

А.А. КИРАКОСЯН

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ПЛОТНОСТИ ТОКА ОБМОТКИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЕСТЕСТВЕННЫМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Ձերմային հետադարձ կապի օգնությամբ որոշվում է բնական օդային հովացումով տրանսֆորմատորի ցածր լարման փաթույթի հոսանքի խտության մեծությունը կարճ միակցման U_k լարման, ձողի հատվածքին արտագծված շրջանագծի d տրամագծի ընտրությունից կախված: Հոդվածում օգտագործված է գնդային ծավալ հասկացությունը, որի օգնությամբ որոշվում է հարթ տրանսֆորմատորի մագնիսապարփակիչի անկյունային մասի պողպատի զանգվածը և մագնիսապարփակիչի զանգվածի նախնական արժեքը:

Дается понятие обратной тепловой связи, на основе чего определяется плотность тока в обмотке низкого напряжения трансформаторов с естественным воздушным охлаждением при значениях напряжения к.з. U_k , выбранного диаметра сечения стержня d , описываемого кругом, и класса изоляции. Использовано понятие объема шара, с помощью которого определяются масса угла магнитопровода трансформаторов и предварительное значение массы магнитопровода.

Библиогр.: 4 назв.

A concept of return thermal connection is given, and the current density in the low voltage winding of transformers with natural air cooling is defined at the short circuit voltage values U_s , the chosen diameter of the core section d described by a circle, as well as the class isolation. The ball volume concept is used, by means of which the angle weight of the transformer magnetic circuit and the preliminary weight value of the magnetic circuit are determined.

Ref. 4.

При проектировании трансформаторов с естественным воздушным охлаждением важное значение имеет правильный выбор величины плотности тока обмотки низкого напряжения (НН), т.к. она находится в менее благоприятных условиях (в смысле охлаждения), чем обмотки высокого напряжения (ВН). Исследование результатов теплового расчета трансформаторов с естественным воздушным охлаждением по [1] показало, что данная методика не дает возможность оптимизации при различных значениях U_k . Для принятого высокого класса изоляции при ограниченных ГОСТом потерях не реализуются все возможности данного класса изоляции и становится целесообразным переходить на изоляцию классом ниже, а при больших значениях U_k для обеспечения допустимых перегревов потери берутся ниже допустимых, что приводит к перерасходу активных материалов. В связи с этим возникает необходимость создания обратной связи между допустимым перегревом и электромагнитными

нагрузками. В данной работе формула максимального перегрева температуры обмотки НН над окружающим воздухом преобразована так, чтобы получить в окончательном виде зависимость средней плотности тока $\delta_{\text{ср}}$ от диаметра стержня магнитопровода d_c и допустимого максимального перегрева $\tau_{\text{НН}}$: $\delta_{\text{ср}} = f(d; \tau_{\text{НН}})$.

Перегрев обмотки НН определяем по [1]. Так как класс изоляции обеих обмоток трансформатора одинаковый, то принимаем, что максимальные значения перегревов обмоток НН и ВН равны $\tau_{\text{ВН}} = \tau_{\text{НН}}$ (°C), т. е. $\Delta\tau'_{\text{НН2}} = 0$. Следовательно,

$$\tau_{\text{НН}} = \tau'_{\text{НН}} - \Delta\tau'_{\text{НН1}}. \quad (1)$$

Подставив значения $\tau'_{\text{НН}}$ и $\Delta\tau'_{\text{НН1}}$ в (1), получим

$$P_{\text{ННК}} = (O_{\text{ННЭ}}/O_{\text{МЭ}}) \times \\ \times \sqrt[0.8]{(\tau_{\text{НН}}(O_{\text{НН}} O_{\text{МЭ}})^{0.8} + 0,36(0,5O_1 P_0)^{0.8}) / (0,36((O_{\text{НН}})^{0.8} + (0,5O_1)^{0.8}))}, \quad (2)$$

где $O_{\text{ННЭ}}$ - эффективно охлаждаемая поверхность обмотки НН, определяемая по [1]:

$$O_{\text{ННЭ}} = \alpha_{\text{НН}} O_{\text{НН}}; \quad (3)$$

P_0 - потери холостого хода; $P_{\text{ННК}}$ - потери к.з. обмотки НН, определяемые по [2]:

$$P_{\text{ННК}} = \rho \delta_{\text{НН}} K_A \sigma_{\text{НН}} \cdot 10^3 / \gamma_0; \quad (4)$$

$O_{\text{МЭ}}$ - эффективно охлаждаемая поверхность магнитопровода, m^2 ; O_1 - внешняя поверхность обмотки НН.

