

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ
ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

E-mail: rB-irina@rambler.ru

Разработаны математическая модель и компьютерная методика расчета тепловых процессов в трансформаторе с учетом анизотропии теплопроводности материалов активных элементов – магнитопровода и обмоток. Созданные вычислительные средства предусматривают моделирование двух способов охлаждения трансформатора – на основе свободной конвекции воздуха и с применением внешнего охлаждения вентилятором. Такие режимы охлаждения исследованы на примере однофазного трансформатора с магнитопроводом броневой конфигурации. Показано снижение температуры в случае принудительного охлаждения по сравнению с естественным охлаждением трансформатора. Разработанные компьютерные средства могут быть использованы при проектировании трансформаторов и для изучения различных режимов их работы. Библ. 19, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: электрические потери, магнитопровод ленточный броневой, шихтованный магнитопровод, анизотропия теплопроводности, свободная конвекция воздуха, принудительное охлаждение трансформатора, компьютерное моделирование.

Введение. Трансформаторы являются важными составными элементами силовых систем и ряда электротехнического оборудования. При работе трансформаторов возникают потери электрической энергии (потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе, джоулевы потери, обусловленные активным сопротивлением проводов и протеканием токов в обмотках), приводящие к нагреву активных элементов трансформатора, его конструктивных деталей, контактных соединений и окружающей среды в целом.

Тепловые процессы являются важным фактором, учет которого необходим для рационального проектирования, разработки и эксплуатации трансформаторов. Перегрев представляет собой одну из причин повреждения проводов обмоток, старения и последующего возможного пробоя изоляции, тем самым определяя надежность и срок службы электрического оборудования, в состав которого входят трансформаторы. В силу этого важным является уточненное исследование тепловых процессов в трансформаторах с учетом теплофизических параметров используемых анизотропных материалов, а также способов отвода тепла от тепловыделяющих элементов.

Данная работа выполнена на основе опыта численных исследований тепловых процессов в трансформаторах, проведенных в работах [4, 7, 11–13, 15–19], а также с рассмотрением тепловой анизотропии активных элементов трансформатора.

Целью работы явилось создание компьютерной методики расчета теплообменных процессов в трансформаторах с учетом анизотропии теплопроводности активных элементов для двух случаев – случая свободной конвекции воздуха и при принудительном внешнем охлаждении трансформатора с помощью вентилятора.

Учет анизотропии тепловых свойств магнитопровода и обмоток трансформатора осуществляется путем задания различных значений теплопроводности магнитопровода и обмоток по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Определение продольной и поперечной теплопроводности элементов трансформатора проводится с использованием данных работ [2–4].

Численная методика позволяет рассматривать различные конструкции магнитопроводов, в том числе пластинчатые (шихтованные) и ленточные. В качестве примера для исследования тепловых процессов выбран однофазный трансформатор с магнитопроводом броневых типа (ШЛ 32х40) [1] малой мощности (до 390 Вт при частоте 50 Гц), показанный на рис. 1.

Материалы конструктивных элементов трансформатора рассматриваются как эквивалентные анизотропные материалы так же, как, например, в работах [4, 13]. Обмотки трансформатора могут моделироваться с учетом изоляционного покрытия проводов, пропиточного компаунда, способа пропитки, наличия междуслоевой изоляции. Магнитопровод представляется как единый элемент, расчет эффективной теплопроводности которого предлагается проводить с учетом анизотропии тепловых свойств материала, толщины листа стали и коэффициента заполнения пакета сталью. Теплопровод-

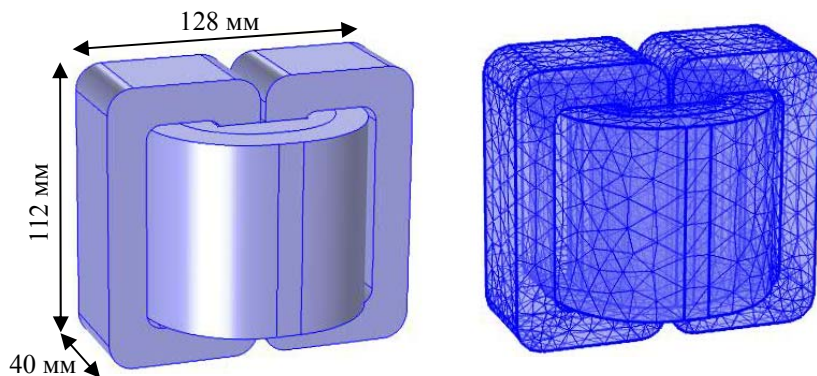


Рис. 1, а, б

ность магнитопровода определяется с учетом направления передачи тепловых потоков вдоль и поперек листов/лент.

