

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ПРОСТОРОВОЮ БРОНЬОВОЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ**О. С. Садовий**

Миколаївський національний аграрний університет

вул. Георгія Гонгадзе, 9, м. Миколаїв, 54020, Україна. E-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua

Отримано цільові функції маси та вартості просторової броньової електромагнітної системи однофазного трансформатора, яка містить магнітопровід з двох пар навитих осердь, з однаковими прямокутними обмотковими вікнами. Визначено екстремальні значення зазначених функцій та виконано їх порівняння з аналогами стрижневої та броньової планарних електромагнітних систем, що мають прямокутні перерізи стрижнів.

Ключові слова: однофазний трансформатор, просторова чотириконтурна електромагнітна система, керовані змінні, цільові функції, екстремуми.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ БРОНЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ**А. С. Садовой**

Николаевский национальный аграрный университет

ул. Георгия Гонгадзе, 9, г. Николаев, 54020, Украина. E-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua

Получены целевые функции массы и стоимости пространственной броневой электромагнитной системы однофазного трансформатора, которая содержит магнітопровід из двух пар навитых сердечников, с одинаковыми прямоугольными обмоточными окнами. Определены экстремальные значения указанных функций и выполнено их сравнение с аналогами стержневой и броневой планарных электромагнитных систем, имеющих прямоугольные сечения стержней.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, пространственная четырёхконтурная электромагнитная система, управляемые переменные, целевые функции, экстремумы.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Важливим завданням для сучасної промисловості є впровадження енерго-ресурсозберігаючих технологій та систем. Удосконалення хоча б одного енергоємного та багатовартісного елемента дає підвищення енергозберігаючої здатності системи у цілому. Основними енергоємними та габаритними елементами сучасного обладнання є електромагнітні статичні пристрої (ЕСП) середньої та малої потужності [1, 2]. Підвищення технічного рівня (зниження маси, вартості та втрат активної потужності) зазначених ЕСП є основною отримання суттєвого техніко-економічного ефекту.

Мета дослідження. Визначення та порівняння показників технічного рівня (ПТР) однофазного трансформатора (ОТ), що має просторову броньову електромагнітну систему (ЕМС) з існуючими аналогами планарних ЕМС.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. До сучасного виробництва ЕСП висуваються вимоги щодо застосування нових конструктивно-технологічних рішень [3], матеріалів і комплектуючих [3, 4]. При цьому загальні структурні схеми ЕМС одно- і трифазних ЕСП та конструктивні рішення магнітопроводів є незмінними з початку ХХ століття і досягли певної межі розвитку [1–6].

Крім ОТ і ОР систем та пристроїв силового та побутового електрообладнання [1–7], застосовуються спеціальні однофазні ЕСП, зокрема радіоелектронного і вимірювального (струму і напруги), сигнального і перетворювального (узгоджувальні, імпульсні, фільтруючі, живлення електронних пристроїв...), зварювального [1, 7–9] та підводно- (підземно) – технологічного і авіакосмічного [10, 11] призначень.

Вибір технічного рішення трансформатора (дротів) з мінімальними показниками маси, вартості та втрат активної потужності для промислового призначення та систем спеціалізованого електрообладнання є проблемним.

Питання зниження маси, габаритних розмірів та втрат активної потужності, а також зручності будовування елементів електрообладнання, залишаються першочерговими при жорстких обмеженнях на масо-габаритні характеристики вузлів та елементів різноманітних систем. Дане завдання особливо актуальне при розробці систем електрообладнання підводних та авіакосмічних апаратів [9, 10].

Основною сучасною вимогою з позицій розвитку електромеханіки є підвищення ККД та комплексне енергоресурсозбереження при виробництві та експлуатації елементів електрообладнання [1–6]. При цьому нові промислові розробки обертових машин та ЕСП у конструктивно-структурному сенсі не відрізняються від зразків середини та кінця ХХ століття [1, 4, 5, 9]. Однак розроблені певні нетрадиційні конструктивно-технологічні рішення, що направлені на удосконалення та підвищення ПТР пристроїв електромеханіки, в тому числі ЕСП, на основі структурно-геометричних перетворень елементів ЕМС. Також тенденцією останніх десятиліть є підвищення уваги до досліджень і розробок ЕСП як планарних, так і просторових структур [4, 8, 11].