Подставив значение $G_{\text{НН}}$ в [2] и обозначив

$K_1 = 2a_{01} + 11K_d \sqrt[4]{S/c}$, $K_2 = \rho K_{\text{кр}} S 10^6 / 1,1 l f B_c K_c$, получим

$$P_{\text{ННК}} = \delta_{\text{НН}} K_2 (d + K_1/d^2). \quad (5)$$

Совместное решение (5) и (4) дает

$$\delta_{\text{НН}} = P_{\text{ННК}} d^2 / (K_2 (d + K_1)). \quad (6)$$

Подставив значения из [1] в (3) и обозначив

$$K_3 = c n_{\text{НН}} a_{\text{СНН}} n_{\text{СНН}}, K_4 = 2a_{01} + a_{12} + 22K_d \sqrt[4]{S/c}, K_5 = a_{01}/2 + a_{\text{КНН}} + a_{\text{КННЦ}},$$

получим

$$O_{\text{ННЭ}} = (\pi(d + K_4)/K_u d^4)^{3/4} (4\pi c(d + K_1) - K_3) \times \\ \times \left(0,21 \sqrt[4]{(d(1 - \sqrt{K_{\text{кр}}}) + 4K_5)^{1.6}} \right) 10^{-6}. \quad (7)$$

Потери холостого хода равны

$$P_0 = K_{\text{ПЯ}} K_{\text{ПП}} K_{\text{ПШ}} [K_{\text{ПР}} K_{\text{ПЗ}} K_{\text{ПО}} (p_c G_c + p_{\text{Я}} G_{\text{Я}} + p_{\text{СР}} (6G_{\text{УГЛ}} K_{\text{ПУГЛ}}) + \\ + \sum p_3 n_3 \Pi_3], \quad (8)$$

где $K_{\text{П}}$ - дополнительные потери (см. [3]); p_c и $p_{\text{Я}}$ - удельные потери стали в стержне и ярмах, $p_c = p_{\text{Я}} = K_{p1} - \sqrt{K_{p2} - (K_{p3} + B_c)^2}$; K_{p1} , K_{p2} и K_{p3} зависят от марки стали; p_3 - удельные потери в стыках [1].

При расчете параметров холостого хода магнитная система делится на участки: стержни, ярма и углы. Полная масса стали магнитопровода равна сумме масс этих участков:

$$G_{ст} = 6G_y + G_c + G_y, \quad (9)$$

$$G_c = G_c' + G_c'', \quad (10)$$

$$G_y = 2(C-1)L_{MO}\Pi_c Y_{ст} - 4 G_y, \quad (11)$$

где G_y , G_c , G_y – соответственно масса одного угла, стержней и ярм.

В существующих методиках [3-4] масса углов рассчитывается достаточно точно, однако формула имеет сложный вид и неудобна при аналитических исследованиях. Исходя из вышеизложенного, предлагается новая формула, менее точная, но достаточная для предварительных и исследовательских расчетов:

$$G_y = K_3 V_y Y_{ст}, \quad (12)$$

где V_y - объем угла, рассчитываемого как объем шара, диаметр которого определяется исходя из сечения стержня: $d' = 2\sqrt{\Pi_c/\pi}$; K_3 - коэффициент заполнения сталью сечения стержня, зависящий от толщины пластин, вида изоляции пластин, усилия опрессовки стержня σ_d и степени волнистости листов; $Y_{ст}$ - удельная плотность стали, $кг/м^3$.

Так как $\Pi_c = K_{кр}\pi d^2/4$, то $d' = d\sqrt{K_{кр}}$, следовательно,

$$V_y = K_{пр}(d\sqrt{K_{кр}})^3 \pi / 6 = K_{пр} K_{кр} \pi d^3 \sqrt{K_{кр}} / 6, \quad (13)$$

где $K_{пр}$ - коэффициент приведения расчетной площади к реальной, $K_{пр}=1,27$

Подставив (13) в (12) и обозначив

$$K_6 = (\pi K_c K_{пр} \sqrt{K_{кр}} Y_{ст}) / 6,$$

получим

$$G_y = K_6 d^3, \quad (14)$$

где K_c - коэффициент заполнения сталью площади круга описанного стержня, $K_c = K_{кр} K_3$; $K_{кр}$ - соотношение геометрической площади стержня к площади описанного круга, зависящее от числа ступеней в стержне $n_{ст}$ и диаметра описанного круга d_c [3].