Исследование теплового поля в трансформаторе выполняется с помощью компьютерного моделирования на основе численного метода конечных элементов в программе Comsol Multiphysics [14].

Математическая модель тепловых процессов в трансформаторе.

1. Свободная конвекция. Стационарный и нестационарный режимы. Основой расчета стационарного температурного поля является уравнение теплопроводности $\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q = 0$, которое в декартовой системе координат в случае анизотропии теплопроводности имеет вид [12]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = 0. \quad (1)$$

Нестационарное тепловое поле T в трансформаторе описывается уравнением

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \quad \text{или} \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q. \quad (2)$$

Здесь $\rho(\mathbf{r})$, $C_p(\mathbf{r})$, $\lambda(\mathbf{r})$ – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала элемента; эти величины предполагаются известными функциями координаты $\mathbf{r} = (x, y, z)$ из-за наличия разнородных элементов в конструкции трансформатора; $Q(\mathbf{r})$ – удельная мощность объемных источников тепла (предполагается известной для активных элементов из решения электромагнитной задачи).

Теплопроводность в предположении анизотропии структуры материалов в ортогональной декартовой системе координат определяется как

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix},$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коэффициенты теплопроводности в текущей точке \mathbf{r} в направлении осей x, y и z , соответственно.

В процессе нагрева устройства часть тепла передается окружающей среде за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Для учета этого поставлены следующие граничные условия:

– на всех открытых поверхностях трансформатора задается тепловой поток

$$q|_S = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k(T_0 - T) \quad \text{или условие} \quad \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} e_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} e_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} e_z = k(T_0 - T), \quad (3)$$

где $k(\mathbf{r})$ – эффективный коэффициент теплоотдачи конвекцией, значения которого зависят от тепловых условий для рассматриваемой граничной поверхности и могут быть определены по результатам экспериментальных исследований; T_0 – температура окружающей среды; e_x, e_y, e_z – направляющие косинусы вектора внешней нормали \mathbf{n} к рассматриваемой поверхности по отношению к осям x, y и z .

На основании данных [1] отметим следующее. Значения коэффициентов теплоотдачи для магнитопровода и обмоток зависят от частоты, соотношения между потерями в меди и стали, мощности трансформатора, состояния охлаждающей поверхности. Такие коэффициенты могут задаваться различными для разных режимов и различных поверхностей, к примеру, на открытых границах – открытых поверхностях магнитопровода и обмоток – большие значения, а на закрытых границах и в основании магнитопровода – меньшие значения.

В [1] приведены полученные экспериментальным путем значения коэффициента теплоотдачи для элементов трансформаторов малой мощности, в том числе трансформаторов броневого конструк-

ции, определены аппроксимационные выражения для коэффициента теплоотдачи обмоток. Для стали коэффициент теплоотдачи определен в диапазоне $k_{cm} = 5,5-12,5$ Вт/(м²·К). Для обмоток трансформаторов броневой конструкции коэффициенты теплоотдачи связаны между собой следующим соотношением [1, выражение (3–98)]:

$$k_{cm} : k_{об} = 1,15 : 1,05 .$$

В разработанной модели учитывается также тепловой поток, излучаемый в окружающую среду нагретыми элементами – открытыми участками магнитопровода и обмоток

$$q|_{S_{op}} = \lambda \partial T / \partial n = \varepsilon \sigma_B (T_0^4 - T^4) , \quad (4)$$

где ε – излучательная способность материала (для листовой стали магнитопровода $\varepsilon = 0,67$, для полированной меди обмоток $\varepsilon = 0,04$); $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Краевые задачи: (1), (3), (4) – для стационарного нагрева и (2)–(4) – для нестационарного режима, дополненные начальным полем температур $T|_{t=0} = T_0$, представляют собой математическую модель для исследования тепловых процессов в трансформаторе.

Отметим, что проведение расчета нестационарного теплового поля трансформаторов необходимо в случаях, когда:

— устройство, в состав которого входит трансформатор, эксплуатируется в состоянии переходного теплового процесса, работает в кратковременных и повторно-кратковременных режимах с периодическими и частыми пусками;

— важным является определение условий и продолжительности времени, в течение которого практически достигается установившаяся температура нагрева элементов;

— необходимо учесть динамику нагрева элементов при выборе оптимальных температурных режимов эксплуатации электротехнических устройств с трансформаторами.