Таким чином, важливою і актуальною є задача дослідження однофазних ЕМС ЕСП з нетрадиційними магнітопроводами.

На сьогоднішній день відомі різновиди ЕМС, у тому числі наведені на (рис. 1)

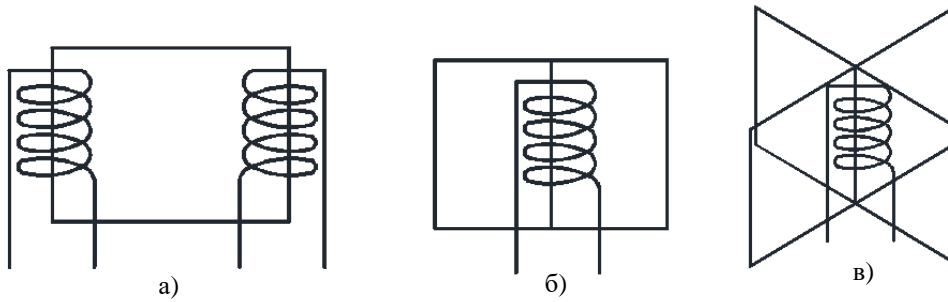


Рисунок 1 – Структурні схеми планарних (а, б) та просторової (в) однофазних електромагнітних систем індукційних статичних перетворювачів

Крім загальновідомих ЕМС (рис. 1, а-в), що перебувають у виробництві, у [12] запропоновано нетрадиційну конструкцію просторової броньової ЕМС (рис. 2), що складається з двох пар навитих осердь, які мають однакові прямокутні обмотки

вікна, однак відрізняються розмірами прямокутних перерізів та мають у кожній парі однакові розміри. Це надає можливість деякого зниження, згідно [12], маси чотирьохконтурного магнітопроводу та маси ЕМС структури (рис. 1, в).

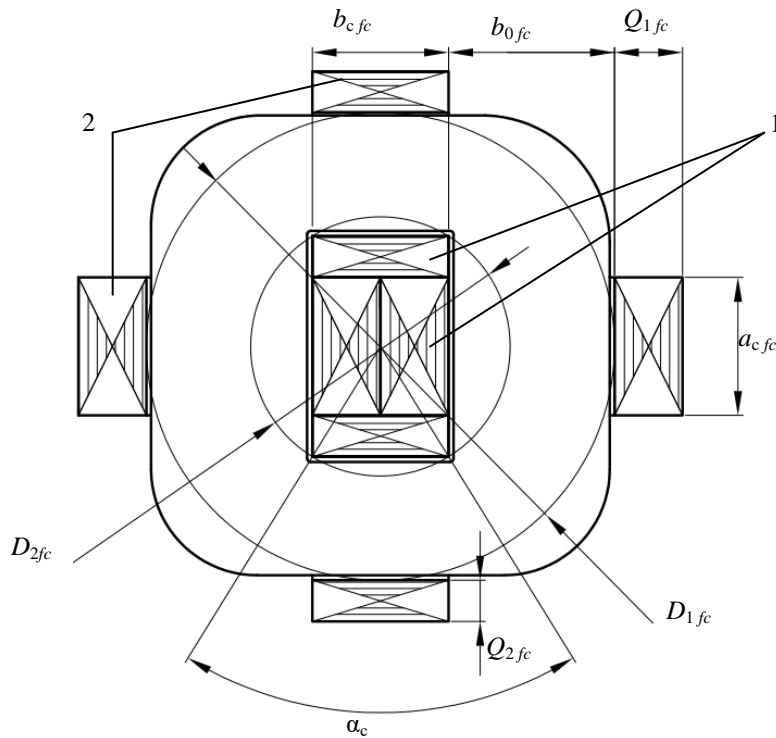


Рисунок 2 – Конструктивна схема і розрахункові параметри броньової просторової електромагнітної системи з чотирьохконтурним витим магнітопроводом та прямокутним перерізом стрижня: 1 – стрижень; 2 – ярма

Уніфікація осердь (секцій) магнітопроводу призводить до прямокутного перерізу стрижня ЕМС структури (рис. 1, в), при якому за основними ПТР подібна ЕМС не відрізняється від броньової з центральним кутом стрижня $\alpha_c=90^\circ$.

