

16650
2001/1
ISSN 1607-6761

Электротехника и
электроэнергетика

Електротехніка та
електроенергетика

Electrotechnics and
electroenergetics



ISSN 1607-6761



1'2001

МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Николаенко Ю.Е., к.т.н.

Государственный комитет промышленной политики Украины

Приведена методика теплового расчета трансформатора со встроенными в обмотку тепловыми трубами.

Наведено методику теплового розрахунку трансформатора з убудованими в обмотку тепловими трубами.

TECHNIQUE OF THERMAL ACCOUNT OF THE TRANSFORMER WITH THERMAL PIPES

Nikolaenko Y.E.

The technique of thermal account of the transformer with the thermal pipes, built-in a winding is carried out.

Для повышения надежности работы мощных трансформаторов в составе их конструкций используют специальные конструктивные элементы, которые обеспечивают снижение температуры обмоток и магнитопроводов, например, встраивают в обмотки трансформатора пластины из теплопроводного материала; выполняют в обмотках каналы, по которым прокачивают охлаждающую жидкость; помещают трансформатор в бак с легкокипящей диэлектрической жидкостью и т.д. Общим недостатком перечисленных конструкций является то, что они не позволяют максимально использовать преимущества водяного охлаждения блочной аппаратуры с трансформаторами при размещении ее в базовых несущих конструкциях с охлаждаемыми водой полками и перегородками.

Этого недостатка лишена конструкция трансформатора со встроенными внутрь обмотки тепловыми трубами (ТТ), паровые каналы которых объединены паровым каналом плоской тепловой трубы, расположенной сверху трансформатора [1]. Схематично предложенная конструкция трансформатора показана на рис. 1.

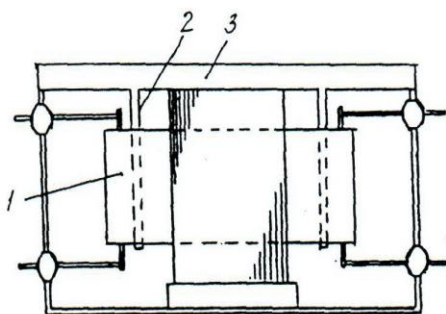


Рис. 1 — Схема конструкции трансформатора с тепловыми трубами: 1 — обмотка; 2 — тепловая труба; 3 — плоская тепловая труба

Учитывая оригинальность приведенной конструкции трансформатора, актуальной является постановка вопроса о методике теплового расчета таких конструкций.

В основу методики теплового расчета положено использование метода схем замещения.

В соответствии с этим методом исследуемая зона делится на ряд участков — элементов. В центре каждого участка устанавливается узел. Затем определяются тепловые связи узла со всеми смежными узлами. Далее составляются уравнения баланса тепловых потоков между этим узлом и со всеми смежными, при этом тепловой поток равен произведению проводимости между узлами на разницу температур этих двух узлов.

Для схемы из трех узлов (см. рис. 2) имеем:

$$\begin{aligned} A_{12}(\theta_1 - \theta_2) + A_{13}(\theta_1 - \theta_3) &= P_{1,0}(1 + \alpha \theta_1); \\ A_{21}(\theta_2 - \theta_1) + A_{23}(\theta_2 - \theta_3) &= P_2; \\ A_{31}(\theta_3 - \theta_1) + A_{32}(\theta_3 - \theta_2) + A_{30}(\theta_3 - \theta_0) &= 0, \end{aligned}$$

где $P_{1,0}$ — «холодные» потери в обмотке при нулевом превышении температуры;

P_2 — потери в сердечнике;

$\alpha = 0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ — температурный коэффициент сопротивления меди;

$\theta_0 = 0$ — превышение температуры окружающей (охлаждающей) среды (по отношению к трансформатору);

A_{11}, A_{22}, A_{33} — главные коэффициенты матрицы проводимостей;

A_{12}, A_{13}, A_{23} — побочные коэффициенты ($A_{12} = -A_{21}, A_{23} = -A_{32}$).

