

УДК 621.317.39

**АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКАХ И
МАСЛЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА И РАЗРАБОТКА СПОСОБА
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК**

А. А. Стребков, инженер-энергетик

АО «Мелитопольский мясокомбинат»

e-mail: sashko@yandex.ru

А. Ю. Вовк, кандидат технических наук, доцент

Таврический государственный агротехнологический университет

e-mail: aleksvovk020405@gmail.com

*С. А. Квитка, кандидат технических наук, зав. кафедрой электротехники и
электромеханики им. профессора В. В. Овчарова*

Таврический государственный агротехнологический университет

e-mail: sergei.kvitka@yandex.ua

Аннотация. При диагностировании тепловых режимов силовых трансформаторов требуется контроль температуры обмоток. Наиболее доступным способом определения температуры обмотки силового трансформатора во время его эксплуатации является контроль температуры трансформаторного масла. Существующие на сегодняшний день способы диагностирования тепловых режимов работы силовых трансформаторов предполагают не прямое измерение температуры, не учитывая загрузку трансформатора. Поэтому был предложен косвенный способ контроля температуры обмоток силового трансформатора измерением температуры верхних слоев масла и кратности силы электрического тока. Проведен сравнительный анализ тепловых переходных процессов обмоток и масла силового трансформатора. Исследование тепловых переходных процессов в обмотках и масле силового трансформатора показало, что косвенное измерение температуры обмотки возможно путем измерения температуры верхних слоев масла. В результате проведенных экспериментальных исследования выявлено, что разработанная математическая модель расчета температуры обмоток через температуру масла, кратности сил фазных электрических токов и паспортные данные трансформатора с высокой степенью точности позволяет определить температуру обмоток силового трансформатора, что может быть использовано при разработке устройства измерения температуры обмоток. Поэтому на основании математической модели была разработана структурная схема устройства измерения температуры обмоток силового трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, температура, обмотка, масло, переходный процесс, диагностирование, тепловой.

Актуальность. При диагностировании тепловых режимов силовых трансформаторов требуется контроль температуры обмоток. Установка преобразователей температуры в обмотки представляет трудности как с технической точки зрения, так и с позиции техники безопасности. Поэтому возникает необходимость контроля температуры обмоток косвенным путем.

Анализ последних исследований и публикаций. Современные методы диагностирования трансформаторов предполагают контроль температуры обмотки путем измерения сопротивления обмоток [1]. Также для диагностирования состояния изоляции применяется оборудование, позволяющее по химическому анализу трансформаторного масла судить о степени износа изоляционной конструкции [2].

В [3] предложен метод определения температуры масла силового трансформатора, однако при этом не учитывается уровень загрузки трансформатора, что существенно сказывается на точности оценки теплового состояния обмотки.

Сегодня существует много методов диагностирования тепловых режимов силовых трансформаторов. Практически все они предполагают измерение температуры обмотки силового трансформатора косвенным способом [4], что вызывает необходимость в исследовании тепловых процессов в трансформаторе.

В [5] исследованы тепловые переходные процессы в силовых трансформаторах и получены зависимости, позволяющие рассчитывать тепловые параметры трансформаторов при любой загрузке. Однако не получены закономерности изменения температуры масла в зависимости от температуры обмоток. К тому же в работе [6] были получены экспериментальные зависимости температуры верхних слоев масла от времени, которые показали, что предложенная в [5] математическая модель нуждается в доработке.

Наиболее доступным способом определения температуры обмотки силового трансформатора во время его эксплуатации является контроль температуры трансформаторного масла. Однако, несмотря на большое количество работ,

посвященных исследованию тепловых переходных процессов в отдельных элементах конструкции трансформатора, остаются неисследованными закономерности изменения температуры масла в зависимости от температуры обмоток при различной нагрузке трансформатора.

