

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ ПРОЕКТНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**Е.Ю. КОМКОВ (ОАО “Ивэлектронладка”),
А.И. ТИХОНОВ (ИГЭУ)**

Предложена система, позволяющая отслеживать режимы работы трансформатора и на основании полученной информации выполнять моделирование тепловых процессов с выдачей рекомендаций по оптимальному управлению охлаждением.

Современное состояние энергетики характеризуется ростом потребляемых мощностей. При этом повышенные требования предъявляются к силовым трансформаторам, суммарная мощность которых в 5–6 раз превышает генераторную мощность. Наиболее ответственными в этом отношении являются блочные трансформаторы с принудительным охлаждением, работающие в паре с генератором. Поэтому актуальной является проблема оптимизации жизненного цикла блочных трансформаторов, предполагающая создание математических моделей, позволяющих на основе информации о конструкции трансформатора и результатах мониторинга прогнозировать протекание физических процессов в различных режимах и повышать надежность эксплуатации трансформатора. В частности, особое внимание следует уделить оптимизации температурного режима трансформатора, так как колебание температуры масла может привести к сокращению ресурса трансформатора.

Разработанная проектно-диагностическая модель предназначена для расчета трансформатора мощностью до 400 000 кВА класса напряжения до 500 кВ с принудительной системой охлаждения.

Математическую модель трансформатора W можно представить как:

$$W = \langle P, F \rangle, \quad (1)$$

$$P = \{P_i \mid P_i \in P \subset \mathcal{R} \wedge P_i = P_i(F)\}, \quad (2)$$

$$F = \{F_i \mid F_i \in F \wedge F_i(P) = \text{true}\}. \quad (3)$$

Здесь P – множество переменных, являющееся подмножеством множества вещественных чисел \mathcal{R} ; F – множество логических выражений, описывающих отношения между переменными.

Проектная модель трансформатора реализована на базе однонаправленной функции f , осуществляющей поверочный расчет, преобразуя некоторое подмножество входных величин \tilde{P} , характеризующих конструкцию трансформатора, в подмножество выходных величин \hat{P} , характеризующих работу трансформатора (рис. 1).

Таким образом, множество P является объединением двух подмножеств:

$$P = \tilde{P} \cup \hat{P}. \quad (4)$$

В свою очередь, подмножество \tilde{P} объединяет подмножества фиксированных переменных \bar{P} и варьируемых переменных \tilde{P} :

$$\tilde{P} = \bar{P} \cup \tilde{P}. \quad (5)$$

Множество \hat{P} состоит из подмножеств результирующих значений $P^=$ и требуемых значений P^* :