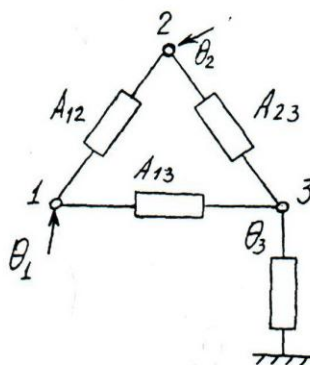


Рис. 2 — Схема замещения для трех узлов: 1 — обмотка; 2 — сердечник; 3 — кожух

Выполнив несложные преобразования, получим

$$A_{12}\theta_1 - A_{12}\theta_2 + A_{13}\theta_1 - A_{13}\theta_3 = P_{1,0} + P_{1,0}\alpha\theta_1;$$

$$(A_{12} + A_{13} - P_{1,0}\alpha)\theta_1 - A_{12}\theta_2 - A_{13}\theta_3 = P_{1,0}; \quad (1)$$

$$A_{21}\theta_2 - A_{21}\theta_1 + A_{23}\theta_2 - A_{23}\theta_3 = P_2;$$

$$(A_{21} + A_{23})\theta_2 - A_{21}\theta_1 - A_{23}\theta_3 = P_2; \quad (2)$$

$$A_{31}\theta_3 - A_{31}\theta_1 + A_{32}\theta_3 - A_{32}\theta_2 + A_{33}\theta_3 = 0;$$

$$(A_{30} + A_{31} + A_{32})\theta_3 - A_{31}\theta_1 - A_{32}\theta_2 = 0. \quad (3)$$

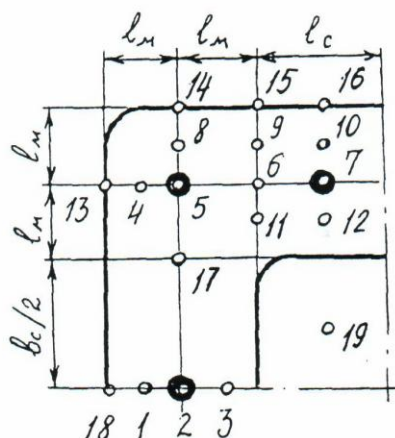
Коэффициенты при $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ в уравнениях (1)-(3) представляют собой главные коэффициенты матрицы проводимостей:

$$A_{12} + A_{13} - P_{1,0}\alpha = A_{11}; \quad A_{21} + A_{23} =$$

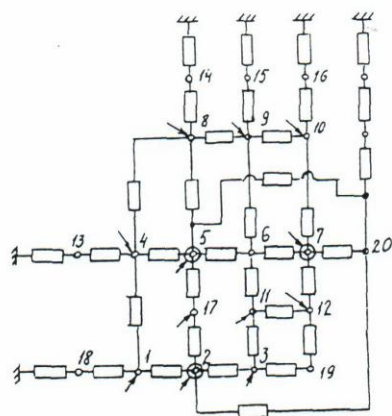
$$= A_{22}; \quad A_{30} + A_{31} + A_{32} = A_{33}.$$

Решение системы трех алгебраических уравнений (1), (2), (3) с тремя неизвестными $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ дает значения средних превышений температур в каждой зоне (узле).

Тепловая схема замещения трансформатора, составленная для 1/4 его конструкции (исходя из условия тепловой симметрии), показана на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Тепловая схема замещения участка трансформатора с тепловыми трубами: а – расчетная зона;

В схеме приняты следующие обозначения:

1, 4, 8, 9, 10 – узлы в меди обмотки по наружному контуру расчетного сектора обмотки;

3, 11, 12 – узлы в меди по внутреннему контуру обмотки (который охватывает центральный стержень сердечника);

2, 5, 7 – центры участков, в которых размещены тепловые трубы;

6 – узел в меди обмотки между участками с ТТ 5 и 7;

17 – узел в меди между участками с ТТ 2 и 5;

13, 14, 15, 16, 18 – узлы на наружной поверхности меди обмотки;

19 – узел в центральном стержне;

20 – узел во внутренней поверхности конденсационной зоны плоской тепловой трубы.

Система уравнений для тепловой схемы, приведенной на рис. 2, будет иметь вид:

$$A_{11}\theta_1 - A_{12}\theta_2 - A_{14}\theta_4 - A_{1,18}\theta_{18} = P_{1,0};$$

$$A_{22}\theta_2 - A_{21}\theta_1 - A_{23}\theta_3 - A_{2,17}\theta_{17} - A_{2,20}\theta_{20} = P_{2,0};$$

$$A_{33}\theta_3 - A_{32}\theta_2 - A_{3,11}\theta_{11} - A_{3,19}\theta_{19} = P_{3,0};$$

$$A_{44}\theta_4 - A_{41}\theta_1 - A_{45}\theta_5 - A_{48}\theta_8 - A_{4,13}\theta_{13} = P_{4,0};$$

$$A_{55}\theta_5 - A_{54}\theta_4 - A_{56}\theta_6 - A_{58}\theta_8 - A_{5,17}\theta_{17} - A_{5,20}\theta_{20} = P_{5,0};$$

$$A_{66}\theta_6 - A_{65}\theta_5 - A_{67}\theta_7 - A_{6,11}\theta_{11} = P_{6,0};$$