Компьютерная реализация моделей расчета стационарного и нестационарного температурного поля трансформатора проводилась для трехмерного случая методом конечных элементов в программе Comsol [14]. Геометрическая модель исследуемого трансформатора и его конечно-элементное сеточное разбиение показаны на рис. 1, а и б, соответственно.

Расчетная область рассматривается как гетерогенная среда, составляющие которой имеют эффективные теплофизические характеристики. В модели предполагается задание значений мощности электрических потерь для активных элементов трансформатора.

2. Принудительное охлаждение трансформатора. Моделируется случай нагрева трансформатора в нестационарном режиме с охлаждением вентилятором (рис. 2, а). Задачи теплопереноса и движения воздуха, нагнетающегося вентилятором со скоростью v_0 , решаются в дополнительной прямоугольной области вокруг трансформатора – так называемой активной области (рис. 2).

Процессы движения воздуха и распределения температуры описываются уравнениями [8]

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}] , \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 , \quad (6)$$

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q . \quad (7)$$

Стационарное уравнение (5) представляет собой основное уравнение механики газа – уравнение

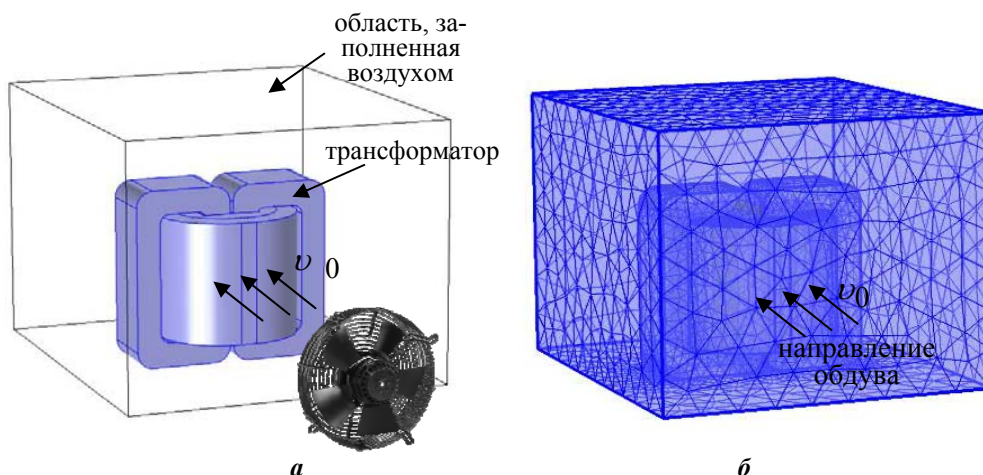


Рис. 2

Навье-Стокса, (6) – уравнение неразрывности; уравнение (7) описывает нестационарные процессы теплопроводности и конвекции тепла.

Неизвестными в системе (5)–(7) являются: \mathbf{u} – вектор скорости газа (воз-

духа); p – давление и T – температура. В системе приняты обозначения: η – динамическая вязкость воздуха; ρ – плотность; λ – теплопроводность материала соответствующего элемента рассматриваемой неоднородной области; C_p – теплоемкость; Q – плотность мощности тепловых источников в области; \mathbf{I} – единичный тензор; составляющая $\eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}$ представляет собой тензор вязких напряжений (Па).

Для газодинамической задачи задаются симметричные граничные условия на боковых поверхностях дополнительной области, ограничивающей воздушное пространство. На поверхностях трансформатора выбираются условия непротекания (граничные условия для твердых стенок). Входной поток определяется равным $v_0 = 1$ м/с. На противоположной (задней) границе области задается выходной поток воздуха (рис. 2).

Математическая модель неизоэтермического процесса движения воздуха в окрестности трансформатора включает также начальные условия $\mathbf{u} = 0$, $p = \text{const}$, $T = T_0$, где T_0 – начальная температура воздуха.

Математическая модель реализовывалась численно в программе Comsol методом конечных элементов. Сеточное разбиение расчетной области показано на рис. 2, б. Теплофизические характеристики материалов и сред (ρ , C_p , λ) принимались независимыми от температуры. Для элементов трансформатора учитывалась анизотропия теплопроводности.

Расчет эффективных характеристик элементов трансформатора.

Магнитопровод трансформатора. Анизотропная теплопроводность магнитопровода трансформатора находится на основе данных, представленных в литературе для пакетов электротехнической стали [1, 2–4, 9, 12].

Тонколистовые электротехнические стали классифицируются по технологии производства, количеству кремния, термической обработке, виду покрытия, коэффициенту заполнения и др. факторам [5]. В зависимости от изготовителя, принятой сборки пакетов листов стали и технологии их изолирования значения теплофизических параметров магнитопроводов различны.