$$\hat{P} = P^= \cup P^*. \quad (6)$$

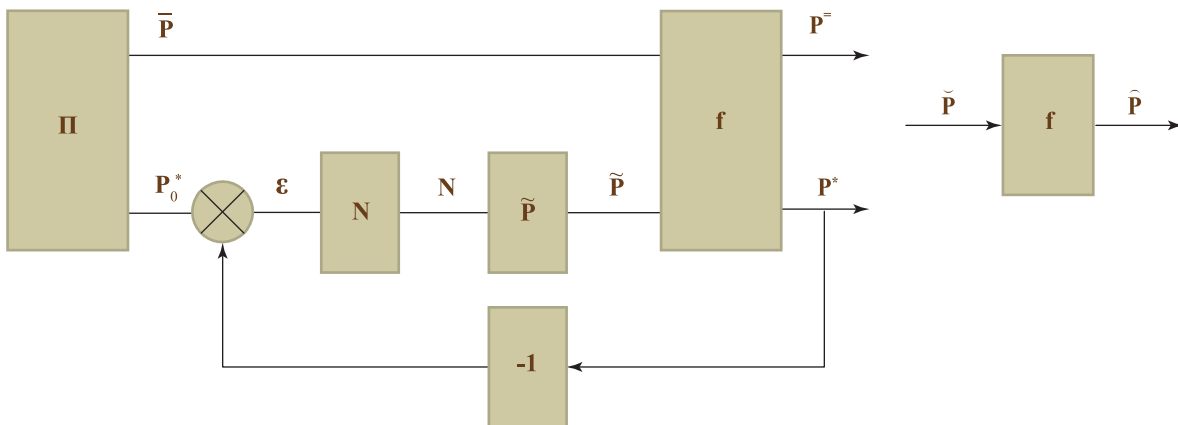


Рис. 1. Структурная схема подсистемы проектирования трансформатора

Задача поиска решения состоит в том, чтобы определить значения всех переменных множества \tilde{P} при фиксированных значениях множества \bar{P} , которые бы обеспечили совпадение значений переменных множества P^* с теми значениями P_0^* , которые заданы проектировщиком в начале поиска при произвольных значениях переменных множества P^* .

Схема поиска решения представлена на рис. 1. Здесь Π – проектировщик, задающий значения переменных из множеств \bar{P} и P_0^* . На каждом шаге поиска рассчитываются отклонения $\varepsilon_i = P_{i0}^* - P_i^*$ и среднеквадратичная невязка:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{N^*} \left(\frac{P_{i0}^* - P_i^*}{P_{i0}^*} \right)^2}{N^*}, \quad (7)$$

Задача считается решенной, если найдено такое состояние множества \tilde{P} , при котором обеспечивается равенство $P^* = P_0^*$. Поиск решения осуществляется путем минимизации невязки (7) методом Дэвидона-Флетчера-Пауэлла.

Проектная модель силового трансформатора используется при управлении системой охлаждения. Поэтому особое внимание в ней уделено тепловому расчету. Модуль теплового расчета предназначен для определения установившихся значений температуры в характерных точках трансформатора. К основным отношениям теплового расчета можно отнести:

- 1) логарифмическую разность температур между маслом и воздухом, °С:

$$\Delta \vartheta_{м-в} = \frac{P}{k_{F_2} F_2 N_t L_t}, \quad (8)$$

где P – тепловой поток, отводимый охладителями;

N_t – число труб охладителя,

L_t – длина трубы охладителя;

k_{F_2} – коэффициент теплопередачи;

- 2) мощность двигателя насоса, Вт:

$$P_{д.н.} = \frac{1}{\eta_n \eta_{д.н.}} \frac{\Delta p_M}{\rho_M} G_M, \quad (9)$$

где $\eta_n = 0,7$ – КПД насоса;

$\eta_{д.н.} = 0,75$ – КПД двигателя насоса;

Δp_M – падение статического давления со стороны масла;

G_M – массовый расход масла;

ρ_M – средняя плотность масла;

- 3) суммарную мощность двигателей двух вентиляторов, Вт:

$$P_B = \frac{1}{\eta_v \eta_{д.в.}} \frac{\Delta p_B}{\rho_B} G_B, \quad (10)$$

где $\eta_v = 0,6$ – КПД вентилятора;

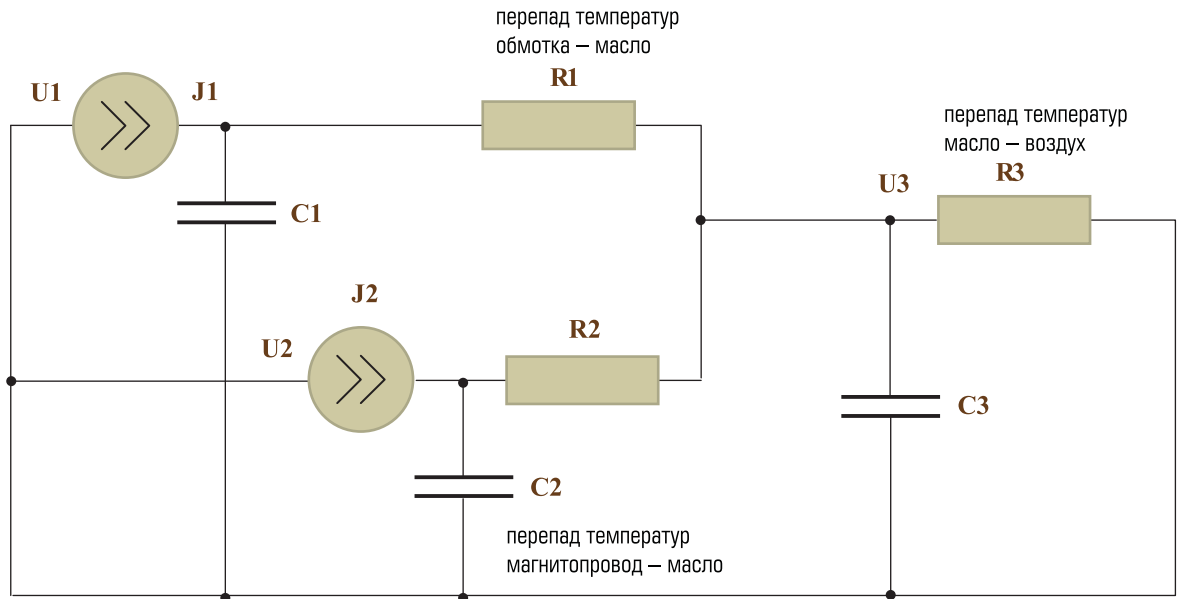
$\eta_{д.в.} = 0,7$ – КПД двигателя вентилятора;