Оптимізація ЕСП виконується на основі математичних моделей з окремими або інтегральним критеріями оптимізації та сукупністю незалежних і залежних керованих змінних (КЗ). Оптимізаційні КЗ включають електромагнітні навантаження (ЕМН) і елементи геометрії, які відповідають конкретним конфігураціям котушок обмоток і стрижнів магнітопроводів, [1, 4–6], що ускладнює оптимізаційний аналіз (структурний синтез ЕМС). Для аналітичної оцінки впливу перетворення конфігурацій і структур ЕМС на масо-вартісні показники однофазних ЕСП

доцільним є застосування методу цільових функцій (ЦФ) з безрозмірними оптимізаційними складовими та універсальними складовими з відносними геометричними і електромагнітними керованими змінними (КЗ) [13]

$$F_{kii} = K_{cii} (\sqrt[4]{\Pi_{ид}})^3 \Pi_{kii}^* \quad (1)$$

де $\Pi_{ид}$ – показник вихідних даних та ЕМН; K_{cii} – складова питомих показників використовуваних матеріалів $K \geq 3$ оптимізаційних ЦФ; Π_{kii}^* – безрозмірна оптимізаційна складова, яка характеризує ЦФ, основними з яких є функції маси F_{1ii} , вартості F_{2ii} і втрат активної потужності F_{3ii} ii-го варіанту ЕМС.

Екстремуми Π_{kii}^* безрозмірних складових ЦФ (1) є ПТР ЕСП. Кожна з Π_{kii}^* залежить від коефіцієнта заповнення обмоткового вікна провідниковим мате-

ріалом котушок обмоток (класу напруги) $K_{30}=0,3\dots0,2$ та двох універсальних ідентичних і прийнятних для будь-яких з існуючих і можливих варіантів ЕМС геометричних КЗ - відношень a_m зовнішнього діаметра D_{1ii} і внутрішнього діаметру D_{2ii} розрахункових кіл магнітопроводу кожного ii -го варіанту ЕМС, відношення λ_0 висоти h_{0ii} і ширини b_{0ii} обмоткового вікна та центрального кута стрижня α_c [13]:

$$\Pi_{1(2)ii} = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c); \quad (2)$$

$$a_m = D_{1ii}/D_{2ii}; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_{0ii}/b_{0ii}. \quad (4)$$

Складова K_{3ii} цільової функції (1) включає, у залежності від критерію оптимізації, співвідношення показників питомих густин матеріалів (ЕТС і обмоткового матеріалу, найчастіше міді $\gamma_o/\gamma_c=8,9/7,65$ та їх вартостей $C_o/C_c=3,5\dots5,5$, коефіцієнти щільності укладання обмотки $K_\gamma=1,13$ та випучування $K_\nu=1,15$ витків котушок при просочуванні [1, 2], а також коефіцієнт заповнення магнітопроводу ЕТС $K_{3c}=0,91$.

Побудова ММ просторової броньової ЕМС, що складається з двох пар навитих осердь, які мають однакові прямокутні обмоткові вікна магнітопроводу, виконується з застосуванням геометричних параметрів з позначеннями, що зазначені відповідно до рис. 2.

Перша КЗ (3) ЦФ (1) ММ варіантів однофазних ЕМС з прямокутними УК

$$a_m = D_{1fc}/D_{2fc}, \quad (5)$$

де D_{1fc} , D_{2fc} – розрахункові діаметри магнітопроводу просторової броньової ЕМС (рис. 3).

