

УДК 621.365.5

О. М. Шаблій,
 докт. фіз.-мат. наук,
М. С. Базар, інж.,
Ч. В. Пулька,
 докт. техн. наук,
Л. І. Цимбалюк,
 канд. фіз.-мат. наук,
О. І. Король, інж.
 Тернопільський
 національний технічний
 університет імені Івана
 Пулюя

ПИТОМА ПОТУЖНІСТЬ ТЕПЛОВИХ ДЖЕРЕЛ В ІНДУКЦІЙНИХ НАГРІВАЛЬНИХ ПРИБАДАХ

Постановка проблеми. Використання електричних опалювальних приладів в даний час є найбільш актуальним та перспективним [1]. Електричні нагрівачі можна використовувати як основне джерело тепла для опалення жилих будинків, квартир, і як додаткове, працююче в парі з газовим або твердопаливним котлом. Електрокотли мають низку переваг над установками іншого типу. Так, електричний котел простий в експлуатації та обслуговуванні, для нього не потрібно встановлювати димохід, володіє високим ККД, крім того, враховуючи складні стосунки України з країнами постачальниками природного газу, використання електроенергії для опалення стає питанням енергетичної безпеки.

Індукційним нагрівальним приладам (ІНП) властиві вище названі переваги, крім того вони перевершують ТЕНові та електродні котли не тільки за ефективністю, але й невибагливістю. Так, для ІНП підходить будь-який теплоносій, на відміну від електродних котлів, які потребують електропровідного теплоносія, за рахунок явища магнітострикції, вібрації теплообмінника при перемагнічуванні, накип на стінках теплообмінника не утворюється, на відмінну від ТЕНових. В даний час на ринку появляються перші ІНП [2 - 4], однак, будь-які теоретичні чи експериментальні дослідження їх роботи в літературних джерелах відсутні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами розроблено індукційні нагрівальні прилади [5 - 7], математично змодельовано низку фізичних процесів, які відбуваються в пристрої. Існують також інші індукційні нагрівальні пристрої, які розробляються як вітчизняними так і зарубіжними винахідниками, про що свідчать патенти [8 - 10], однак публікацій результатів теоретичних досліджень в цьому напрямку не зустрічається.

Метою роботи є отримання математичної моделі електромагнітного поля, яке створюється індуктором, для визначення питомої потужності теплових джерел, що індукуються у кожній зоні теплообмінника; це дозволить визначити електричні (активний, реактивний опори) та енергетичні (потужність, та енергію магнітного поля) параметри системи.

Результати дослідження. Для нагрівання теплоносія до необхідної температури потрібно створити в технологічному індукторі (теплообміннику)

відповідне електромагнітне поле, для якого мають місце основні поняття та відповідні фізичні закони, що описують ці процеси.

Електромагнітне поле - коливання векторних величин: \vec{E} – напруженість електричного поля та \vec{H} – напруженість магнітного поля, крім того електромагнітне поле характеризується ще такими векторами як \vec{D} – електрична індукція та \vec{B} – магнітна індукція. Згадані векторні величини зв'язані основними рівняннями електромагнітного поля, рівняннями Максвелла, котрі мають вигляд [11]:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{\delta} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

де магнітна та електрична індукція зв'язані з напруженістю магнітного та електричного полів наступними фізичними залежностями [12]:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (3)$$

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}, \quad (4)$$

де μ_0 - магнітна проникність вакууму, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ - відносна магнітна проникність матеріалу, ε_0 – електрична проникність вакууму, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, ε - відносна електрична провідність матеріалу, $\vec{\delta}$ - густина струму провідності.

Оскільки технологічний індуктор має циліндричну форму, а індуктор для нагрівання теплоносія виконаний у вигляді соленоїда, і вони розміщені концентрично, то можна вважати, що електромагнітна хвиля, яку генерує індуктор направлена перпендикулярно до поверхні технологічного індуктора та наближено вважаємо плоскою хвилею, хвилю яка утворюється векторами \vec{E} та \vec{H} , що мають лише по одній складовій \vec{E}_y і \vec{H}_z (рис.1).