В табл. 1 [1] представлены значения коэффициента заполнения магнитопровода сталью в зависимости от его конфигурации и толщины листа стали. Табл. 2 [4, 5, 12] дает значения продольной λ_{lcm} и поперечной $\lambda_{cr cm}$ теплопроводности различных марок стали.

Для изготовления ленточных магнитопроводов широко применяется холоднокатаная анизотропная сталь ХВП (Э340–Э360) с содержанием кремния 2,8–3,8%, которая соответствует согласно [5] современным маркам стали 3421–3423. Коэффициент заполнения сечения магнитопровода сталью при толщине ленты 0,15 мм для броневой ленточной конструкции магнитопровода составляет $k_{cm} = 0,9$ (табл. 1) – приводимые и использованные в численных расчетах параметры соответствуют примеру аналитического расчета броневое трансформатора в [1, раздел 4-9]. Теплопроводность материала определяется согласно табл. 2 – $\lambda_{lcm} = 21$ Вт/(м·К), $\lambda_{cr cm} = 3$ Вт/(м·К).

Таблица 1

Конфигурация магнитопровода	Толщина стали, мм				
	0,08	0,1	0,15	0,2	0,35
Стержневая, броневая (пластинчатая)	—	0,7 (0,75)	—	0,85 (0,89)	0,91 (0,94)
Стержневая, броневая (ленточная)	0,87	—	0,9	0,91	0,93
Гороидальная (ленточная)	0,87	—	—	0,88	

Таблица 2

Марки стали	2111,2112	2211,2212	2311,2312	2411–2413, 2421, 3404–3408, 3421–3425
λ_{lcm} , Вт/(м·К)	41–48	36–39	21–23	19–21
$\lambda_{cr cm}$, Вт/(м·К)	3–4 (для лакированных листов)			

Отметим, что значения поперечной теплопроводности задавались в направлениях, перпендикулярных листам стали, а продольной теплопроводности – вдоль листов. Значения теплопроводности поперек листов значительно меньше, чем продольная теплопроводность из-за наличия изоляции между листами и влияния контактных термических сопротивлений. В общем случае теплопроводность

магнитопроводов зависит от температуры и давления опрессовки листов стали при изготовлении [12], однако эти факторы из-за неопределенности не учитывались.

Удельная теплоемкость и плотность материала магнитопровода определялись с учетом данных, представленных в литературе (например, в [6]), и коэффициента заполнения магнитопровода сталью k_{cm} . Задавались постоянные значения теплоемкости $C_{pcm} = 470 \cdot k_{cm}$ Дж/(кг·К) и плотности $\rho_{cm} = 7800 \cdot k_{cm}$ кг/м³.

Обмотки трансформатора. Для изготовления обмоток трансформаторов малой мощности применяются провода круглого сечения с эмалевой изоляцией. Эмалевые покрытия проводов стойки к воздействию лаков, которые используются для пропитки обмоток.

Для обмоток трансформатора в расчетной методике используются эффективные коэффициенты теплопроводности с учетом вида и толщины изоляции. Отметим, что коэффициенты теплопроводности меди и изоляционных материалов отличаются между собой на три порядка, отсюда и эффективная теплопроводность вдоль и поперек проводов обмоток имеет различные значения.

Продольная теплопроводность обмоток λ_{lob} определяется по следующей формуле [4]:

$$\lambda_{lob} = \lambda_{Cu} k_{uz}^2 k_w \pi / 4.$$

Здесь $\lambda_{Cu} = 390$ Вт/(м·К) – теплопроводность меди, k_w – коэффициент заполнения обмотки медью, $k_w = 0,3$ [1]; k_{uz} – коэффициент изоляции проводов [10] $k_{uz} = d / d_{uz}$, где d – диаметр провода, d_{uz} – диаметр провода с изоляционным покрытием.

Для определения эквивалентной теплопроводности обмоток трансформатора поперек проводов использовалась эмпирическая формула, учитывающая свойства эмаль-изоляции проводов и пропиточных лаков [1, формула (2-15)]:

$$\lambda_{cr ob} = 0,165(1 + 0,0007 \cdot T_{cp}) [1 - 0,32 \cdot d_{uz} (1 - 9,2k_n + 5,2k_n^2) + 0,81d_{uz}^2] (2,11k_w^{1,5} - 0,32) \left(\frac{\lambda_l}{0,162} \right)^{1/3} \left(\frac{\lambda_{эм}}{0,143} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где T_{cp} – средняя температура пучка проводов (в °С), k_n – технологический коэффициент пропитки, d_{uz} – диаметр изолированного провода (в миллиметрах), λ_l и $\lambda_{эм}$ – соответственно теплопроводность пропиточных лаков и эмалей (Вт/(м·К)).