Друга КЗ (1) ЦФ ЕМС

$$\lambda_0 = h_{0fc}/b_{0fc}, \quad (6)$$

де h_{0fc} , b_{0fc} – висота і ширина обмоткового вікна магнітопроводу просторової броньової ЕМС.

Величини сторін a_c та b_c перерізу стрижня визначаються через D_{2fc} та центральний кут стрижня α_c виразами:

$$a_{cfc} = D_{2fc} \sin(\alpha_c/2); \quad (7)$$

$$b_{cfc} = D_{2fc} \cos(\alpha_c/2). \quad (8)$$

Площа ЕТС перерізу стрижня магнітопроводу ЕМС визначається з урахуванням (7) та (8)

$$S_{cfc} = K_{3c} a_{cfc} b_{cfc} = K_{3c} D_{2fc}^2 \sin(\alpha_c)/2. \quad (9)$$

Ширина обмоткового вікна b_{0fc} залежить від D_{2fc} , a_m та (8)

$$b_{0fc} = D_{2fc}/2 - b_{cfc}/2 = D_{2fc}/2(a_m - \sin(\alpha_c/2)). \quad (10)$$

Маса ЕТС магнітопроводу ЕМС визначається з використанням (6), (9) та (10)

$$\begin{aligned} m_{fc} = & K_{3c} \gamma_c (4h_{0fc} a'_{cfc} (b_{cfc}/2) + \\ & + 4b_{0fc} a'_{cfc} (b_{cfc}/2) + 2\pi a'_{cfc} (b_{cfc}/2)^2 + \\ & + 4b_{cfc} b_{0fc} Q_{fc} + 4b_{cfc} h_{0fa} Q_{fc} + 2\pi b_{cfc} Q_{fc}^2) = \\ = & K_{3c} \gamma_c (D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) D_{2fc} (\cos(\alpha_c/2) - 0,5 \sin(\alpha_c/2)) \times \\ & \times \lambda_0 D_{2fc} (a_m - (\alpha_c/2)) + D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) D_{2fc} \times \\ & \times (\cos(\alpha_c/2) - 0,5 \sin(\alpha_c/2)) D_{2fc} (a_m - (\alpha_c/2)) + \\ & + 0,5\pi D_{2fc} (\cos(\alpha_c/2) - 0,5 \sin(\alpha_c/2)) \times \\ & \times D_{2fc}^2 \sin^2(\alpha_c/2) + D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) \times \\ & \times 0,5 D_{2fc} (a_m - \sin(\alpha_c/2)) D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) + \\ & + 0,5 D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) D_{2fc} (a_m - \sin(\alpha_c/2)) \times \\ & \times D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) \lambda_0 + 2\pi D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) \times \\ & \times (0,25 D_{2fc} \sin(\alpha_c/2))^2) = K_{3c} \gamma_c \frac{D_{2fc}^3}{2} \sin \alpha_c \times \\ & \times ((\lambda_0 + 1)(a_m - \sin(\alpha_c/2)) + \\ & + \frac{\pi}{4} (\sin(\alpha_c/2) + \frac{1}{2} \cos(\alpha_c/2))) \end{aligned} \quad (11)$$

де складові a'_{cfc} і Q_{fc} визначаються формулами:

$$\begin{aligned} a'_{cfc} = & a_{cfc} - 2 \frac{b_{cfc}}{4} = \\ = & D_{2fc} \cos(\alpha_c/2) - 0,5 D_{2fc} \sin(\alpha_c/2) = \\ = & D_{2fc} (\cos(\alpha_c/2) - 0,5 \sin(\alpha_c/2)); \\ Q_{fc} = & \frac{b_{cfc}}{4} = 0,25 D_{2fc} \sin(\alpha_c/2). \end{aligned}$$