В статье предложено контролировать температуру обмоток силового трансформатора измерением температуры верхних слоев масла и кратности силы электрического тока, для чего необходимо проведение сравнительного анализа тепловых переходных процессов обмоток и масла силового трансформатора.

Целью статьи является исследование тепловых переходных процессов в обмотках и масле силового трансформатора и разработка устройства измерения температуры обмоток силового трансформатора.

Материалы и методы исследования. Для исследования тепловых переходных процессов в обмотках и масле силового трансформатора были использованы результаты работ [4-5]. На их основании получены зависимости для количественной оценки изменения температуры верхних слоев масла в зависимости от температуры обмоток и кратности сил электрических токов.

Результаты исследования и их обсуждение.

Исследование тепловых переходных процессов в обмотках и масле силового трансформатора.

Тепловую схему замещения силового трансформатора представим, как систему из двух тел: 1 – обмотки силового трансформатора, 2 – масло с магнитопроводом.

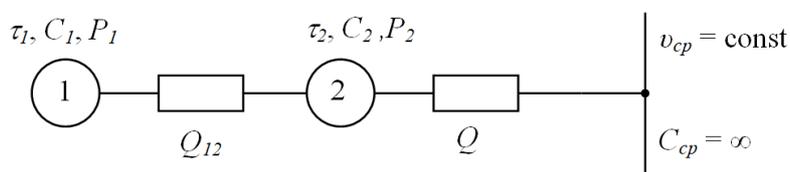


Рис.1. Тепловая схема замещения силового трансформатора

Между телами существует тепловая проводимость Q_{12} , между внутренними телами и окружающей средой – тепловая проводимость Q . Теплоемкость тел

соответственно равна C_1 и C_2 . В первом теле выделяется активная мощность P_1 , во втором – P_2 .

Составим уравнение теплового баланса для каждого тела:

$$C_1 d\tau_1 + Q_{12}(\tau_1 - \tau_2) dt = P dt, \quad (1)$$

$$C_2 d\tau_2 + Q\tau_2 dt = P_2 dt + Q_{12}(\tau_1 - \tau_2) dt. \quad (2)$$

Перепишем уравнения (1) и (2) в операторной форме:

$$(pC_1 + Q_{12})\tau_1 - Q_{12}\tau_2 = \frac{P_1}{p}, \quad (3)$$

$$-Q_{12}\tau_1 + (pC_2 + Q_{12} + Q)\tau_2 = \frac{P_2}{p}. \quad (4)$$

Решим уравнения (3) и (4) относительно превышений температур тел τ_1 и τ_2 , для чего найдем главный и частные определители:

$$\begin{aligned} \Delta(p) &= \begin{vmatrix} pC_1 + Q_{12} & -Q_{12} \\ -Q_{12} & pC_2 + Q_{12} + Q \end{vmatrix} = \\ &= p^2 C_1 C_2 + p(C_2 Q_{12} + C_1(Q_{12} + Q)) + Q Q_{12}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta_1(p) &= \begin{vmatrix} \frac{P_1}{p} & -Q_{12} \\ \frac{P_2}{p} & pC_2 + Q_{12} + Q \end{vmatrix} = \\ &= \frac{P_1(pC_2 + Q_{12} + Q) + P_2 Q_{12}}{p}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} pC_1 + Q_{12} & \frac{P_1}{p} \\ -Q_{12} & \frac{P_2}{p} \end{vmatrix} = \frac{P_2(pC_1 + Q_{12}) + P_1 Q_{12}}{p}. \quad (7)$$