Суммарная масса стали участков стержней между ярмами равна

$$C'_c = cL_c Y_{ст} K_3 \Pi_c, \quad (15)$$

где C - число стержней, $C=3$; L_c - высота стержня магнитопровода, $L_c = L + 2L_o$, $м$; L - высота обмотки, $м$; L_o - минимальное изоляционное расстояние между обмотками и ярмом, $м$; Π_c - активное сечение стержня, $м^2$. (Расчет L и Π_c см. в [3]).

Введем обозначения:

$$K_7 = 2a_{01} + 2,2K_d \sqrt{S/c} + 2a_{12}, \quad (16)$$

где K_d в зависимости от мощности трансформатора, металла обмоток, напряжения обмотки и потерь к.з. можно найти по [3].

Подставив (16) в значение L_c , получим: $L_c = \pi(d + K_7) / \beta + 2L_o$, где β - отношение средней длины окружности канала между обмотками к высоте обмотки, определяемое с помощью заданного U_k при $U_k = U_p$ [3]:

$$\beta = (1,11B_c \pi K_c d^2)^2 fU_p \cdot 10 / 7,9a_p K_p S'. \quad (17)$$

Обозначив

$$K_u = c(1,11B_c \pi K_c)^2 fU_p \cdot 10 / 7,9(a_{01} + K_d \sqrt{S/c}) K_p S', \quad (18)$$

а также совместно решив (18) и (17), получим

$$\beta = K_u d^4. \quad (19)$$

Подставив значения P_c из (13) и (19) в (15) и обозначив

$$K_8 = c K_{кр} \pi \gamma_{ст} \pi / 4 K_u, K_9 = 2c K_{кр} \pi \gamma_{ст} K_7 / 4 K_u, K_{10} = 2c K_{кр} \pi \gamma_{ст} L_o / 4, \text{ получим}$$

$$G_c' = K_8/d + K_9/d^2 + K_{10} d^2. \quad (20)$$

Масса стали G_c'' в местах стыка пакета стержня и ярма при $P_c = P_{я}$ равна

$$G_c'' = c \gamma_{ст} K_3 P_c (d-5) - G_y. \quad (21)$$

Подставив (12) и P_c из (13) в (21), получим

$$G_c'' = c \gamma_{ст} K_c \pi ((d^3 - 5d^2) / 4) - K_7 d^3. \quad (22)$$

При решении (21) и (22) с учетом обозначений $K_{11} = c K_c \pi \gamma_{ст} / 4$, $K_{12} = K_{11} - K_6$, $K_{13} = K_{10} - 5K_{11}$, формула (10) принимает вид

$$G_c = K_{11} d^3 + K_{13} d^2 + K_8/d + K_9/d^2. \quad (23)$$

С учетом величины P_c формула (11) принимает вид

$$G_{я} = 2(c-1)L_{MO} K_c d^2 \pi \gamma_{ст} / 4 - 4G_y. \quad (24)$$

Здесь L_{MO} - межжелезное расстояние двух стержней, равное

$$L_{MO} = d_0 + 2a_{01} + 2a_{12} + 2a_2 + a_{22}, \quad (25)$$

где по [3]: $(a_1 + a_2) / 3 = K_d \sqrt{S/c}$.

Введем обозначения: $K_{14} = 2a_{01} + 2a_{12} + a_{22} + 6K_d \sqrt{S/c}$,

$$K_{15} = 2(c-1)K_6/c - 4K_1, K_{11} = K_9 - 2(c-1)K_6/c.$$

Тогда с учетом (12) и (25) формула (24) принимает вид

$$G_{я} = K_{15} d^3 + K_{16} d^2. \quad (26)$$

Подставив (12), (23) и (26) в (8) и обозначив $K_{17} = K_{пЯ} K_{ПП} K_{ППШ}$,

$$K_{18} = K_{ПР} K_{ПЗ} K_{ПО}, K_{19} = 6K_6 K_{пугл} + K_{11} + K_{15}, K_{20} = K_{13} + K_{16}, K_{21} = n_3 K_{кр} \pi^4, \text{ получим}$$

$$P_0 = K_{17} [K_{18} (p_c (K_{19} d^3 + K_{20} d^2 + K_8/d + K_9/d^2) + p_3 K_{21} d^2)]. \quad (27)$$

Эффективно охлаждаемая поверхность магнитопровода равна

$$O_{МЭ} = O_{я} + \alpha_M O_C, \quad (28)$$

где O_C и $O_{я}$ - поверхность охлаждения всех стержней и ярма, m^2 ;

α_M - коэффициент, учитывающий эффективность теплоотдачи магнитопровода посредством теплообмена (см. [1]).