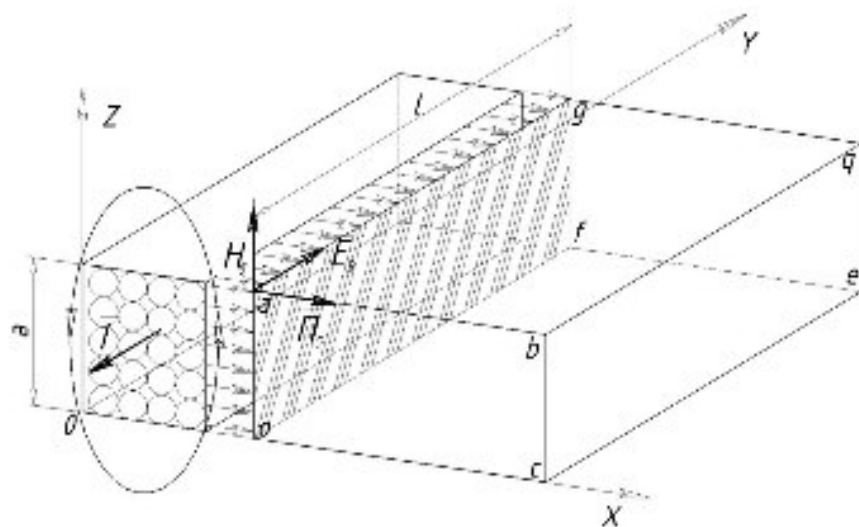


Рис. 1 – Схема для визначення складових електромагнітного поля (\vec{H} і \vec{E})

Тоді, враховуючи (3) та (4), рівняння (1) та (2) мають вигляд:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} = \delta_y = \frac{E_y}{\rho} = \gamma \cdot E_y, \quad (5)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (6)$$

де ρ - питомий опір, Ом/м, γ - питома провідність матеріалу, См/м.

В подальшому індекси z та y , будуть опускаються, бо вектори мають лише по одній складовій. Якщо вектори \vec{E} і \vec{H} синусоїдальні функції часу, то їх можна подати у вигляді [12]

$$\dot{H} = H_m e^{i(\omega t + \theta_H)} = H_m e^{i\theta_H} e^{i\omega t} = \dot{H}_m e^{i\omega t}, \quad (7)$$

$$\dot{E} = E_m e^{i(\omega t + \theta_E)} = E_m e^{i\theta_E} e^{i\omega t} = \dot{E}_m e^{i\omega t}, \quad (8)$$

де - \dot{H}_m , H_m - відповідно дійсна та уявна амплітуди напруженості магнітного поля, \dot{E}_m , E_m - відповідно дійсна та уявна амплітуди напруженості електричного поля, θ_H , θ_E - відповідні початкові фази, ω - циклічна частота [11], $\omega = 2\pi f$, тут f - частота струму, що протікає в індукторі, Гц.

Підставляючи вирази (7), (8) в рівняння (5), (6) і скоротивши їх на $e^{i\omega t}$, одержимо диференціальні рівняння для визначення амплітудних значень \dot{H}_m , \dot{E}_m . В області нагрівання, яку ми, для прикладу, позначимо індексом n . Ці рівняння мають вигляд [13]:

$$-\frac{d\dot{H}_{mn}}{dx} = \delta_{mn} = \gamma_n \cdot \dot{E}_{mn}, \quad (9)$$

$$\frac{d\dot{E}_{mn}}{dx} = -i\omega\mu_n\mu_0\dot{H}_{mn}. \quad (10)$$

Підставляючи \dot{E}_{mn} , визначене з рівняння (9), в рівняння (10), одержимо таке диференціальне рівняння:

$$-\frac{d^2\dot{H}_{mn}}{dx^2} = -i\omega\mu_n\mu_0\gamma_n\dot{H}_{mn} = -i \cdot 2k_n^2\dot{H}_{mn}, \quad (11)$$

де k_n - величина обернена до глибини проникнення електромагнітного поля Δ_n [14],

$$k_n = \frac{1}{\Delta_n} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_n}{2\rho_n}}. \quad (12)$$

Диференціальне рівняння (11) для зручності перепишемо так

$$\frac{d^2\dot{H}_{mn}}{dx^2} - i \cdot 2k_n^2\dot{H}_{mn} = 0. \quad (13)$$

Його розв'язок будемо шукати у вигляді

$$\dot{H}_{mn} = A \cdot e^{\alpha \cdot x}. \quad (15)$$

Підставивши останній вираз в рівняння (13), одержимо: $\alpha^2 A \cdot e^{\alpha x} - i \cdot 2k_n^2 A \equiv 0$. Тому, що $A \neq 0, e^{\alpha x} \neq 0$, тоді: $\alpha^2 - i \cdot 2k_n^2 = 0$.

Знаходимо корені даного квадратного рівняння $\alpha_1 = k_n \sqrt{2i} = k_n(1+i)$, $\alpha_2 = -k_n \sqrt{2i} = -k_n(1+i)$. Тоді загальний розв'язок рівняння (13) матиме вигляд:

$$\dot{H}_{mm} = A_1 \cdot e^{k_n(1+i)x} + A_2 \cdot e^{-k_n(1+i)x}. \quad (15)$$

В подальшому ми будемо використовувати вираз (15) для визначення питомої потужності теплових джерел.

Для знаходження питомої потужності теплових джерел складемо схему, згідно якої будемо орієнтуватись при виведенні формул.

Нехай маємо конструкцію (рис. 2) нагрівального пристрою, в якому два теплообмінники розташовані концентрично і між ними встановлено електричний індуктор.

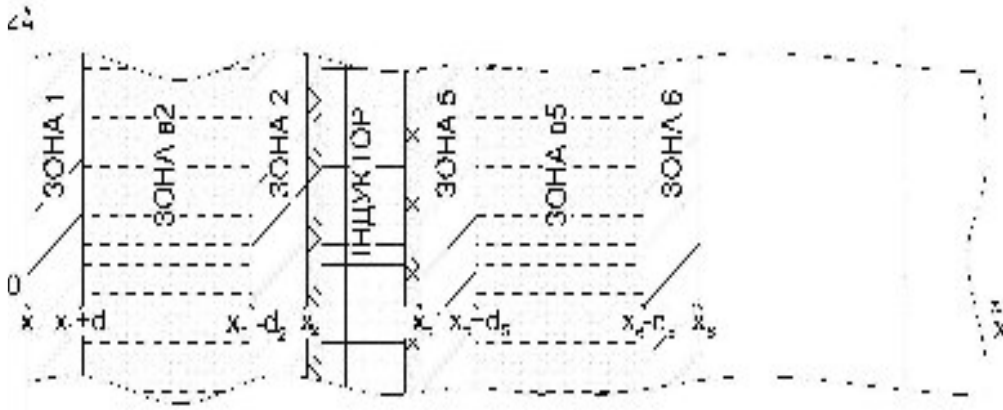


Рис. 2 - Схема для розрахунку питомої потужності теплових джерел

Знаходимо спочатку питому потужність теплових джерел в зоні 2 (рис. 2). Для цього скористаємося представленням напруженості магнітного поля в зоні 2 в комплексній формі в загальному випадку (15).

Враховуючи конструкцію приладу, від'ємний корінь відкидаємо [12], оскільки з наближенням до джерела випромінювання напруженість магнітного поля повинна зростати, тому

$$\dot{H}_{m2} = A \cdot e^{k_2(1+i)x}. \quad (16)$$

Індекс «2» означає належність величин зоні 2.

Задовольнимо умови, що при $x = x_2$, $\dot{H}_{m2} = \dot{H}_{me2} = H_{me2}$, тут H_{me2} — напруженість магнітного поля на поверхні зони 2, яка визначається на основі закону повного струму [12], $H_{me2}a = NI_1\sqrt{2}$, звідси:

$$H_{me2} = \frac{NI_1\sqrt{2}}{a}, \quad (17)$$

де I_1 — електричний струм, що тече в індукторі, A , N — кількість витків індуктора, a — висота індуктора, м.

Тоді отримаємо:

$$H_{me2} = A \cdot e^{k_2(1+i)x_2} \quad \text{звідси} \quad A = H_{me2} \cdot e^{-k_2(1+i)x_2}.$$

Враховуючи вище сказане отримуємо:

$$\dot{H}_{m2} = H_{me2} \cdot e^{k_2(1+i)(x-x_2)}. \quad (18)$$

Тоді з рівняння (9) маємо:

$$\dot{E}_{m2} = -\rho_2 \frac{dH_{m2}}{dx} = -\rho_2 k_2 \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_2(x-x_2)} \cdot e^{i\left(k_2(x-x_2) + \frac{\pi}{4}\right)}. \quad (19)$$

Отримаємо формули для амплітудних значень напруженості електричного та магнітного полів:

$$\dot{E}_{m2} = -\rho_2 k_2 \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_2(x-x_2)} \cdot e^{i\left(k_2(x-x_2) + \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (20)$$

$$\dot{H}_{m2} = H_{me2} \cdot e^{i k_2(x-x_2)} \cdot e^{k_2(x-x_2)}. \quad (21)$$

Помноживши останні вирази для визначення \dot{E}_{m2} та \dot{H}_{m2} на $e^{i\omega t}$, одержимо значення напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_2 , \dot{H}_2 в довільний момент часу, та в будь якій точці зони 2, яка визначається координатою x . У вигляді:

$$\dot{E}_2 = -\rho_2 k_2 \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_2(x-x_2)} \cdot e^{i\left(k_2(x-x_2) + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (22)$$

$$\dot{H}_2 = H_{me2} \cdot e^{i(k_2(x-x_2) + \omega t)} \cdot e^{k_2(x-x_2)}. \quad (23)$$

Питому потужність теплових джерел визначаємо використовуючи закон Джоуля-Ленца [11]:

$$w_2 = \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot \dot{E}_2 \dot{E}_2^*, \quad (24)$$

де γ_2 - питома провідність середовища зони 2, \dot{E}_2^* - комплексно спряжена величина до \dot{E}_2 , буде:

$$\dot{E}_2^* = -\rho_2 k_2 \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_2(x-x_2)} \cdot e^{-i\left(k_2(x-x_2) + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}. \quad (25)$$

Тоді питому потужність теплових джерел в зоні 2 визначаємо так:

$$w_2 = \rho_2 k_2^2 H_{me2}^2 \cdot e^{2k_2(x-x_2)}. \quad (26)$$

Аналогічно визначаємо питому потужність теплових джерел в зоні v_2 .

Задовольнивши умови спряження, що при $x = x_2 - d_2$, $\dot{H}_{mv2} = \dot{H}_{m2}$, отримаємо:

$$H_{me2} \cdot e^{k_2(1+i)((x_2-d_2)-x_2)} = A \cdot e^{k_b(1+i)(x_2-d_2)}.$$

Формули для визначення амплітудних значень напруженості електричного та магнітного полів будуть мати вигляд:

$$\dot{E}_{mv2} = -\rho_b k_b \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_b x - k_2 d_2 + k_b(x_2 - d_2)} \cdot e^{i\left(k_b x - k_2 d_2 + k_b(x_2 - d_2) + \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (27)$$

$$\dot{H}_{m_{B_2}} = H_{me2} \cdot e^{k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2)} \cdot e^{i(k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2))}. \quad (28)$$

Помноживши останні вирази (27) та (28) на $e^{i\omega t}$, одержимо значення напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_{B_2} , \dot{H}_{B_2} в довільний момент часу t , та в будь якій точці зони в2, яка визначається координатою x . Вони визначаються так:

$$\dot{E}_{B_2} = -\rho_B k_B \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2)} \cdot e^{i\left(k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2) + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (29)$$

$$\dot{H}_{B_2} = H_{me2} \cdot e^{k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2)} \cdot e^{i(k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2) + \omega t)}. \quad (30)$$

Питома потужність теплових джерел в зоні в2, матиме вигляд:

$$w_{B_2} = \rho_B k_B^2 H_{me2}^2 \cdot e^{2(k_B x - k_2 d_2 + k_B (x_2 - d_2))}. \quad (31)$$

Визначаємо питому потужність теплових джерел в зоні 1 (рис. 2).

З умовами спряження при $x = x_1 + d_1$, $\dot{H}_{m1} = \dot{H}_{m_{B_2}}$ значення напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_1 , \dot{H}_1 в довільний момент часу t , в будь-якій точці зони 1, яка визначається координатою x , матимуть вигляд:

$$\dot{E}_1 = -\rho_1 k_1 \sqrt{2} H_{me2} \cdot e^{k_B d_1 - k_2 d_2 - k_B (x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x} \cdot e^{i\left(k_B d_1 - k_2 d_2 - k_B (x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (32)$$

$$\dot{H}_1 = H_{me2} \cdot e^{k_B d_1 - k_2 d_2 - k_B (x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x} \cdot e^{i(k_B d_1 - k_2 d_2 - k_B (x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x + \omega t)}. \quad (33)$$

Питому потужність теплових джерел в зоні 1 визначаємо так:

$$w_1 = \rho_1 k_1^2 H_{me2}^2 e^{2(k_B d_1 - k_2 d_2 - k_B (x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x)}. \quad (34)$$

Тепер будемо шукати питому потужність теплових джерел в зоні 5 (рис.2). Скористаємося представленням напруженості магнітного поля в комплексній формі в загальному випадку (15). Враховуючи те, що технологічний індуктор розташований з іншої сторони (рис.2) додатній корінь відкидаємо, оскільки з збільшенням відстані від джерела випромінювання напруженість магнітного поля не може зростати, тому:

$$\dot{H}_{m5} = A \cdot e^{-k_5 (1+i) \cdot x}. \quad (35)$$

Індекс «5» означає належність величин зоні 5.

Задовольнимо умові, що при $x = x_5$, $\dot{H}_{m5} = \dot{H}_{me5} = H_{me5}$, тут H_{me5} визначається із закону про повний струм $H_{me5} = \frac{NI_1 \sqrt{2}}{a}$. Тоді отримаємо формули для амплітудних значень напруженості електричного та магнітного, у вигляді:

$$\dot{E}_{m5} = \rho_5 k_5 \sqrt{2} H_{me5} \cdot e^{k_5 (x_5 - x)} \cdot e^{i\left(k_5 (x_5 - x) + \frac{\pi}{4}\right)}, \quad (36)$$

$$\dot{H}_{m5} = H_{me5} \cdot e^{k_5 (x_5 - x)} \cdot e^{i(k_5 (x_5 - x))}. \quad (37)$$

Помноживши останні вирази для визначення \dot{E}_{m5} та \dot{H}_{m5} на $e^{i\omega t}$, одержимо значення напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_5 , \dot{H}_5 в довільний момент часу t , в

будь якій точці зони 5, яка визначається координатою x , вони мають вигляд:

$$\dot{E}_5 = \rho_5 k_5 \sqrt{2} H_{me5} \cdot e^{k_5(x_5-x)} \cdot e^{i\left(k_5(x_5-x) + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (38)$$

$$\dot{H}_5 = H_{me5} \cdot e^{k_5(x_5-x)} \cdot e^{i(k_5(x_5-x) + \omega t)}. \quad (39)$$

Питома потужність теплових джерел в зоні 5 визначається рівністю

$$w_5 = \rho_5 k_5^2 H_{me5}^2 e^{2k_5(x_5-x)}. \quad (40)$$

Знайдемо тепер питому потужність теплових джерел в зоні в5. Визначення проводимо аналогічно. Індекс «в5» означає належність величин зоні в5. Задовольняючи умовам, що при $x = x_5 + d_5$, $\dot{H}_{mv5} = \dot{H}_{m5}$ отримаємо формули для напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_{b5} , \dot{H}_{b5} в довільний момент часу t , в будь якій точці зони в5, яка визначається координатою x . Вони мають вигляд:

$$\dot{E}_{b5} = \rho_b k_b \sqrt{2} H_{me5} \cdot e^{-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x} \cdot e^{i\left(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (41)$$

$$\dot{H}_{b5} = H_{me5} \cdot e^{-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x} \cdot e^{i(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x + \omega t)}. \quad (42)$$

Використовуючи закон Джоуля-Ленца, визначимо питому потужність теплових джерел в зоні в5

$$w_{b5} = \rho_b k_b^2 H_{me5}^2 e^{2(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x)}. \quad (43)$$

Визначимо питому потужність теплових джерел в зоні 6 (рис. 2).

Напруженість магнітного поля в зоні 6 задовольнить умова при $x = x_6 - d_6$, $\dot{H}_{m6} = \dot{H}_{mv5}$. Задовольнивши цю умову, отримаємо значення напруженості електричного та магнітного полів \dot{E}_6 , \dot{H}_6 в довільний момент часу t , в будь якій точці зони 6, яка визначається координатою x , у вигляді

$$\dot{E}_6 = \rho_6 k_6 \sqrt{2} H_{me5} \cdot e^{-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6(x_6 - d_6) - k_6 x} \cdot e^{i\left(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6(x_6 - d_6) - k_6 x + \frac{\pi}{4} + \omega t\right)}, \quad (44)$$

$$\dot{H}_6 = H_{me5} \cdot e^{-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6(x_6 - d_6) - k_6 x} \cdot e^{i(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6(x_6 - d_6) - k_6 x + \omega t)}. \quad (45)$$

Питому потужність теплових джерел в зоні 6 визначаємо за допомогою закону Джоуля-Ленца:

$$w_6 = \rho_6 k_6^2 H_{me5}^2 e^{2(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6(x_6 - d_6) - k_6 x)}. \quad (46)$$

Таким чином ми отримали функцію розподілу питомої потужності в теплообміннику, яка має вигляд:

$$w = \begin{cases} w_1 = \rho_1 k_1^2 H_{me2}^2 e^{2(k_b d_1 - k_2 d_2 - k_b(x_2 - d_2) - k_1 d_1 + k_1 \cdot x)} & x_1 \leq x \leq x_1 + d_1 \\ w_{B_2} = \rho_B k_B^2 H_{me2}^2 \cdot e^{2(k_b x - k_2 d_2 + k_b(x_2 - d_2))} & x_1 + d_1 \leq x \leq x_2 - d_2 \\ w_2 = \rho_2 k_2^2 H_{me2}^2 \cdot e^{2k_2 \cdot (x - x_2)} & x_2 - d_2 \leq x \leq x_2 \\ w_5 = \rho_5 k_5^2 H_{me5}^2 e^{2k_5 \cdot (x_5 - x)} & x_5 \leq x \leq x_5 + d_5 \\ w_{B5} = \rho_B k_B^2 H_{me5}^2 e^{2(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b x)} & x_5 + d_5 \leq x \leq x_6 - d_6 \\ w_6 = \rho_6 k_6^2 H_{me5}^2 e^{2(-k_5 d_5 + k_b(x_5 + d_5) - k_b(x_6 - d_6) + k_6 \cdot (x_6 - d_6) - k_6 \cdot x)} & x_6 - d_6 \leq x \leq x_6 \end{cases} \quad (47)$$

Для прикладу на рис.3 подано графічну залежність питомої потужності в теплообміннику від координати, накладену на розрахункову схему теплообмінника. Графік побудовано для n наступних параметрів: $\rho_1 = \rho_2 = \rho_5 = \rho_6 = 560e-9$ Ом·м, $\rho_{B2} = \rho_{B5} = 50$ Ом·м, $f = 50$ Гц, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_5 = \mu_6 = 40$, $\mu_B = 1$, $N_i = 200$ витків, $|I_i| = 22.3$ А, $a = 0.093$ м, $x_1 = 0$, $d_1 = 0.005$ м, $x_2 = 0.035$ м, $d_2 = 0.01$ м, $x_5 = 0.055$ м, $d_5 = 0.01$ м, $x_6 = 0.115$ м, $d_6 = 0.03$ м.

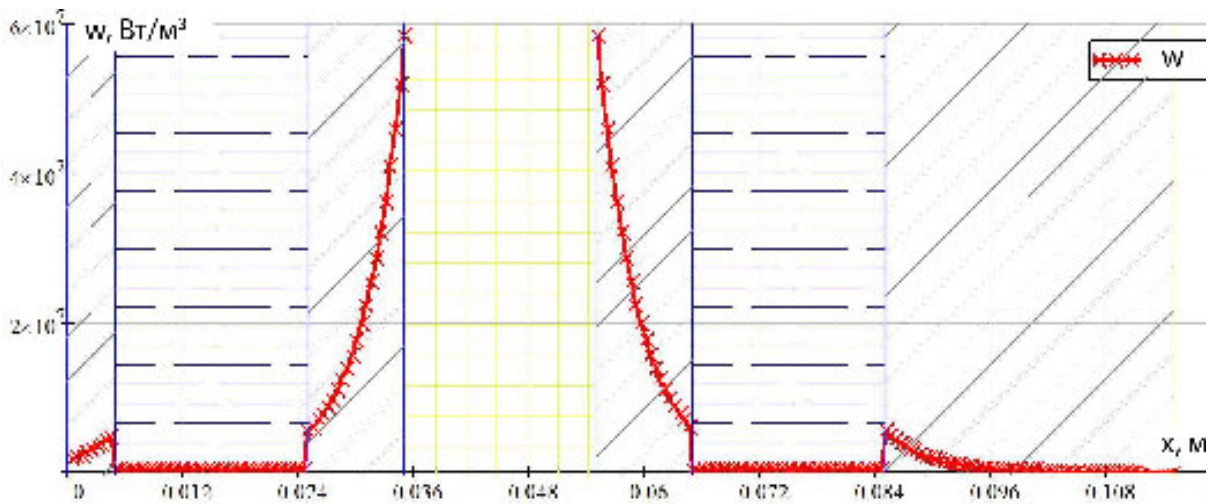


Рис.3 - Графічна залежність питомої потужності в теплообміннику від координати, накладена на розрахункову схему теплообмінника

З графіка видно, що основна частина питомої потужності виділяється в зонах 2 та 5, а в зонах 1 та 6 порівняно мало, це пов'язано з тим що товщина стінки цих областей приблизно дорівнює глибині проникнення хвилі, тому хвиля проникає лише в зони 2 та 5, а до зон 1 та 6 доходить лише мала частина електромагнітного поля. В зонах в2 та в5 питому потужність можна вважати постійною, це пояснюється тим що магнітна проникність теплоносія (в даному випадку води) дорівнює одиниці, а питомий опір досить великий.

Висновки. Отримано вирази для визначення основних характеристик електромагнітного поля, через які визначається питома потужність теплових джерел в кожній зоні технологічного індуктора, в залежності від координати, геометричних та фізичних параметрів індукційного нагрівального пристрою.

Література

1. О.М. Шаблій Високопродуктивна енергоощадна технологія індукційного нагрівання [Текст] / Шаблій О.М. та інші // Паливно-енергетичний комплекс України. Енергоефективність. Флагмани вугільної промисловості / українська конфедерація журналістів, - К. 2011, - С.157-160.

2. Индукционные котлы EXPRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/induct-boilers.html>.
3. Индукционные электронагреватели «Эдисон» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://protek.if.ua/elecon.html>.
4. Вихревой Индукционный Нагреватель «ВИН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vinteplo.ru/catalog/1>
5. Пристрій для індукційного нагрівання теплоносія [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар // Патент на корисну модель №57981 по заявці №u2010 10226 від 19.08.2010р. опубліковано Б. №6 від 25.03.2011 р.
6. Індукційний нагрівач [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар. // Патент на корисну модель №64393 по заявці №u2011 03585 від 25.03.2011р. опубліковано Б. №21 від 10.11.2011 р.
7. Індукційний нагрівач [Текст]/ Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Базар М.С. // Патент на корисну модель №66291 по заявці №u2011 08038 від 25.06.2011р. опубліковано Б. №24 від 26.12.2011 р.
8. Электроиндукционный котел В.Ф. Короля [Текст] / В.Ф. Король // Патент на винахід №27932 по заявці №95041615 від 11.04.1995 р. опубліковано Б. №5 від 16.10.2000 р.
9. Індукційний нагрівач діелектричної речовини [Текст] / Якубов А.Ш., Якубов К.А. // Патент на корисну модель №393116 по заявці №u200809734 від 25.07.2008р. опубліковано Б. №4 від 25.02.2009 р.
10. Індукційний нагрівач [Текст] / Чеславський В.Ф.// Патент на корисну модель №60119 по заявці №u2003020904 від 03.02.2003р. опубліковано Б. №9 від 15.09.2003 р.
11. Матвеев, А.М. Электричество и магнетизм [Текст] / А.М. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
12. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 263 с.
13. Базар М.С., Математичне моделювання плоских електромагнітних хвиль [Текст] / Базар М.С. // Тези II науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» 25 квітня 2012 року, ТНТУ ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, С. -14.
14. Шаблій О. Визначення питомої потужності теплових джерел в стінці технологічного індуктора / Шаблій О., Базар М. // Конференція „ Інформаційні моделі, системи та технології “ (20 травня 2011 р.). - Тернопіль: ТНТУ, 2011. С.-5.

УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВИХ ИСТОЧНИКОВ В ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

О.М. Шаблій, М.С. Базар, Ч.В. Пулька, Л.И. Цымбалюк, О.И. Король

Разработана математическая модель распространения электромагнитного поля в теплообменнике. На основе этой модели, а также с использованием закона Джоуля - Ленца, получены выражения позволяющие определить удельную мощность тепловых источников в каждой области теплообменника, в зависимости от координаты. Модель учитывает как геометрические размеры устройства так и физические и электротехнические свойства материала, из которого изготовлен теплообменник, а также свойства теплоносителя.

SPECIFIC POWER OF HEAT SOURCES IN THE INDUCTION HEATING DEVICES

O.M. Shabliy, M.S. Basar, Ch.V. Pulka, L.I. Tsybalyuk O.I. Korol

Mathematic model of the electro-magnetic field propagation in the heat-exchanger has been developed. Basing on this model, as well as using the Joule-Lenz law the expressions, which make possible to find the specific power of the heat sources in each area of the heat-exchanger area depending on the coordinate, have been obtained. The model takes into account both the geometric sizes of the device and the physical and electro-engineering properties of the material the heat – exchanger is made of, as well as the properties of the heat carrier.