Записываем превышения температуры тел в операторной форме, учитывая, что

$$\tau_1(p) = \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)}, \quad (8)$$

$$\tau_2(p) = \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)}, \quad (9)$$

$$\tau_1(p) = \frac{l_1 p + t_1}{p(kp^2 + lp + t)}, \quad (10)$$

$$\tau_2(p) = \frac{m_1 p + n_1}{p(kp^2 + lp + t)}, \quad (11)$$

где

$$l_1 = P_1 C_2, \quad (12)$$

$$t_1 = P_1(Q_{12} + Q) + P_2 Q_{12}, \quad (13)$$

$$k = C_1 C_2, \quad (14)$$

$$l = C_2 Q_{12} + C_1(Q_{12} + Q), \quad (15)$$

$$t = Q Q_{12}, \quad (16)$$

$$m_1 = P_2 C_1, \quad (17)$$

$$n_1 = Q_{12}(P_1 + P_2). \quad (18)$$

Исследуем нагрев обмотки. Введем обозначения:

$$F_1(p) = l_1 p + t_1, \quad (19)$$

$$F_2(p) = kp^2 + l_1 p + t. \quad (20)$$

Перепишем (10) с учетом введенных обозначений:

$$\tau_1(p) = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)}. \quad (21)$$

Уравнение $F_2(p) = 0$ имеет два различных и не равных нулю корня $-p_1$ и p_2 , поэтому

$$\tau_1 = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_2'(p_2)} e^{p_2 t}, \quad (22)$$

где

$$F_2'(p) = 2kp + l. \quad (23)$$

Перепишем уравнение (22) в следующем виде:

$$\tau_1 = \tau_{1y} + \tau'_{1y} e^{-\frac{t}{T}} + \tau''_{1y} e^{-\frac{t}{T'}}, \quad (24)$$

где

$$\tau_{1y} = t_1 / t, \quad (25)$$

$$\tau'_{1y} = \frac{l_1 p_1 + t_1}{p_1(2kp_1 + l)}, \quad (26)$$

$$\tau''_{1y} = \frac{l_1 p_2 + t_1}{p_2(2kp_2 + l)}, \quad (27)$$

$$T' = 1 / p_1, \quad (28)$$

$$T'' = 1/p_2. \quad (29)$$

В (24) обозначены следующие величины: τ_{1y} – установившееся превышение температуры обмотки, °С; τ'_{1y} и τ''_{1y} – парциальные установившиеся превышения температуры обмотки, °С; T' и T'' – парциальные постоянные времени нагрева обмотки, с; t – текущее время, с.

В окончательном виде уравнение нагрева обмоток запишем следующим образом:

$$\tau_1 = \tau'_{1y}(1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{1y}(1 - e^{-\frac{t}{T''}}). \quad (30)$$

Следует обратить внимание, что потери активной мощности в обмотке могут быть записаны следующим образом:

$$P_1 = \kappa^2 P_{1н}, \quad (31)$$

где $P_{1н}$ – потери активной мощности в обмотке в номинальном режиме работы, Вт; κ – кратность силы тока трансформатора.

Поэтому τ'_{1y} и τ''_{1y} являются функциями кратности силы электрического тока трансформатора.

Исследуем нагрев масла. Введем обозначения:

$$F_1(p) = m_1 p + n_1, \quad (32)$$

$$F_2(p) = kp^2 + lp + t. \quad (33)$$

Перепишем (11) с учетом введенных обозначений:

$$\tau_2(p) = \frac{F_1(p)}{pF_2(p)}. \quad (34)$$

Уравнение $F_2(p) = 0$ имеет два различных и не равных нулю корня – p_1 и p_2 , поэтому

$$\tau_2 = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \frac{F_1(p_1)}{p_1 F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{p_2 F_2'(p_2)} e^{p_2 t}, \quad (35)$$

где
$$F_2'(p) = 2kp + l. \quad (36)$$

Перепишем уравнение (35) в следующем виде:

$$\tau_2 = \tau_{2y} + \tau'_{2y} e^{-\frac{t}{T'}} + \tau''_{2y} e^{-\frac{t}{T''}}, \quad (37)$$

где
$$\tau_{2y} = n_1 / t, \quad (38)$$

$$\tau'_{2y} = \frac{m_1 p_1 + n_1}{p_1 (2k p_1 + l)}, \quad (39)$$

$$\tau''_{2y} = \frac{m_1 p_2 + n_1}{p_2 (2k p_2 + l)}, \quad (40)$$

$$T' = 1 / p_1, \quad (41)$$

$$T'' = 1 / p_2. \quad (42)$$

В (37) обозначены следующие величины: τ_{2y} – установившееся превышение температуры масла, °С; τ'_{2y} и τ''_{2y} – парциальные установившиеся превышения температуры масла, °С; T' и T'' – парциальные постоянные времени нагрева масла, с.