При этом технологический коэффициент пропитки проводов k_n может определяться в зависимости от способа пропитки равным в диапазоне: 0,1–0,3 – для пропитки окунанием; 0,3–0,6 – для капельной пропитки; 0,6–0,9 – для вакуумной пропитки [4]. Предполагалось, что $k_n = 0,9$.

Отметим, что в выражении (8) теплопроводность зависит от температуры T_{cp} , однако зависимость эта слабо выражена. Для расчетов было принято, что используется провод марки ПЭВ-1 со стандартным диаметром $d = 0,64$ мм, $d_{uz} = 0,69$ мм (как и в расчетном примере [1, раздел 4–9]) и изоляционные материалы с теплопроводностью $\lambda_{эм} = 0,11$ Вт/(м·К), $\lambda_l = 0,14$ Вт/(м·К).

Теплоемкость и плотность материала обмоток задавались с учетом коэффициента заполнения их медью k_w , а именно $C_{pw} = 390 \cdot k_w$ Дж/(кг·К); $\rho_w = 8960 \cdot k_w$ кг/м³.

Результаты компьютерного моделирования. Рассчитывался трансформатор, показанный на рис. 1, в случае, когда мощность тепловых источников в расчетной области составляла: для первичной обмотки $Q_1 = 1,23$ Вт, для вторичной обмотки $Q_2 = 2,45$ Вт, для магнитопровода $Q_3 = 6,45$ Вт (что соответствует данным расчетного примера из [1]).

1. Режим охлаждения – свободная конвекция воздуха. Результаты компьютерных расчетов трансформатора в этом режиме показаны на рис. 3: распределение установившегося температурного поля во всем объеме трансформатора – рис. 3, а, отдельно в магнитопроводе – рис. 3, б и в двух обмотках – рис. 3, в, г. Кривая на графике рис. 3, д отражает динамику нагрева обмотки трансформатора в отмеченной точке 1. Как показано, температура устанавливается примерно за 3,5–4 часа работы трансформатора.