$$A_{77}\theta_7 - A_{76}\theta_6 - A_{7,10}\theta_{10} - A_{7,12}\theta_{12} - A_{7,20}\theta_{20} = P_{7,0};$$

$$A_{88}\theta_8 - A_{84}\theta_4 - A_{85}\theta_5 - A_{89}\theta_9 - A_{8,14}\theta_{14} = P_{8,0};$$

$$A_{99}\theta_9 - A_{96}\theta_6 - A_{98}\theta_8 - A_{9,10}\theta_{10} - A_{9,15}\theta_{15} = P_{9,0};$$

$$A_{10,10}\theta_{10} - A_{10,7}\theta_7 - A_{10,9}\theta_9 - A_{10,16}\theta_{16} = P_{10,0};$$

$$A_{11,11}\theta_{11} - A_{11,3}\theta_3 - A_{11,6}\theta_6 - A_{11,12}\theta_{12} = P_{11,0};$$

$$A_{12,12}\theta_{12} - A_{12,7}\theta_7 - A_{12,11}\theta_{11} - A_{12,19}\theta_{19} = P_{12,0};$$

$$A_{13,13}\theta_{13} - A_{13,4}\theta_4 = 0;$$

$$A_{14,14}\theta_{14} - A_{14,8}\theta_8 = 0;$$

$$A_{15,15}\theta_{15} - A_{15,9}\theta_9 = 0;$$

$$A_{16,16}\theta_{16} - A_{16,10}\theta_{10} = 0;$$

$$A_{17,17}\theta_{17} - A_{17,2}\theta_2 - A_{17,5}\theta_5 = P_{17,0};$$

$$A_{18,18}\theta_{18} - A_{18,1}\theta_1 = 0;$$

$$A_{19,19}\theta_{19} - A_{19,3}\theta_3 - A_{19,12}\theta_{12} = P_{19,0};$$

$$A_{20,20}\theta_{20} - A_{20,2}\theta_2 - A_{20,5}\theta_5 - A_{20,7}\theta_7 = 0.$$

Главные коэффициенты матрицы при $\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C} = 1/250 \text{ 1/}^\circ\text{C}$:

$$A_{11} = A_{12} + A_{14} + A_{1,18} - P_{1,0}/250;$$

$$A_{22} = A_{21} + A_{23} + A_{2,17} + A_{2,20} - P_{2,0}/250;$$

$$A_{33} = A_{32} + A_{3,11} + A_{3,19} - P_{3,0}/250;$$

$$A_{44} = A_{41} + A_{45} + A_{48} + A_{4,13} - P_{4,0}/250;$$

$$A_{55} = A_{54} + A_{56} + A_{58} + A_{5,17} + A_{5,20} - P_{5,0}/250;$$

$$A_{66} = A_{65} + A_{67} + A_{6,11} - P_{6,0}/250;$$

$$A_{77} = A_{76} + A_{7,10} + A_{7,12} + A_{7,20} - P_{7,0}/250;$$

$$A_{88} = A_{84} + A_{85} + A_{89} + A_{8,14} - P_{8,0}/250;$$

$$A_{99} = A_{96} + A_{98} + A_{9,10} + A_{9,15} - P_{9,0}/250;$$

$$A_{10,10} = A_{10,7} + A_{10,9} + A_{10,16} - P_{10,0}/250;$$

$$A_{11,11} = A_{11,3} + A_{11,6} + A_{11,12} - P_{11,0}/250;$$

$$A_{12,12} = A_{12,7} + A_{12,11} + A_{12,19} - P_{12,0}/250;$$

$$A_{13,13} = A_{13,0} + A_{13,4};$$

$$A_{14,14} = A_{14,0} + A_{14,8};$$

$$A_{15,15} = A_{15,0} + A_{15,9};$$

$$A_{16,16} = A_{16,0} + A_{16,10};$$

$$A_{17,17} = A_{17,2} + A_{17,5} - P_{17,0}/250;$$

$$A_{18,18} = A_{18,0} + A_{18,1};$$

$$A_{19,19} = A_{19,3} + A_{19,12};$$

$$A_{20,20} = A_{20,0} + A_{20,2} + A_{20,5} + A_{20,7}.$$

Коэффициенты матрицы проводимостей определяются по формулам, приведенным в [1].