Δp_B – падение статического давления со стороны масла;

G_B – массовый расход масла;

ρ_B – средняя плотность воздуха.

Для управления системой охлаждения трансформатора необходимо строить прогноз изменения температур во времени в зависимости от основных возмущающих факторов: температуры окружающей среды и нагрузки трансформатора. Электрическая схема замещения тепловых процессов пред-



▲ Рис. 2. Электрическая схема замещения тепловых процессов

ставлена на рис. 2. Количеству теплоты, накопленной в отдельных телах, соответствуют емкости C_1, C_2, C_3 ; тепловым сопротивлениям соответствуют электрические сопротивления R_1, R_2, R_3 ; превышения температуры над температурой окружающей среды соответствуют потенциалы U_1, U_2, U_3 ; потерям в обмотках и потерям в магнитопроводе соответствуют источники тока J_1, J_2 [1].

В момент времени t превышения температуры обмотки, магнитопровода и масла над температурой охлаждающей среды составят соответственно $\Delta v_1, \Delta v_2$ и Δv_3 . За время dt эти превышения температур изменяются на величину $d(\Delta v_1)$ (для обмотки), $d(\Delta v_2)$ (для магнитопровода), $d(\Delta v_3)$ (для масла).

Уравнения динамики тепловых процессов в обмотке, магнитопроводе и масле соответственно:

$$dt = \frac{m_1 c_1 d(\Delta v_1)}{P_{обм} - F_1 \alpha_1 (\Delta v_1 - \Delta v_3)}, \quad (11)$$

$$dt = \frac{m_2 c_2 d(\Delta v_2)}{P_{xx} - F_2 \alpha_2 (\Delta v_2 - \Delta v_3)}, \quad (12)$$

$$dt = \left[\frac{m_1 c_1 d(\Delta v_1)}{F_3 \alpha_3 (\Delta v_3 + t_B)} + \frac{m_2 c_2 d(\Delta v_2)}{F_3 \alpha_3 (\Delta v_3 + t_B)} + \frac{m_3 c_3 d(\Delta v_3)}{F_3 \alpha_3 (\Delta v_3 + t_B)} \right], \quad (13)$$

Введем обозначения:

$$a_1 = m_1 c_1; a_2 = m_2 c_2; a_3 = m_3 c_3; b_1 = F_1 \alpha_1; b_2 = F_2 \alpha_2; b_3 = F_3 \alpha_3; dx_1 = d(\Delta v_1); dx_2 = d(\Delta v_2); dx_3 = d(\Delta v_3); x_1 = \Delta v_1; x_2 = \Delta v_2; x_3 = \Delta v_3; P_1 = P_{обм}; P_2 = P_{xx}.$$

Получаем систему уравнений процесса охлаждения трансформатора:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{b_1}{a_1} x_1 + \frac{b_1}{a_1} x_3 + \frac{P_1}{a_1}; \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{b_2}{a_2} x_2 + \frac{b_2}{a_2} x_3 + \frac{P_2}{a_2}; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{b_1}{a_3} x_1 + \frac{b_2}{a_3} x_2 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3} (x_3 + t_B). \end{cases} \quad (14)$$

Для решения (14) необходимо найти коэффициенты a_1, a_2, a_3 , характеризующие массогабаритные показатели трансформатора, и b_1, b_2, b_3 , определяющие процессы теплопередачи, которые могут быть рассчитаны на основании информации, полученной из проектной модели.