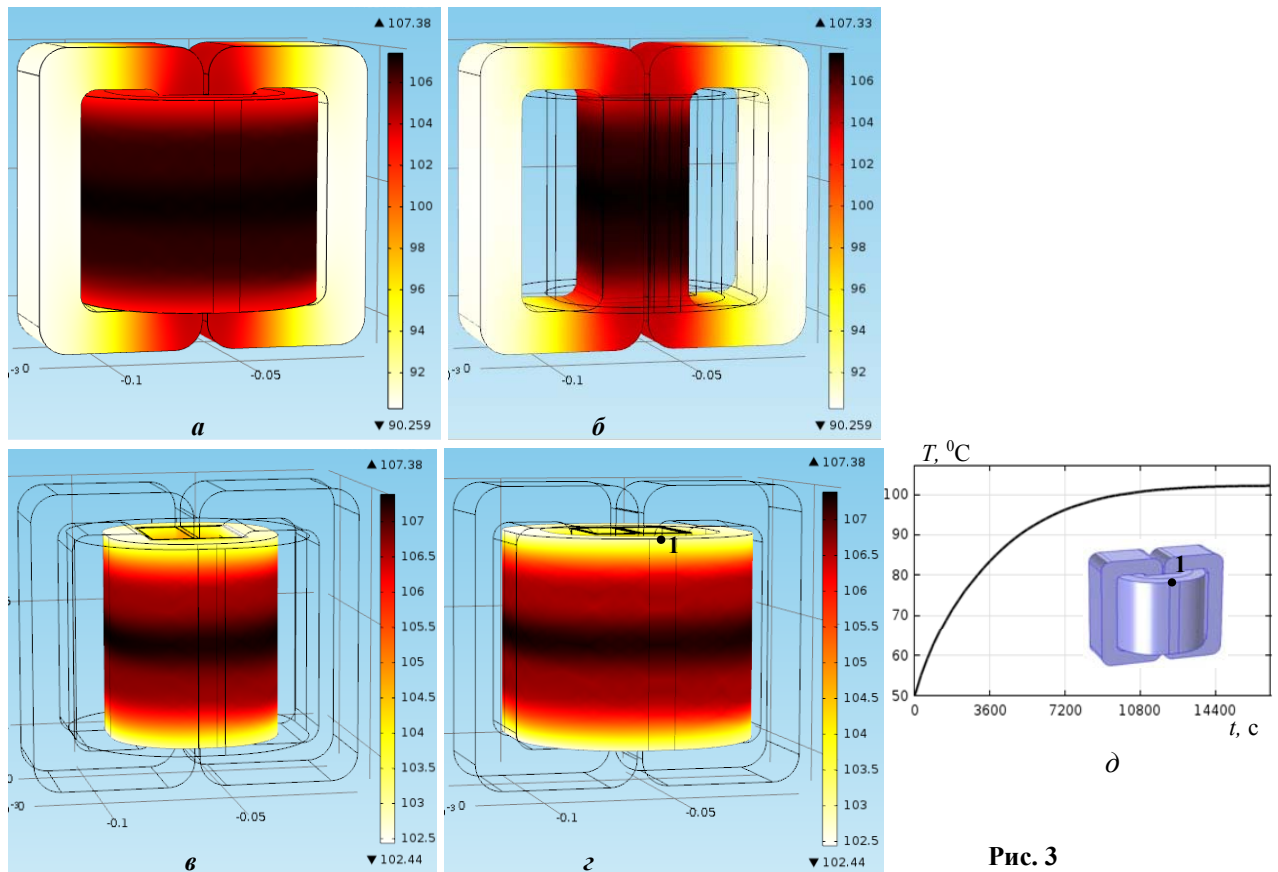


Рис. 3

Как видно из рис. 3, наиболее нагретыми являются внутренние центральные области трансформатора, а максимальная температура достигает $T_{\max} \approx 107,3^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды $T_0 = 50^{\circ}\text{C}$. Полученные численно значения температуры согласуются с результатами расчета трансформатора по аналитической методике [1] (согласно которой средняя температура обмотки составляет 105°C , что соответствует допустимому уровню перегрева).

2. Режим охлаждения – принудительный обдув с помощью вентилятора. Результаты расчета этого режима при скорости воздуха на входе в активную зону $v_0 = 1$ м/с, показаны на рис. 4.

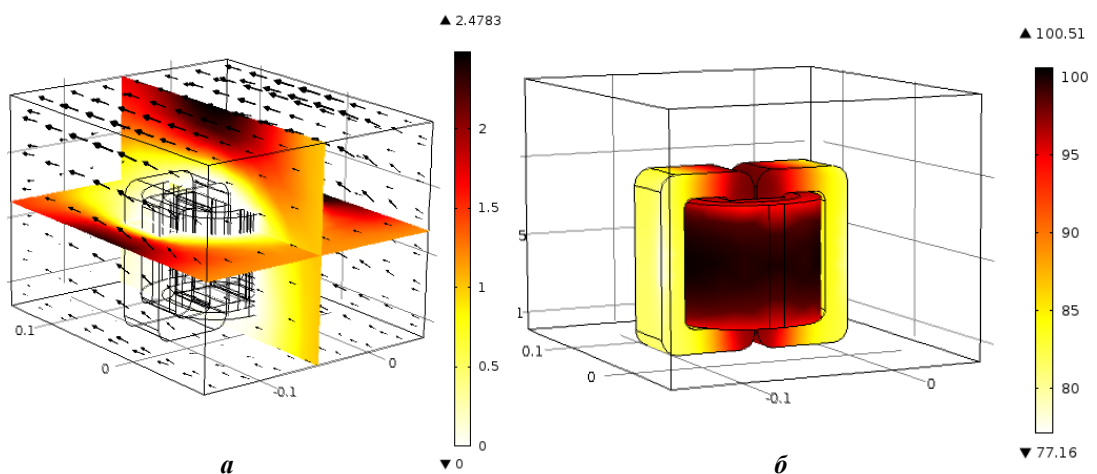


Рис. 4

В этом случае первоначально определялась скорость движения воздуха \mathbf{u} , распределение которой в центральных поперечном и продольном сечениях области расчета и в ее объеме представлено на рис. 4, а. Здесь поле скоростей показано в оттенках черного цвета, пропорциональными стрелками отображены вектор скорости и соответственно направления движения воздуха. Затем рассчитывался

нестационарный нагрев трансформатора. Полученное распределение установившегося температурного поля представлено на рис. 4, б. Максимальная температура $T_{\max} \approx 100,5^{\circ}\text{C}$.