Тепловые сопротивления находятся из соотношений:

$$R_{12} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{b_c}{2} h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m} = R_{23},$$

где $R_{\delta_{32m}} = \frac{\delta_{32m}}{\lambda_{32} \pi d_{2m} h_0 \eta'_{mp}}$ — контактное тепловое сопротивление между ТТ и обмоткой;

$$R_{\delta m} = \frac{\delta_m}{\lambda_m \pi \left(\frac{d_{1m} + d_{2m}}{2} \right) h_0 \eta'_{mp}} \text{ — тепловое}$$

сопротивление стенки ТТ (здесь $\eta'_{mp} = 0,25$ — число труб);

$$R_{14} = \frac{l_{14}}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0},$$

где $l_{14} = \frac{b_c}{2} + l_m$;

$$R_{1,18} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{b_c}{2} h_0}; R_{2,17} = \frac{b_c/4}{\lambda_m l_m h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{2,20} = R_{5,20} = R_{7,20} = \frac{1}{\alpha_{внт} \pi d_{1m} h_0 \eta''_m} \text{ — те-}$$

пловое сопротивление от внутренней поверхности ТТ до внутренней поверхности конденсационной зоны (здесь $\eta''_m = 1$ — число труб);

$$R_{3,11} = \frac{l_{3,11}}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0},$$

где $l_{3,11} = \frac{b_c}{2} + \frac{l_m}{2}$;

$$R_{3,19} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{b_c}{2} h_0} + \frac{\delta_{32c}}{\lambda_{30(c-c)} \frac{b_c}{2} h_0} + \frac{l_c}{\lambda_c \frac{b_c}{2} h_0};$$

$$R_{45} = \frac{l_m/2}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{48} = \frac{l_m/2}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0}; R_{4,13} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} l_m h_0};$$

$$R_{56} = \frac{l_m}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{5,17} = \frac{l_m + \frac{b_c}{4}}{\lambda_m l_m h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{58} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} l_m h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{67} = \frac{l_c/2 + l_m/2}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{69} = R_{6,11} = R_{9,15} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \left(\frac{l_m + l_c}{2} \right) h_0};$$

$$R_{7,10} = R_{7,12} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{l_c}{2} h_0} + R_{\delta_{32m}} + R_{\delta m};$$

$$R_{89} = \frac{l_m}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0}; R_{8,14} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} l_m h_0};$$

$$R_{9,10} = R_{11,12} = \frac{l_c/2 + l_m/2}{\lambda_m \frac{l_m}{2} h_0};$$

$$R_{10,16} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{l_c}{2} h_0};$$

$$R_{12,19} = \frac{l_m/2}{\lambda_{30} \frac{l_c}{2} h_0} + \frac{\delta_{32c}}{\lambda_{30(c-c)} \frac{l_c}{2} h_0} + \frac{b_c/2}{\lambda_{лпс} \frac{l_c}{2} h_0};$$

$$R_{13,0} = \frac{1}{\alpha_{ек} \frac{l_m}{2} h_0}; R_{14,0} = \frac{1}{\alpha_{ек} l_m h_0};$$

$$R_{15,0} = \frac{1}{\alpha_{ек} \left(\frac{l_m + l_c}{2} \right) h_0};$$

$$R_{16,0} = \frac{1}{\alpha_{ек} \frac{l_c}{2} h_0}; R_{18,0} = \frac{1}{\alpha_{ек} \frac{b_c}{2} h_0};$$

Суммарное тепловое сопротивление от внутренней полости конденсационной зоны до охлаждающей воды:

$$R_{20,0} = R_{авнк} + R_{\delta k} + R_{\delta_{32k}} + R_{\delta_{сс}} + R_{ав} + R_{Qв},$$

где $R_{авнк} = \frac{1}{\alpha_{конд} S_{акор} 0,25}$ — тепловое сопротивление теплоотдачи в зоне конденсации ($S_{акор}$ — площадь теплоотдачи в коробе); ($S_k \approx S_{ак}$);

$R_{\lambda k} = \frac{\delta_k}{\lambda_k S_{k0,25}}$ – тепловое сопротивление
стенки корпуса конденсационной зоны;

$R_{\lambda_{зк}} = \frac{\delta_{зк}}{\lambda_{зк} S_{k0,25}}$ – эквивалентное тепло-
вое сопротивление контактной теплопередачи корпуса
конденсационной зоны с водяным теплообменником;

$R_{\delta_{вс}} = \frac{\delta_{вс}}{\lambda_k S_{k0,25}}$ – тепловое сопротивление
стенки водяного теплообменника;

$R_{\alpha_{вс}} = \frac{1}{\alpha_{вс} S_{в0,25}}$ – сопротивление теплоотдачи
от внутренних стенок водяного теплообменника к воде;

$R_{Q_{в}} = \frac{1}{Q_{в} C_{в}}$ – сопротивление подогрева воды
в системе.