В окончательном виде уравнение нагрева масла запишем следующим образом:

$$\tau_2 = \tau'_{2y} (1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau''_{2y} (1 - e^{-\frac{t}{T''}}). \quad (43)$$

Как и для обмотки, парциальные составляющие превышения температуры масла также являются функцией кратности силы электрического тока.

Запишем выражения температур тел:

$$\vartheta_1 = \tau_1 + \vartheta_{cp}, \quad (44)$$

$$\vartheta_2 = \tau_2 + \vartheta_{cp}, \quad (45)$$

где ϑ_1 и ϑ_2 – температуры обмоток и масла, °С; ϑ_{cp} – температура окружающей среды, °С.

Запишем выражение температуры обмоток через температуру масла:

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 + (\tau_1 - \tau_2). \quad (46)$$

Определение постоянных математической модели температуры обмоток

В математической модели температуры обмоток имеются следующие постоянные физические величины: теплоемкости тел 1 и 2 соответственно C_1 и C_2 ; потери активной мощности в телах 1 и 2 соответственно P_1 и P_2 ; тепловые

проводимости между телами и окружающей средой – Q_{12} и Q ; интервал времени измерения температуры масла и расчета температуры обмоток – t_i ; парциальные постоянные времени нагрева обмоток и масла – T' и T'' ; коэффициенты характеристического уравнения p_1 и p_2 .

Найдем метод определения тепловых проводимостей. Для этого перепишем систему уравнений (1) и (2) в установившемся номинальном режиме работы:

$$Q_{12}(\tau_{1н} - \tau_{2н}) = P_{1н}, \quad (47)$$

$$Q\tau_{2н} - Q_{12}(\tau_{1н} - \tau_{2н}) = P_{2н}. \quad (48)$$

Решая совместно (47) и (48), находим:

$$Q = \frac{P_{1н} + P_{2н}}{\tau_{2н}}. \quad (49)$$

Подставив выражение Q в (48), находим:

$$Q_{12} = \frac{P_{1н}}{\tau_{1н} - \tau_{2н}}. \quad (50)$$

Таким образом, для нахождения значений тепловых проводимостей необходимо знать значения активных мощностей, теряемых в телах 1 и 2, и значения установившихся превышений температур тел 1 и 2 в номинальном режиме работы.

Номинальные потери активной мощности в обмотках $P_{1н}$ по паспортным (каталожным) данным принимаем равными потерям активной мощности в опыте короткого замыкания трансформатора, а потери активной мощности в магнитопроводе – равными потерям активной мощности в опыте холостого хода трансформатора, то есть:

$$P_{1н} = P_{кз}, \quad (51)$$

$$P_{2н} = P_{хх}. \quad (52)$$

Номинальные превышения температур обмоток и масла определяются по паспортным данным трансформаторов.

Теплоемкости тел рассчитываются по конструктивным данным трансформатора. Корни характеристического уравнения и постоянные времени нагрева рассчитываются по приведенным выше выражениям.

По приведенным выше данным вычисляются: $l_1, t_1, k, l, t, m_1, n_1$.

В качестве материального объекта экспериментального исследования принимаем силовой трансформатор типа ТМ-25/10 с номинальной мощностью 25 кВА и линейным напряжением 10 000 В.

Вначале определим значения постоянных величин математической модели нагрева трансформатора.