Как видно из рис. 3, 4, в рассматриваемом случае наиболее нагретыми являются области магнитопровода, соприкасающиеся с обмоткой, и сами обмотки, и при $v_0=1$ м/с использование принудительного охлаждения позволяет снизить температуру по сравнению с естественным охлаждением трансформатора в среднем на $\sim 9^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Разработаны и описаны математическая модель и методика трехмерного компьютерного расчета тепловых процессов в трансформаторе с учетом анизотропии тепловых свойств его активных элементов. Модель позволяет рассчитывать два тепловых режима – переходный и установившийся, исследовать два способа охлаждения трансформатора – на основе свободной конвекции воздуха и путем принудительного обдува вентилятором. Численная методика позволяет получать и наглядно представлять детальное распределение температурного поля в объеме трансформатора, изучать динамику ее изменения в любой точке трансформатора, определять теплонагруженные зоны активных элементов.

С помощью разработанной методики расчета тепловых процессов могут быть исследованы трансформаторы различных конструкций, материалов изготовления активных элементов и изоляции, при различных условиях окружающей среды и способах отвода тепла от теплонагруженных элементов.

В случае использования внешней системы охлаждения компьютерная методика позволяет определять величину скорости движения воздуха для получения заданного уровня нагрева трансформатора.

Предлагаемые компьютерные средства могут быть полезны при разработке трансформаторов, изучении различных режимов работы и мониторинге трансформаторов на этапе эксплуатации.

1. Белопольский И.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
2. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
3. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
4. Гандишу В.М. Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT. – <http://elcut.ru/articles/gandshou/block.pdf>
5. ГОСТ 21427.0–75, ГОСТ 21427.1–83, ГОСТ 21427.2–83, ГОСТ 21427.4–83. Сталь электротехническая тонколистовая. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР.
6. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.
7. Кучерявая И.Н. Численное исследование влияния различных факторов процесса теплообмена на эффективность охлаждения трансформаторно-выпрямительных модулей // Техн. электродинамика. – 2000. – № 3. – С. 56–61.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
9. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором. – М.: Энергия, 1968. – 328 с.
10. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 312 с.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Расчет вихревых токов и потерь в системе массивных проводников с учетом эффекта близости и воздействия внешнего магнитного поля // Техн. электродинамика. – 2001. – № 1. – С. 11–16.
12. Филипов Н.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Ленинградское отделение: Энергия, 1974. – 384 с.
13. Babaie H., Farahani H.F. Analysis of thermal behavior of high frequency transformers using finite element method. // Journal of Electromagnetic Analysis & Applications (JEMAA). – 2010. – No. 2. – Pp. 627–632.
14. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>
15. Driesen J., Deliege G., Belmans R., Hameyer K. Coupled thermo-magnetic simulation of foil-winding transformer connected to a nonlinear load // IEEE Trans. on Magnetics. – 2000. – Vol. 36. – No. 4. – Pp. 1381–1385.
16. Komarov N.S., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Lebedev B.B. High-frequency high-voltage DC isolation transformer-rectifying module for power supply of technological equipment // EPE Journal. – 2001. – Vol. 11. – No. 1. – Pp. 33–44.
17. Lussier D.T., Ormiston S.J., Marko R.M. Theoretical determination of anisotropic effective thermal conductivity in transformer windings // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 30. – No. 3. – Pp. 313–322.
18. Madzarevic V., Kapetanovic I., Tesanovic M., Kasumovic M. Different approach to thermal modeling of transformers – a comparison of methods // International Journal of Energy and Environment. – 2011. – Vol. 5. – No. 5. – Pp. 610–617.
19. Pradhan M.K., Ramu T.S. Estimation of the hottest spot temperature (HST) in power transformers considering thermal inhomogeneity of the windings // IEEE Trans on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19. – No. 4. – Pp. 1704–1712.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ОДНОФАЗНОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ З УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ТЕПЛОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

I.M.Кучерява, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: rB-irina@rambler.ru

Розроблено математичну модель і комп'ютерну методику розрахунку теплових процесів в трансформаторі з урахуванням анізотропії теплопровідності матеріалів активних елементів – магнітопроводу та обмоток. Створені обчислювальні засоби передбачають моделювання двох способів охолодження трансформатора – на основі вільної конвекції повітря та із застосуванням зовнішнього охолодження вентилятором. Такі режими охолодження досліджено на прикладі однофазного трансформатора з магнітопроводом броньової конфігурації. Показано зниження температури у разі примусового охолодження в порівнянні з природним охолодженням трансформатора. Розроблені комп'ютерні засоби можуть бути застосовані при проектуванні трансформаторів та для вивчення різних режимів їхньої роботи. Бібл. 19, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: електричні витрати, магнітопровід броньовий стрічковий, шихтований магнітопровід, анізотропія теплопровідності, вільна конвекція повітря, примусове охолодження трансформатора, комп'ютерне моделювання.

