

*А.Н. РАССАЛЬСКИЙ*, канд. техн. наук, зав. каф., ЗНТУ, Запорожье

*А.Р. ЛУЧКО*, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

*С.П. КОНОГРАЙ*, аспирант, ЗНТУ, Запорожье

*А.А. ГУК*, аспирант, ЗНТУ, Запорожье

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ РАСЧЕТА НАГРЕВА ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В статті розглянута теплова модель силового автотрансформатора, що дозволяє оцінити температуру його елементів у режимі експлуатації. Виконано порівняння результатів розрахунку за методикою ГОСТ 14209-97 і запропонованої моделі.

В статье рассмотрена тепловая модель силового автотрансформатора, которая позволяет оценить температуру его элементов в режиме эксплуатации. Выполнено сравнение результатов расчета по методике ГОСТ 14209-96 и предложенной тепловой модели.

**Введение.** Силовые масляные трансформаторы являются важным и капиталоемким оборудованием энергетических систем. Обеспечение работы трансформатора в условиях, близких к номинальным по температуре и износу изоляции, является важнейшей технико-экономической задачей. Так как отклонение от номинального режима работы приводит либо к повышенному износу изоляции трансформатора, либо к недоиспользованию его мощности.

Значения допустимых перегрузок и их продолжительность, а, следовательно, мощность трансформаторов рассчитываются с учетом допустимого нагрева активных частей, определяемого классом нагревостойкости применяемой изоляции. До настоящего времени не разработаны простые и надежные устройства, обладающие достаточной точностью и надежностью, для непосредственного определения температуры токоведущих частей высоковольтных трансформаторов. Поэтому, нагрузки на силовые трансформаторы ограничивают значениями допустимых перегрузок, полученных на основе математического моделирования тепловых процессов. Точность моделирования нестационарных (переходных) тепловых процессов определяет величину допустимых нагрузок силовых трансформаторов, влияет на эффективность и надежность работы всей системы электроснабжения.

Существующие алгоритмы расчета нагрузочной способности силовых трансформаторов созданы на основе алгоритмов, разработанных по упрощенным тепловым моделям.

**Цель работы** – разработка новых алгоритмов расчета нестационарных тепловых режимов работы силовых трансформаторов.

**1. Обзор существующих математических моделей.** Наиболее критичной температурой, ограничивающей нагрузку трансформатора, является температура, достигаемая в наиболее нагретой части обмотки (ТННТ).

Расчетные методы определения ТННТ изложены в ГОСТ 14209-97 [1]. В данном стандарте при расчете ТННТ принимается ряд упрощений, снижающих достоверность расчета. Например, стандарт при расчете не учитывает постоянную времени обмотки, а, следовательно, не может адекватно определить температуру ННТ как функцию времени при резком изменении коэффициента нагрузки. Кроме того, ГОСТ 14209-97 оперирует данными среднестатистических трансформаторов, которые отличаются от данных, получаемых в результате тепловых испытаний трансформаторов.

На сегодняшний день существует более современный международный стандарт МЭК 60076-7 "Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов" [2]. Предложенные в стандарте алгоритмы больше подходят для расчета температуры обмотки при динамических тепловых режимах. Но, к сожалению, в математической модели применяются данные среднестатистических трансформаторов, снижающие точность расчета температуры обмотки конкретно взятого трансформатора.

Поэтому применение методик, позволяющих более точно определять температуру ННТ обмотки, является актуальной задачей.

Реализация полученных алгоритмов моделирования тепловых процессов в виде прикладных программ позволит более широко применять их для расчета нагрузочной способности силовых трансформаторов в условиях эксплуатации. Использование предлагаемых в работе технических решений и алгоритмов позволит повысить точность расчета температуры обмотки в режиме эксплуатации.

**2. Разработка тепловой математической модели** на примере автотрансформатора АОДТН-417000/750/500-У1. Предлагаемая тепловая модель базируется на идее аналогии тепловых и электрических процессов [3-5]. На основе вышеуказанной идеи составлены электрические схемы замещения тепловых процессов в переходном и установившемся тепловых режимах автотрансформатора (рис. 1). При составлении схем замещения применялись аналогии между следующими

физическими величинами:

- тепловым потоком  $P$  и электрическим током;
- приращением температуры  $\Delta\theta$  и разностью потенциалов;
- тепловым сопротивлением  $R_{th}$  и электрическим сопротивлением;
- теплоемкостью  $C_{th}$  и электрической емкостью.

На схемах (рис. 1) используются следующие обозначения элементов:  $b$  – бак и элементы конструкции автотрансформатора;  $fe$  – электротехническая сталь;  $nn$ ,  $oo$ ,  $po$ ,  $ko$ ,  $ro$  – низкого напряжения, общая, последовательная, компенсационная, регулировочная обмотки соответственно;  $oil$  – масло;  $ohl1(2,3,4)$  – охладитель 1(2,3,4).

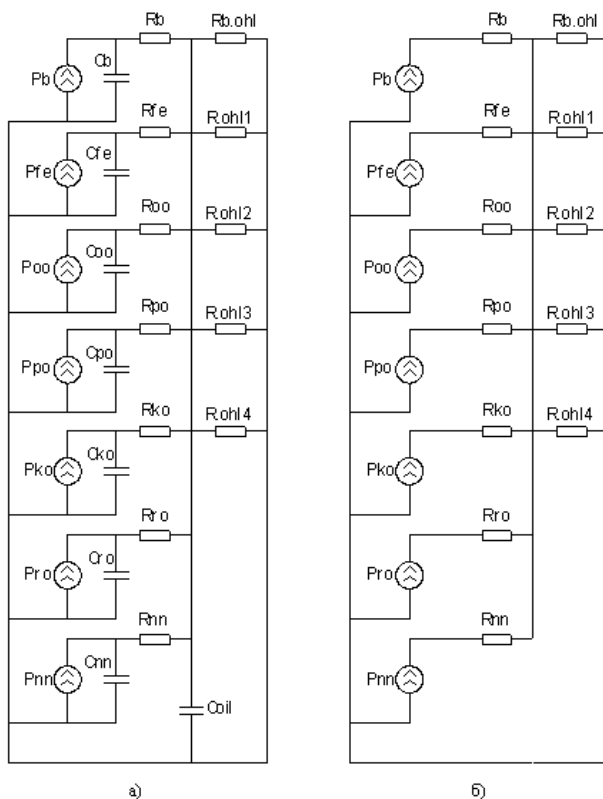


Рис. 1. Электрические схемы замещения тепловых процессов автотрансформатора АОДТН-417000/750/500-У1 в переходном (а) и установившемся (б) тепловом режимах

Для электрической схемы замещения переходных тепловых процессов (рис. 1, а) запишем систему однородных дифференциальных уравнений (ДУ) в обычном виде (1).

Для возможности варьирования во времени тепловых потоков в математическую модель вводится переменный коэффициент нагрузки  $K(t)$ . При этом учитывается, что потери в обмотках, а, следовательно, и тепловые потоки пропорциональны квадрату тока нагрузки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \theta_b(t) \cdot C_b = K(t)^2 \cdot P_b - \theta_b(t) \cdot \frac{1}{R_b} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_b}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{fe}(t) \cdot C_{fe} = P_{fe} - \theta_{fe}(t) \cdot \frac{1}{R_{fe}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{fe}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{oo}(t) \cdot C_{oo} = K(t)^2 \cdot P_{oo} - \theta_{oo}(t) \cdot \frac{1}{R_{oo}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{oo}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{po}(t) \cdot C_{po} = K(t)^2 \cdot P_{po} - \theta_{po}(t) \cdot \frac{1}{R_{po}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{po}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{ko}(t) \cdot C_{ko} = K(t)^2 \cdot P_{ko} - \theta_{ko}(t) \cdot \frac{1}{R_{ko}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{ko}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{ro}(t) \cdot C_{ro} = K(t)^2 \cdot P_{ro} - \theta_{ro}(t) \cdot \frac{1}{R_{ro}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{ro}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{nn}(t) \cdot C_{nn} = K(t)^2 \cdot P_{nn} - \theta_{nn}(t) \cdot \frac{1}{R_{nn}} + \theta_{oil}(t) \cdot \frac{1}{R_{nn}}; \\ \frac{d}{dt} \theta_{oil}(t) \cdot C_{oil} = \theta_b(t) \cdot \frac{1}{R_b} + \theta_{fe}(t) \cdot \frac{1}{R_{fe}} + \theta_{oo}(t) \cdot \frac{1}{R_{oo}} + \dots \\ \dots + \theta_{po}(t) \cdot \frac{1}{R_{po}} + \theta_{ko}(t) \cdot \frac{1}{R_{ko}} + \theta_{ro}(t) \cdot \frac{1}{R_{ro}} + \theta_{nn}(t) \cdot \frac{1}{R_{nn}} - \dots \\ \dots - \theta_{oil}(t) \cdot \left( \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_{fe}} + \frac{1}{R_{oo}} + \frac{1}{R_{po}} + \frac{1}{R_{ko}} + \frac{1}{R_{ro}} + \frac{1}{R_{nn}} + \frac{1}{R_{ohl}} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

Исходные данные для решения системы ДУ взяты из расчета и протоколов тепловых испытаний головного образца автотрансформатора, предоставленные заводом-изготовителем. А именно:

- массы, теплоемкости элементов;
- тепловые сопротивления элементов;
- тепловые потери в элементах автотрансформатора.

Начальные условия:  $\theta_b = \theta_{fe} = \theta_{oo} = \theta_{ko} = \theta_{ro} = \theta_{nn} = \theta_{oil} = 0$ .

Решим вышеуказанную систему в среде MathCAD методом Рунге-Кутты с фиксированным шагом, используя встроенную функцию rkfixed.

Результат решения системы дифференциальных уравнений относительно температуры последовательной обмотки  $\theta_{po}(t)$ , имеющей максимальную температуру среди других рассматриваемых элементов автотрансформатора, представлен в графическом виде (сплошной линией) на графике (рис. 2). При этом изменяющийся во времени коэффициент нагрузки  $K(t)$  представлен штриховой линией (рис. 2).

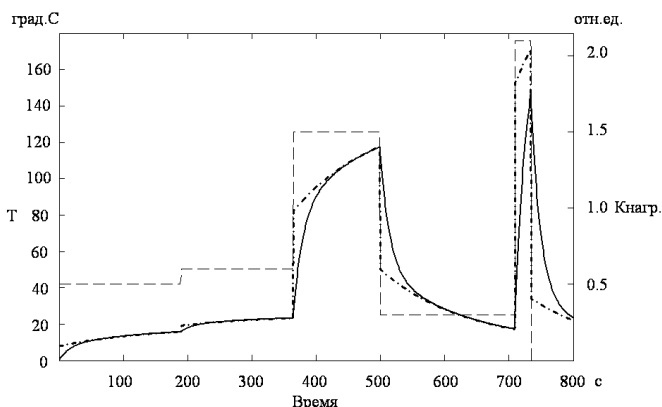


Рис. 2. Результаты расчета температуры последовательной обмотки автотрансформатора АОДТН-417000/750/500-У1 в соответствии с ГОСТ 14209-97 и по предложенной тепловой модели

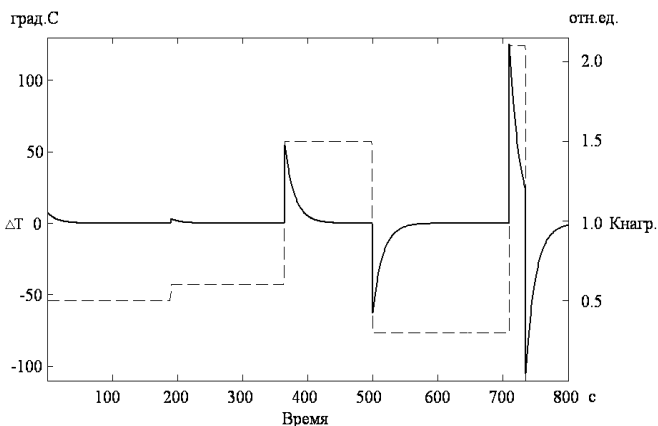


Рис. 3. Разность результатов расчета температуры последовательной обмотки автотрансформатора АОДТН-417000/750/500-У1 в соответствии с ГОСТ 14209-97 и по предложенной тепловой модели

### 3. Сравнение результатов расчета температуры обмотки по ме-

тодике ГОСТ 14209-97 и по разработанной тепловой модели. Теперь рассчитаем температуру последовательной обмотки по методике ГОСТ 14209-97 в соответствии со следующим формулой:

$$\theta_{po}(t) = \theta_{oil}(t) + \Delta\theta_{po.oil} \cdot K(t)^2, \quad (2)$$

где  $\theta_{oil}(t)$  – температура верхних слоев масла, °С;  $\Delta\theta_{po.oil}$  – превышение температуры последовательной обмотки над температурой масла, °С;  $K(t)$  – коэффициент нагрузки, отн. ед.

Результат расчета температуры обмотки по методике ГОСТ 14209-97 представлен штрих-пунктирной линией на графике (рис. 2).

Разность результатов расчета температуры обмотки по ГОСТ 14209-97 и по разработанной тепловой модели представлена в графическом виде (сплошной линией) на графике (рис. 3). Как видно из рисунка, при резком повышении коэффициента нагрузки с 0,6 отн.ед. до 1,5 отн.ед. в первый момент времени разница между рассчитанными температурами обмотки составила 55 °С, а при скачке коэффициента нагрузки с 0,3 отн.ед. до 2,1 отн.ед. разница достигла 125 °С.

**Выводы.** Применяемый в настоящее время в ГОСТ 14209-97 алгоритм расчета ТННТ обмотки трансформаторов основывается на упрощенных тепловых моделях, что снижает точность расчета. Особенно это заметно в динамических тепловых режимах при резком изменении тока нагрузки. Это связано в первую очередь с тем, что стандарт не учитывает постоянную времени обмоток и теплоемкости элементов трансформатора при расчете. Такая погрешность методики ГОСТ 14209-97 не приемлема для определения степени старения изоляции, так как износ будет заведомо завышен.

Разработанная тепловая модель автотрансформатора позволяет получить более точный результат расчета ТННТ обмотки по сравнению с методикой ГОСТ 14209-97, так как базируется на решении дифференциальных уравнений теплопереноса при произвольном изменении во времени тока нагрузки и температуры окружающей среды.

**Список литературы:** 1. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Введ. 30.12.98. 2. IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Vol. 14/512/FDIS, Sept. 2005. 3. В.В. Козлов. Проблеми моделювання теплових режимів у силових трансформаторах // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2001. – № 2. – С. 36-38. 4. Б.Н. Юдаев. Техническая термодинамика. Теплопередача. – М.: Высш. шк., 1998. – 479 с. 5. Л.А. Коздоба. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.

*Поступила в редколлегию 23.10.2008*