Значение теплоемкости обмоток силового трансформатора (тела 1) равно:

$$C_1 = c_1 m_1, \quad (53)$$

где c_1 – удельная теплоемкость материала обмоток трансформатора, Дж/кг $^{\circ}$ С; m_1 – масса обмоток трансформатора, кг. $c_1 = 380$ Дж/кг $^{\circ}$ С; $m_1 = 27,3$ кг.

Тогда $C_1 = 10374$ Дж/ $^{\circ}$ С.

Значение суммарной теплоемкости магнитопровода и масла (тела 2) равно:

$$C_2 = c_{мп} m_{мп} + c_{м} m_{м}, \quad (54)$$

где $c_{мп}$ и $c_{м}$ – соответственно удельные теплоемкости материалов магнитопровода и масла трансформатора, Дж/кг $^{\circ}$ С; $m_{мп}$ и $m_{м}$ – соответственно массы магнитопровода и масла трансформатора, кг.

$c_{мп} = 470$ Дж/кг $^{\circ}$ С; $c_{м} = 2014$ Дж/кг $^{\circ}$ С; $m_{мп} = 87,14$ кг; $m_{м} = 112$ кг.

Тогда $C_2 = 40956 + 225568 = 266524$ Дж/ $^{\circ}$ С.

Принимаем потери активной мощности в номинальном режиме работы в обмотках равными потерям в опыте короткого замыкания, а потери активной мощности в магнитопроводе – равными потерям в опыте холостого хода:

$$P_{1н} = 645 \text{ Вт}; P_{2н} = 170 \text{ Вт}.$$

Тепловые проводимости находим по формулам (49) и (50). Превышение температуры обмоток и масла в номинальном режиме работы находим по данным эксперимента:

$$\tau_{1н} = 56^{\circ}\text{С}; \tau_{1н} = 46^{\circ}\text{С}.$$

Подставив значения физических величин в (49) и (50), находим значения тепловых проводимостей:

$$Q = 17,7 \text{ Вт}/^{\circ}\text{С}; Q_{12} = 64,5 \text{ Вт}/^{\circ}\text{С}.$$

Находим постоянную величину l_1 по (12):

$$l_1 = 171907980 \text{ Bm}^2 \text{ c} / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину t_1 по (13):

$$t_1 = 63984 \text{ Bm}^2 / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину k по (14):

$$k = 2764919976 \text{ Bm}^2 \text{ c}^2 / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину l по (15):

$$l = 18043541 \text{ Bm}^2 \text{ c} / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину t по (16):

$$t = 1142 \text{ Bm}^2 \text{ c}^2 / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину m_1 по (17):

$$m_1 = 1763580 \text{ Bm}^2 \text{ c} / ^\circ \text{C}.$$

Находим постоянную величину n_1 по (18):

$$n_1 = 52568 \text{ Bm}^2 \text{ c} / ^\circ \text{C}.$$

Приравниваем уравнение (20) к нулю и находим корни при номинальной нагрузке трансформатора:

$$2764919976p^2 + 18043541p + 1142 = 0;$$

$$p_1 = -6,4 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}; \quad p_2 = -0,0064 \text{ c}^{-1}.$$

Находим установившееся превышение температуры обмоток в номинальном режиме работы по (25):

$$\tau_{1y} = 56^\circ \text{C}.$$

Находим парциальное установившееся превышение температуры обмоток при номинальном режиме работы по (26) для уравнения (24):

$$\tau'_{1y} = -46,8^\circ \text{C}.$$

Находим парциальное установившееся превышение температуры обмоток при номинальном режиме работы по (27) для уравнения (24):

$$\tau''_{1y} = -9,3^\circ \text{C}.$$

Находим парциальные постоянные времени нагрева при номинальном режиме работы по (28) и (29):

$$T' = 15625c,$$

$$T'' = 156c.$$

В окончательном виде уравнение нагрева обмоток запишем следующим образом:

$$\tau_1 = 46,8(1 - e^{-\frac{t}{15625}}) + 9,3(1 - e^{-\frac{t}{156}}). \quad (55)$$