Принимая высоту ярма $h_{я} = d-5$ мм, ширину $L_N = \sqrt{d^2 - 40^2}$ мм и $2(a_N + b_N) = K_{пр} \pi d \sqrt{K_{кр}}$ мм и обозначив $K_{22} = (2K_{пр} \pi \sqrt{K_{кр}} + K_{кр} \pi / 4 + 8) 10^{-6}$, $K_{23} = (8K_{11} - 10K_{ш} \sqrt{K_{кр}} - 40) 10^{-6}$, $K_{24} = (40K_{11}) 10^{-6}$, $K_{25} = 3K_{пр} \pi^2 \sqrt{K_{кр}} \cdot 10^6 / K_u$, $K_{26} = K_{25} K_4 / \pi - 360 \pi \cdot 10^{-6} / K_u$, $K_{27} = 360 \pi K_4 \cdot 10^{-6} / K_u$, $K_{28} = 2K_{24} L_0 K_u / \pi$,

$$K_{29} = 720 L_0 \cdot 10^{-6}, \text{ получим}$$

$$O_{я} = K_{22} d^2 + K_{23} d + 2 \sqrt{d^2 - 40^2} (d + K_{11}) - K_{25}, \quad (29)$$

$$O_C = K_{25} / d^2 + K_{26} / d^3 - K_{27} / d^4 + K_{28} d - K_{29}. \quad (30)$$

Осуществив ряд действий в формулах (29), (30) и в

$$\alpha_M = 0,32d \sqrt[4]{(d(1 - \sqrt{K_{KP}}) + 2a_{01})^{1.6} K_u / \pi(d + K_4) + 2L_0 K_u d^4}$$

и подставив их в (28), получим

$$O_{MЭ} = K_{22}d^2 + K_{23}d + 2\sqrt{d^2 - 40^2} (d + K_{11}) - K_{24} + \\ + (K_{25}/d^2 + K_{26}/d^3 - K_{27}/d^4 + K_{28}d - K_{29}) \times \\ \times 0,32d \sqrt[4]{(d(1 - \sqrt{K_{KP}}) + 2a_{01})^{1.6} K_u / \pi(d + K_4) + 2L_0 K_u d^4}.$$

Внешняя поверхность обмотки НН равна

$$O_1 = (\pi(d + K_4)/K_u d^4) (c\pi(d + 2a_{01})) 10^{-6}. \quad (31)$$

Учитывая, что $K_{30} = c\pi^2/K_u$, $K_{31} = K_{29}(K_4 + 2a_{01})$, $K_{32} = K_{29}K_4 2a_{01}$, формула (31) принимает вид

$$O_1 = K_{30}/d^2 + K_{31}/d^3 - K_{32}/d^4.$$

Таким образом, подставив в (6) найденные значения, получим величину плотности тока в обмотке НН, обеспечивающую допустимый перегрев обмотки при заданном классе изоляции, выбранном диаметре d сечения стержня, описываемого кругом, и величине U_K .

ЛИТЕРАТУРА

1. **Заводская нормаль** / Армэлектрозавод. - 1996.
2. **Оганесян Ю.А.** Проектирование трехфазных двухобмоточных масляных трансформаторов. - Ереван / ЕрПИ. - 1976. - 218 с.
3. **Тихомиров П. М.** Расчет трансформаторов.-М.: Энергоатомиздат, 1986.-517с.
4. **Петров Г.И.** Электрические машины. Ч. 1. - М.: Энергия, 1974. - 354 с.

ГИУА

30.05.1998

Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 1.

УДК 621.392.1:62.5

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И
ИНФОРМАТИКА

С.Р. АКОПЯН

РАЗБИЕНИЕ СХЕМ НА ЧАСТИ, УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ ЗАДАНЫМ ОГРАНИЧЕНИЯМ

Դիտարկվում է գերմեծ մակարդակի ինտեգրացիայի սխեմաները մասերի տրոհելու խնդիրը: Ընտրված հիմնական չափանիշներն են. տրոհման դեպքում յուրաքանչյուր «մասում» տարրերի կշիռների գումարի՝ նախապես նշված թվին չգերազանցելը, մասերի արտաքին կապերի քանակի՝ նախապես նշված թվին չգերազանցելը, և վերոհիշյալ երկու սահմանափակումների փոխզիջումային պայմանն իրականացնող նպատակային ֆունկցիայի՝ մեծագույն արժեք ստանալը: