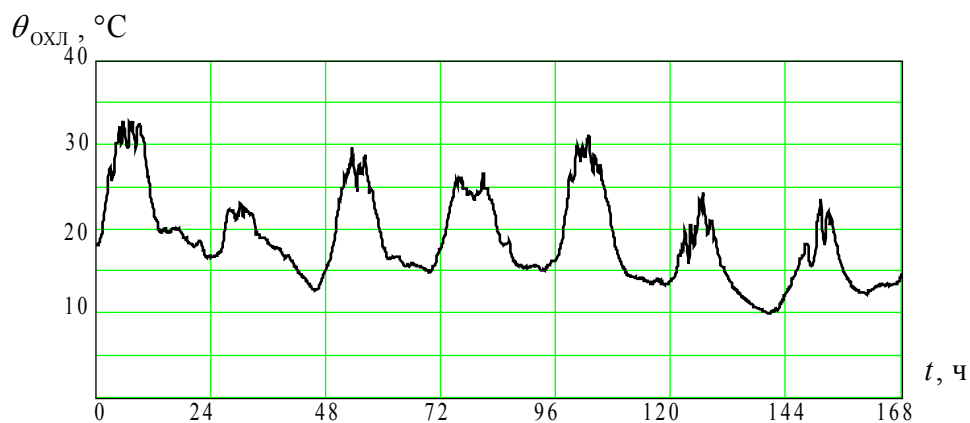


Рис. 2. Экспериментальная временная диаграмма для температуры воздуха

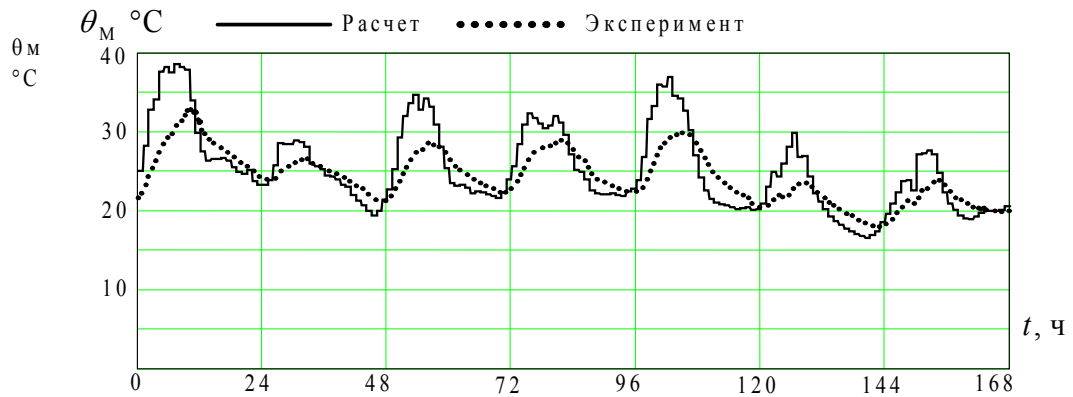


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная (по тепловой модели ГОСТ 14209-85) временные диаграммы для температуры масла автотрансформатора

Расчетная кривая температуры масла, приведенная на рис. 4, получена на основе соотношений (5), (10) и (20).

Для анализа погрешностей расчета температуры масла по рассматриваемым тепловым моделям введем *показатели качества тепловой модели*.

Пусть $(\Delta\theta_M)_j$ – абсолютная погрешность расчета температуры масла на интервале расчета (или измерения) j . То есть

$$(\Delta\theta_M)_j = (\theta_{MT})_j - (\theta_M)_j.$$

В качестве показателя качества будем рассматривать величину:

$$\Delta\theta_{M, \text{МАКС}} = \max \left\{ |(\Delta\theta_M)_j| \right\}.$$

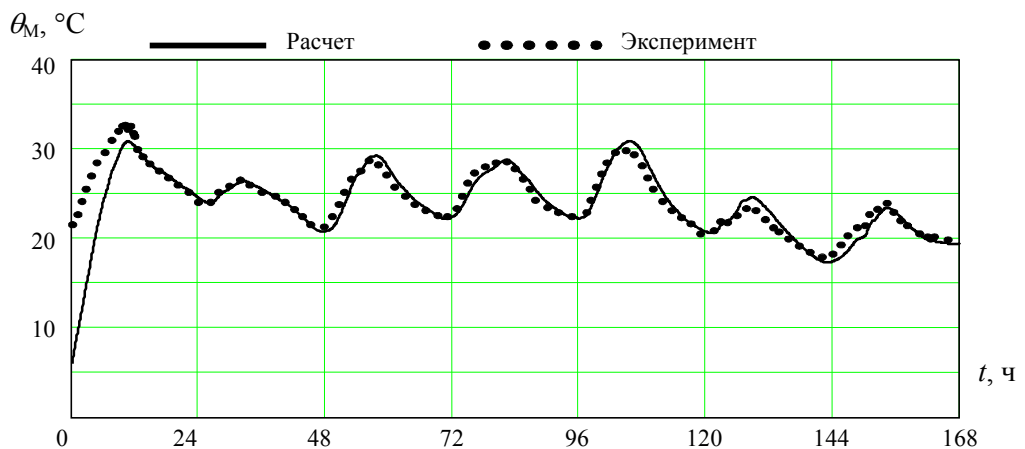


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная (по настраиваемой тепловой модели) временные диаграммы для температуры масла автотрансформатора

Погрешность $\Delta\theta_{M, \text{МАКС}}$ характеризует *диапазон точности* тепловой модели, то есть границы, в которых могут находиться значения величин $(\Delta\theta_M)_j$.

Рассмотрим также среднее значение вектора $(\Delta\theta_M)_j$ как показатель качества тепловой модели:

$$\Delta\bar{\theta}_M = \frac{\sum_{j=1}^n [(\Delta\theta_M)_j]}{n},$$

где n – количество интервалов на расчетном промежутке времени.

Величина $\Delta\bar{\theta}_M$ характеризует ошибку расчета температуры масла в статике, то есть по постоянной составляющей.

Для анализа качества тепловой модели в динамике будем рассчитывать коэффициент корреляции [8]:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n [(\theta_M(j) - \bar{\theta}_M) \cdot (\theta_{MT}(j) - \bar{\theta}_{MT})]}{\sqrt{\sum_{j=1}^n [\theta_M(j) - \bar{\theta}_M]^2 \cdot \sum_{j=1}^n [\theta_{MT}(j) - \bar{\theta}_{MT}]^2}},$$

где

$$\bar{\theta}_M = \frac{\sum_{j=1}^n \theta_M(j)}{n}, \quad \bar{\theta}_{MT} = \frac{\sum_{j=1}^n \theta_{MT}(j)}{n}.$$

Результаты расчета показателей качества исследуемых тепловых моделей сведены в таблице.

Таблица

Значения показателей качества тепловых моделей

Тепловая модель	Показатели качества тепловой модели		
	$\Delta\theta_{M, \text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$ \Delta\bar{\theta}_M , ^\circ\text{C}$	$ r $
ГОСТ 14209-85 (МЭК 354)	9,2	1,02	0,8
Настраиваемая с четырьмя однородными телами	1,7	0,03	0,95

Таким образом, применение настраиваемой тепловой модели позволило значительно снизить погрешность расчета температуры масла как в статике, так и в динамике.

Выводы

1. Настраиваемая тепловая модель позволяет с более высокой точностью рассчитывать температуру верхних слоев масла трансформатора, чем тепловая модель, принятая в ГОСТ 14209-85.

2. Настройку параметров тепловой модели достаточно проводить для режима холостого хода трансформатора.

3. Сравнивая расчетные значения температуры масла, полученные по настраиваемой тепловой модели, и экспериментальные значения, можно выявлять ненормальный нагрев силового трансформатора, обусловленный его внутренними повреждениями или неисправностями в системе охлаждения.

Литература

1. Боднар, В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов /В.В. Боднар. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987.
3. IEC loading guide for oil immersed power transformers. IEC Revision of Publication 354, draft 2, 1991.
4. Зализный, Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 КВ /Д.И. Зализный //Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3-4.
5. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы /А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989.
6. Куропаткин, П.В. Оптимальные и адаптивные системы /П.В. Куропаткин. – М.: Высшая школа, 1980.
7. Киричков, В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами /В.Н. Киричков. – К.: Выща школа, 1990.
8. Закс, Л. Статистическое оценивание /Л. Закс. – М.: Статистика, 1976.

Получено 05.07.2004 г.