Анализ выражения (55) показывает, что парциальная постоянная времени нагрева обмотки T'' в 100 раз меньше парциальной постоянной времени нагрева обмотки T' , то есть парциальная составляющая превышения температуры обмотки τ_1'' наступает практически мгновенно по сравнению с парциальной составляющей превышения температуры обмотки τ_1' . Поэтому уравнение (30) с достаточной степенью точности может быть записано следующим образом:

$$\tau_1 = \tau_{1y}'(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{1y}''. \quad (56)$$

Перепишем уравнение (56) в следующем виде:

$$\tau_1 = \tau_1' + \tau_{1y}'', \quad (57)$$

где при нагреве с холодного состояния

$$\tau_1' = \tau_{1y}'(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (58)$$

Находим установившееся превышение температуры масла при номинальном режиме работы по (38):

$$\tau_{2y} = 46^\circ C.$$

Находим парциальное установившееся превышение температуры масла при номинальном режиме работы по (39) для уравнения (37):

$$\tau_{2y}' = -46,3^\circ C.$$

Находим парциальное установившееся превышение температуры масла при номинальном режиме работы по (40) для уравнения (37):

$$\tau_{2y}'' = 0,3^{\circ}C.$$

В окончательном виде уравнение нагрева масла запишем следующим образом:

$$\tau_2 = 46,3(1 - e^{-\frac{t}{15625}}) + 0,3(1 - e^{-\frac{t}{156}}). \quad (59)$$

Анализ выражения (59) показывает, что парциальная постоянная времени нагрева масла T'' в 100 раз меньше парциальной постоянной времени нагрева T' . То есть парциальная составляющая превышения температуры масла τ_2'' наступает практически мгновенно по сравнению с парциальной составляющей превышения температуры масла τ_2' . Поэтому уравнение (43) с достаточной степенью точности может быть записано следующим образом:

$$\tau_2 = \tau_{2y}'(1 - e^{-\frac{t}{T'}}) + \tau_{2y}''. \quad (60)$$

Перепишем уравнение (60) в следующем виде:

$$\tau_2 = \tau_2' + \tau_{2y}'', \quad (61)$$

где при нагреве с холодного состояния

$$\tau_2' = \tau_{2y}'(1 - e^{-\frac{t}{T'}}). \quad (62)$$

Зависимости l_1 , t_1 , n_1 в функции кратности силы электрического тока, потребляемого трансформатором, запишутся следующим образом:

$$l_{1i} = \kappa_i^2 P_{1H} C_2, \quad (63)$$

$$t_{1i} = \kappa_i^2 P_{1H} (Q_{12} + Q) + P_2 Q_{12}, \quad (64)$$

$$n_{1i} = Q_{12} (\kappa_i^2 P_{1H} + P_2). \quad (65)$$

Запишем выражение температуры обмотки на i -ом участке при нагреве, начиная с горячего состояния:

$$\vartheta_{1i} = \vartheta_{2i} + (\tau_{1i} - \tau_{2i}), \quad (66)$$

где

$$\tau_{1i} = \tau_{1yi}'(1 - e^{-\frac{t_i}{T'}}) + \tau_{1i-1}' e^{-\frac{t_i}{T'}} + \tau_{1yi}'', \quad (67)$$

$$\tau_{2i} = \tau'_{2yi}(1 - e^{-\frac{t_i}{T'}}) + \tau'_{2i-1}e^{-\frac{t_i}{T'}} + \tau''_{2yi}. \quad (68)$$

Введем следующие обозначения:

$$e^{-\frac{t_i}{T'}} = b, \quad (69)$$

$$1 - e^{-\frac{t_i}{T'}} = a. \quad (70)$$

Перепишем уравнения (67) и (68) с учетом введенных обозначений:

$$\tau_{1i} = \tau'_{1yi}a + \tau'_{1i-1}b + \tau''_{1yi}, \quad (71)$$

$$\tau_{2i} = \tau'_{2yi}a + \tau'_{2i-1}b + \tau''_{2yi}. \quad (72)$$

С учетом (71) и (72) перепишем уравнение (66):

$$\vartheta_{1i} = \vartheta_{2i} + a(\tau'_{1yi} - \tau'_{2yi}) + b(\tau'_{1i-1} - \tau'_{2i-1}) + \tau''_{1yi} + \tau''_{2yi}. \quad (73)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что разработанная математическая модель позволяет с высокой степенью точности определить температуру обмоток силового трансформатора, измеряя температуру масла и сил токов в обмотках трансформатора, что может быть использовано при разработке устройств измерения температуры обмоток. Структурная схема определения температуры обмоток, которая может быть положена в основу данных устройств, показана на рис.2.

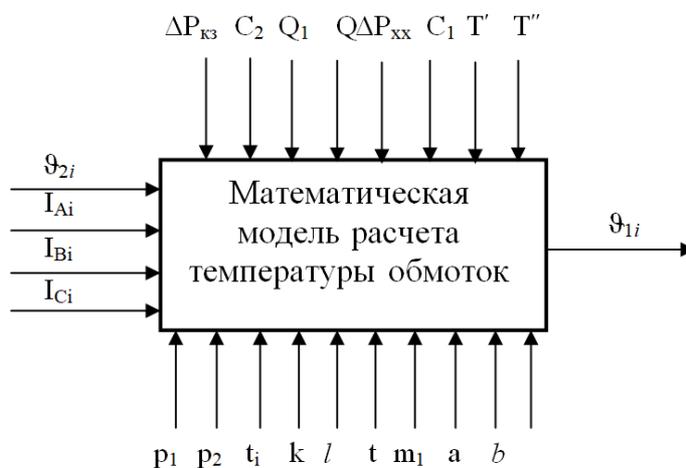


Рис.2. Структурная схема определения температуры обмоток обмоток силового трансформатора

Выводы

1. Исследование тепловых переходных процессов в обмотках и масле силового трансформатора показало, что косвенное измерение температуры обмотки возможно путем измерения температуры верхних слоев масла.

2. Экспериментальные исследования показали, что разработанная математическая модель расчета температуры обмоток через температуру масла, кратности сил фазных электрических токов и паспортные данные трансформатора с высокой степенью точности позволяет определить температуру обмоток силового трансформатора, что может быть использовано при разработке устройства измерения температуры обмоток.

3. На основании математической модели разработана структурная схема устройства определения температуры обмоток силового трансформатора.

Список литературы

1. Привалов Е. Е. Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов: учебное пособие / Е.Е. Привалов. – М.- Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 82 с.

2. Хисматуллин А.С. Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов / А. С. Хисматуллин, М. Е. Шептунов // Научный альманах. – 2016. – №12-2(26). – С. 159-161.

3. Sami Najar Jean-Francois Tissier Sebastien Cauet Erik Etien Improving thermal model for oil temperature estimation in power distribution transformers // Applied Thermal Engineering. – Vol. 119, 5 June 2017. – P. 73-78.

4. Рассальский А. Н. Система мониторинга и управления силовых трансформаторов / А. Н. Рассальский // Електротехніка і електромеханіка. – 2005. – №2. – С. 46-50.

5. Залитый Д. И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ / Д. И. Залитый // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – №3-4. – С. 51-60.

6. Рунов Ю.А. Учет температуры внешней охлаждающей среды при моделировании тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах / Ю. А. Рунов, О. Г. Широков, Д. И. Залитый., Д. М. Лось // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2004. – №5. – С. 42-47.

References

1. Privalov, E. E. (2015). Diagnostika oborudovaniya silovykh maslyanykh transformatorov [Diagnostics of power oil transformers equipment]. Moscow- Berlin: Direkt-Media, 82.