С целью минимизации погрешности расчета производится экспериментальное уточнение коэффициента b_3 , определяющего теплоотдачу в окружающую среду. Для этого используется подсистема мониторинга, предоставляющая экспериментальные данные о температуре верхних слоев масла, температуре воздуха и нагрузке трансформатора для всех комбинаций включения аппаратов системы охлаждения на выбранном отрезке времени.

Для поиска уточненного значения коэффициента b_3 используется несколько фрагментов кривой изменения температуры в верхних слоях масла в функции времени, построенной на основе данных мониторинга (рис. 3). Для данного интервала времени формируется система уравнений (14). В нее подставляются реальные изменения во времени потерь трансформатора и температуры окружающей среды за рассматриваемый промежуток времени.

Поиск значения b_3 реализуется методом переменной метрики. В качестве функции цели используется среднеквадратичное расхождение между расчетной кривой, получаемой путем решения системы уравнений (14), и реальной кривой в точках фиксации значений подсистемой мониторинга.

Полученные таким образом коэффициенты b_3 для различных режимов работы системы охлаждения являются наиболее точными.

Для моделирования управляющего воздействия необходимо в начале каждого трехчасового интервала:

- строить прогноз нагрузки и температуры окружающей среды на следующие 3 ч с использованием нейросетевой модели;
- строить прогнозы температуры верхних слоев масла на следующие 3 ч при различном числе задействованных охладителей с использованием тепловой динамической модели;
- выбрать вариант, обеспечивающий заданную температуру верхних слоев масла в конце данного 3 ч интервала.

Разработанная модель позволяет решать задачи управления с учетом возможных колебаний температуры окружающей среды и нагрузки трансформатора.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОХЛАЖДЕНИЕМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Оптимальное управление охлаждением силового трансформатора может обеспечить поддержание заданного температурного режима работы оборудования. Принцип оптимального управления системой охлаждения заключается в принятии решения о необходимости включения/отключения аппаратов системы охлаждения.

Работа системы происходит по следующему принципу (рис. 4). Система фиксирует значение нагрузки трансформатора, темпе-

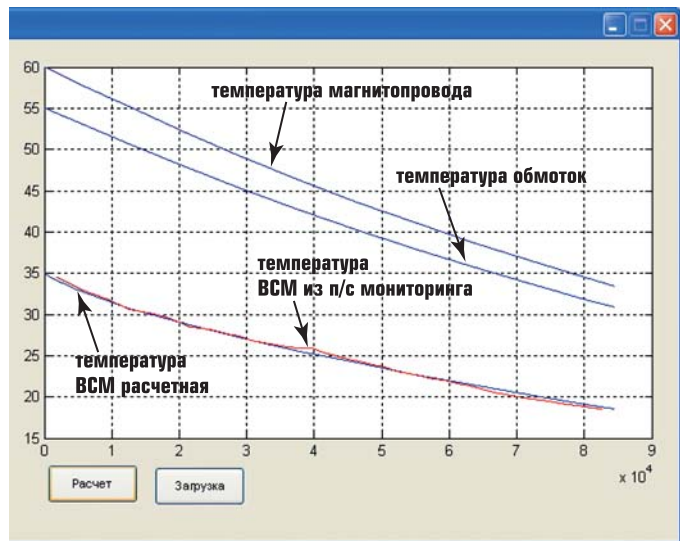


Рис. 3. Процесс поиска коэффициента b_3 для различных режимов работы системы охлаждения