COMPUTER MODELING OF THERMAL PROCESSES IN SINGLE-PHASE TRANSFORMER CONSIDERING ANISOTROPIC THERMAL PROPERTIES OF ACTIVE ELEMENTS

I.M.Kucheriava

Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine.

E-mail: rB-irina@rambler.ru

The mathematical model and computer technique are developed to compute and study the thermal processes in a transformer taking into account the anisotropic heat conductivity of materials for active elements – magnetic core and windings. The created computing facilities provide a possibility to simulate two methods of transformer cooling – on the basis of free air convection and with the use of the external forced cooling by fan. Such two cooling conditions are investigated on the example of single-phase transformer with shell-type core. The decrease of temperature is shown in the case of forced cooling as compared to the natural cooling of the transformer. The developed computer facilities can be used for transformer design, study of different regimes and monitoring of transformer operation. References 19, tables 2, figures 4.

Key words: electrical loss, strip-wound shell-type magnetic core, laminated core, anisotropy of thermal conductivity, free air convection, forced cooling of transformer, computer modeling.

1. Belopolskii I.I., Pikalova L.G. Calculation of low-power transformers and reactors. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. – 272 p. (Rus)
2. Borisenko A.I., Danko V.G., Yakovlev A.I. Aerodynamics and heat transfer in electric motors. – Moskva: Energiia, 1974. – 560 p. (Rus)
3. Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. Cooling of industrial electric motors. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 296 p. (Rus)
4. Gandshu V.M. Distinctions of thermal computations of electromagnetic systems by program ELCUT. – <http://elcut.ru/articles/gandshou/block.pdf>. (Rus)
5. All-Union state standards 21427.0–75, 21427.1–83, 21427.2–83, 21427.4–83. Electrical sheet steel. – Moskva: Komitet standartizatsii i metrologii SSSR. (Rus)
6. Zalesskii A.M., Kukekov G.A. Thermal calculations of electric machines. – Leningrad: Energiia, 1967. – 380 p. (Rus)
7. Kucheriava I.N. Numerical simulation of the effect of different heat exchange factors on cooling efficiency of transformer-rectifier modules. // Tekhnichna elektrodynamika. – 2000. – No. 3. – Pp. 56–61. (Rus)
8. Loitsianskii L.G. Fluid mechanics. – Moskva: Nauka, 1978. – 736 p. (Rus)
9. Lopukhina E.M., Somikhina G.S. Design of asynchronous micromotors with hollow rotor. – Moskva: Energiia, 1968. – 328 p. (Rus)
10. Lopukhina E.M., Somikhina G.S. Calculation of asynchronous micromotors of single-phase and three-phase current. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. – 312 p. (Rus)
11. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Computation of eddy currents and losses in system of solid conductors taking into account proximity effect and effect of external magnetic field // Tekhnichna elektrodynamika. – 2001. – No. 1. – Pp. 11–16. (Rus)
12. Fillipov N.F. Foundations of thermal exchange in electric motors. – Leningrad: Energiia, 1974. – 384 p. (Rus)
13. Babaie H., Farahani H.F. Analysis of thermal behavior of high frequency transformers using finite element method // Journal of Electromagnetic Analysis & Applications (JEMAA). – 2010. – No. 2. – Pp. 627–632.
14. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>
15. Driesen J., Deliege G., Belmans R., Hameyer K. Coupled thermo-magnetic simulation of foil-winding transformer connected to a nonlinear load // IEEE Trans. on Magnetics. – 2000. – Vol. 36. – No. 4. – Pp. 1381–1385.
16. Komarov N.S., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Lebedev B.B. High-frequency high-voltage DC isolation transformer-rectifying module for power supply of technological equipment // EPE Journal. – 2001. – Vol. 11. – No. 1. – Pp. 33–44.
17. Lussier D.T., Ormiston S.J., Marko R.M. Theoretical determination of anisotropic effective thermal conductivity in transformer windings // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2003. – Vol. 30. – No. 3. – Pp. 313–322.
18. Madzarevic V., Kapetanovic I., Tesanovic M., Kasumovic M. Different approach to thermal modeling of transformers – a comparison of methods // International Journal of Energy and Environment. – 2011. – Vol. 5. – No. 5. – Pp. 610–617.
19. Pradhan M.K., Ramu T.S. Estimation of the hottest spot temperature (HST) in power transformers considering thermal inhomogeneity of the windings // IEEE Trans on Power Delivery. – October, 2004. – Vol. 19. – No. 4. – Pp. 1704–1712.

Надійшла 22.04.2013

Остаточний варіант 22.05.2013