2. Khismatullin, A. S., Sheptunov, M. E. (2016). Monitoring i diagnostika silovykh transformatorov [Monitoring and diagnostics of power transformers]. Nauchnyy al'manakh, 12-2(26), 159-161.
3. Sami Najjar, Jean-Francois, Tissier, Sebastien, Cauet, Erik Etien (2017). Improving thermal model for oil temperature estimation in power distribution transformers. Applied Thermal Engineering. 119, 5 June 2017, 73-78.
4. Rassal'skiy, A. N. (2005). Sistema monitoringa i upravleniya silovykh transformatorov [Power transformer monitoring and control system]. Elektrotehnika i elektromekhanika, 2, 46-50.
5. Zalityy, D. I. (2001). Ispol'zovaniye teplovoy modeli dlya teoreticheskikh issledovaniy teplovykh protsessov v maslyanykh transformatorakh 10/0,4 kV [The use of a thermal model for theoretical studies of thermal processes in oil transformers 10/0,4 kV]. Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo. 3-4, 51-60.
6. Runov, YU. A., Shirokov, O. G., Zalityy, D. I., Los', D. M. (2004). Uchet temperatury vneshney okhlazhdayushchey sredy pri modelirovaniy teplovykh protsessov v silovykh maslyanykh transformatorakh [Account of External Cooling Medium Temperature while Modeling Thermal Processes in Power Oil-Immersed Transformers]. Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG, 5, 42-47.

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ І МАСЛІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТА РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК

О.А. Стребков, О.Ю. Вовк, С.О. Квітка

***Анотація.** При діагностуванні теплових режимів силових трансформаторів потрібно контролювати температуру обмоток.*

Сучасні методи діагностики трансформаторів передбачають контроль температури обмотки за допомогою вимірювання опору обмоток. Так само для діагностики стану ізоляції застосовується обладнання, що дозволяє за хімічним аналізом трансформаторних оливо судити про ступінь зносу ізоляційної конструкції

Метою дослідження є аналіз теплових перехідних процесів у обмотках та масі силового трансформатора та розробка пристрою вимірювання температури обмоток силового трансформатора.

Пропонується непрямий спосіб вимірювання температури верхнього шару оливо та кратності сил електричного струму. Проведено порівняльний аналіз теплових перехідних процесів обмоток і оливо силового трансформатора. Розроблено математичну модель обчислення температури обмоток через температуру оливо трансформатора та на її основі розроблена структурна схема вимірювання температури обмоток силового трансформатора.

Ключові слова: *силовий трансформатор, температура, обмотка, олива, перехідний процес, діагностування, тепловий*

ANALYSIS OF THERMAL TRANSIENTS IN THE WINDINGS AND THE OIL OF A POWER TRANSFORMER AND A METHOD FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF WINDINGS

A. Strebkov, A. Vovk, S. Kvitka

Abstract. *When diagnosing the thermal modes of power transformers, the temperature of the windings is required.*

Modern methods of diagnosing transformers assume control of the winding temperature by measuring the resistance of the windings. Also, in order to diagnose the isolation state, equipment is used which allows the chemical analysis of the transformer oil to be judged about the degree of wear of the insulating structure

The purpose of the study is to analyze the thermal transition processes in the windings and oil of the power transformer and to develop a device for measuring the temperature of the windings of the power transformer.

An indirect way of controlling the temperature of the windings of a power transformer by measuring the temperature of the upper layers of oil and the multiplicity of the electric current is proposed. A comparative analysis of thermal transient processes of windings and oils of a power transformer has been carried out. A mathematical model for calculating the temperature of windings through oil temperature of a transformer was developed and on its basis a structural scheme of the device for measuring the temperature of the windings of the power transformer was developed.

Keywords: *power transformer, temperature, winding, oil, transient process, diagnostics, thermal*