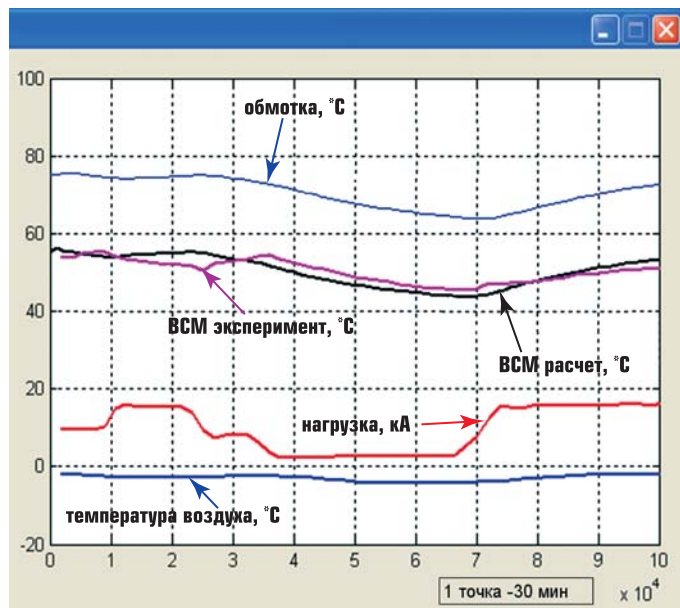


Рис. 4. Результаты работы модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов

ратуры окружающей среды и количество аппаратов охлаждения. На основе этих данных с помощью тепловой динамической модели строится серия прогнозов изменения температуры в верхних слоях масла на ближайшие 3 часа для разных вариантов включения системы охлаждения (кривые 1, 2, 3, 4, 5). Из этих вариантов выбирается тот, который приводит к достижению через 3 часа температуры, близкой к требуемой. Следующий прогноз строится, исходя из вновь фиксируемых данных си-

стемы мониторинга, которые в общем случае могут отличаться от результатов предыдущего прогноза. С учетом инертности тепловых процессов интервал времени в 3 часа оказывается достаточным, чтобы обеспечить колебание температуры в верхних слоях масла вокруг требуемого значения.

Сравнение результатов моделирования с данными системы мониторинга показывают достаточно точное совпадение, что дает право говорить о работоспособности созданной модели.

С помощью разработанного алгоритма осуществляется оптимальное управление системой охлаждения. Оптимальность определяется минимальным потреблением энергии системой охлаждения при поддержании заданной температуры верхних слоев масла.

В настоящее время разработанная система проходит стадию опытной эксплуатации на генерирующем предприятии и используется для выдачи рекомендаций по управлению охлаждением на трех блочных трансформаторах ТДЦ 400000/500 [2].

В задачи обслуживающего персонала входит наблюдение за показаниями системы и адекватная реакция на рекомендации (прогноз). Правильность работы системы проверяется путем сравнения и анализа работы системы с действительной ситуацией на объекте. Решение о включении/отключении охладителей в данном случае остается за че-

ловеком. После окончания процесса опытной эксплуатации система может работать в автоматическом режиме, для чего должны быть предусмотрены дополнительные исполнительные устройства включения/отключения охладителей.

Таким образом, разработана система, позволяющая отслеживать режимы работы трансформатора и на основании полученной информации выполнять моделирование тепловых процессов с выдачей рекомендаций по оптимальному управлению охлаждением. Поддержание одной температуры благотворно сказывается на общем состоянии трансформатора и продлевает срок его службы.

Список литературы

1. *Киш Л.* Нагрев и охлаждение трансформаторов М.: Энергия. 1980 г.
2. *Комков Е.Ю.* Разработка модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов / *Комков Е.Ю., Тихонов А.И.* // Автоматизация в промышленности. – 2008. – №8, с. 45 – 47.

Комков Евгений Юрьевич – канд. техн. наук
ОАО “Ивэлектронладка”

Тихонов Андрей Ильич – д-р техн. наук,
профессор ИГЭУ (г. Иваново)

ОАО “Ивэлектронладка”, г. Иваново, ул.

Ташкентская, д. 90, телефон: 8 (4932) 230-230,
www.iem.ru

e-mail: komkov_eyu@iem.ru