Определим греющие потери в узлах схемы за-
мещения. Рассматривается 1/4 обмоток. Тогда

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + \\ + P_{10} + P_{11} + P_{12} = \sum P_{обм} / 4.$$

Распределить по узлам схемы замещения по-
тери можно пропорционально площади поперечного
сечения S_{pi} каждого участка (т.е. его относительной
величины от общей площади обмоток):

$$P_i = \frac{S_{pi}}{S_{\Sigma обм} / 4} \sum P_{обм} / 4; \quad \sum S_{pi} = S_{\Sigma обм} / 4.$$

Площади поперечного сечения:

$$S_{p1} = \left(\frac{l_m}{2} \cdot \frac{b_c}{2} \right); \quad S_{p2} = \left(\frac{b_c}{4} \cdot l_m \right); \quad S_{p3} = \left(\frac{l_m}{2} \cdot \frac{b_c}{2} \right);$$

$$S_{p4} = \left(\frac{l_m}{2} \cdot 2l_m \right); \quad S_{p5} = (l_m \cdot l_m);$$

$$S_{p6} = S_{p11} = \frac{l_m}{2} \left(\frac{l_m}{2} + \frac{l_c}{2} \right);$$

$$S_{p7} = S_{p12} = \left(\frac{l_m}{2} \cdot \frac{l_c}{2} \right); \quad S_{p8} = (l_m \cdot l_m);$$

$$S_{p9} = l_m \left(\frac{l_m}{2} \cdot \frac{l_c}{2} \right); \quad S_{p10} = (l_m \cdot \frac{l_c}{2}).$$

Потери в узле 19 (центральный стержень):

$$P_{19} = P_{ц.ст} / 4,$$

где $P_{ц.ст}$ – потери в центральном стержне.

Для выполнения теплового расчета необходи-
мо иметь все исходные величины:

- размеры всех элементов (см);
- величины коэффициентов теплопроводности всех материалов (Вт/см²°С);
- величины коэффициентов теплоотдачи со всех поверхностей (Вт/см²°С);
- величины греющих потерь в обмотках (и их распределение по узлам) и в стержнях (Вт).

Обозначения в формулах расчета тепловых со-
противлений:

- λ_m – коэффициент теплопроводности меди;
- $\lambda_{зк}$ – эквивалентный коэффициент теплопро-
водности поперек витков (медь+изоляция);
- h – высота обмотки;
- δ_m – толщина стенки ТТ;
- $\delta_{зк}$ – эквивалентная длина зазора между
трубкой и обмоткой;
- $\lambda_{зк}$ – коэффициент теплопроводности мате-
риала, заполняющего этот зазор;
- d_{2m}, d_{1m} – наружный и внутренний диаметры ТТ;
- $\alpha_{вс}$ – коэффициент теплоотдачи естественной
конвекции в воздухе;
- $\alpha_{конд}$ – коэффициент теплоотдачи в конденса-
ционной зоне ТТ (в корпусе);
- δ_k, λ_k – толщина и коэффициент теплопровод-
ности корпуса конденсационной зоны;
- $\delta_{зк}, \lambda_{зк}$ – толщина и коэффициент тепло-
проводности эквивалентного зазора между корпусом
конденсационной зоны и поверхностью водяного теп-
лообменника;
- $\delta_{вс}, \lambda_k$ – толщина стенки и коэффициент теп-
лопроводности материала водяного теплообменника;
- $\alpha_{вс}, S_{в}$ – коэффициент теплоотдачи к воде в
водяном теплообменнике и площадь теплоотдающей
поверхности;
- $Q_{в}, C_{в}$ – расход воды и её теплоёмкость.

Контактную теплопередачу рассчитывают по
литературным источникам [2,3]. Теплоотдачу к воде в
каналах по [4].

Таким образом, исходя из приведенных соот-
ношений, расчет выполняют в такой последователь-
ности: рассчитывают все тепловые сопротивления,
затем проводимости между узлами; распределяют по-
тери по узлам; составляют систему уравнений; рас-
считывают ее на ЭВМ и получают поле средних тем-
ператур (превышений температур) всех участков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент України № 631, МПК Н 01 F 27/18.
Трансформатор / Ю.Е. Николаенко, - 4 с. ил.; Опубл.
16.10.2000, Бюл. № 5.
2. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.
Контактное термическое сопротивление. М. Энергия.
1977. 328с;
3. Попов В.М. теплообмен в зоне контакта ра-
зъемных и неразъемных соединений. М. Энергия.
1971. 216с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.
Теплоотдача. М. Энергия. 1969. 440с.

Рукопис надійшов 19.04 2001 р.