На основі (9) і (10) отримуємо базові рівняння [13] ЕМС та зв'язку S_{cfc} і b_{0fc}

$$\begin{aligned} S_{cfc} = & \Pi_{ид} / (S_{0fc} K_{30}) = \Pi_{ид} / (b_{0fc}^2 \lambda_{0fc} K_{30}) = \\ = & 4\Pi_{ид} / (D_{2fc}^2 \lambda_{0fc} (\sin(\alpha_c/2))^2 K_{30}), \end{aligned} \quad (12)$$

де S_{0fc} – площа обмоткового вікна ЕМС,

$$S_{0fc} = h_{0fc} b_{0fc} K_{30} = b_{0fc}^2 \lambda_{0fc} K_{30}. \quad (13)$$

З рівності рівнянь (9) та (12) випливає

$$\begin{aligned} K_{3c} D_{2fc}^2 \sin(\alpha_c)/2 = \\ = & 4\Pi_{ид} / D_{2fc}^2 \lambda_{0fc} (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 K_{30}; \\ D_{2fc} = & \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c) (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Після підстановки (14) в (11), отримуємо вираз визначення маси ЕТС магнітопроводу ЕМС (рис. 2)

$$m_{mfc} = \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times K_{3c} \gamma_c \frac{1}{2} \sin \alpha_c \times \left((\lambda_0 + 1)(a_m - \sin(\alpha_c/2)) + \frac{\pi}{4} \left(\sin(\alpha_c/2) + \frac{1}{2} \cos(\alpha_c/2) \right) \right) = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{mfc}^*, \quad (15)$$

де Π_{mfc}^* – безрозмірний показник маси магнітопроводу,

$$\Pi_{mfc}^* = \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times K_{3c} \gamma_c \frac{1}{2} \sin \alpha_c \left((\lambda_0 + 1)(a_m - \sin(\alpha_c/2)) + \frac{\pi}{4} \left(\sin(\alpha_c/2) + \frac{1}{2} \cos(\alpha_c/2) \right) \right). \quad (16)$$

При підстановці (7), (8), та (10), рівняння середньої довжини витка котушки просторової броньової ЕМС матиме вид

$$l_{wfc} = 2(a_{fc} + b_{fc}) + \pi b_{0fc} = D_{2fc} (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4). \quad (17)$$

У результаті підстановки (13) і (14) в (17) отримаємо залежність визначення маси мідної обмотки для ЕМС (рис. 2)

$$m_{ofc} = \gamma_o K_B K_Y K_{30} D_{2fc}^3 \lambda_0 0,5(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 \times (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4). \quad (18)$$

Підстановка (14) перетворює (18) до виду

$$m_{ofc} = \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times \gamma_o K_B K_Y K_{30} 0,5 \lambda_0 (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 \times (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/4) = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ofc}^*, \quad (19)$$

де Π_{ofc}^* – безрозмірний показник ЦФ маси активних матеріалів обмотки ЕМС.

$$\Pi_{ofc}^* = \left(\sqrt[4]{8 / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times \gamma_o K_B K_Y K_{30} 0,5 \lambda_0 (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 \times (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + 0,25 \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))). \quad (20)$$

Маса m_{afc} та вартість C_{afc} ЕМС (рис. 2) визначаються на основі (16) і (20) рівняннями:

$$m_{afc} = m_{mfc} + m_{ofc} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{mfc}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ofc}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{1fc}^*; \quad (21)$$

$$C_{afc} = C_{mfc} + C_{ofc} = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{mfc}^* + \gamma_o C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ofc}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{2fc}^*, \quad (22)$$

де Π_{1fc}^* та Π_{2fc}^* – відносні показники маси та вартості просторової ЕМС (рис. 2).

$$\Pi_{1fc}^* = \left(\sqrt[4]{8 / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times \left(\frac{1}{2} K_{3c} \sin \alpha_c \left((\lambda_0 + 1)(a_m - \sin(\alpha_c/2)) + \frac{\pi}{4} \left(\sin(\alpha_c/2) + \frac{1}{2} \cos(\alpha_c/2) \right) \right) \right) + \frac{\gamma_o}{\gamma_c} K_B K_Y K_{30} \times 0,5 \lambda_0 (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi(a_m - \sin(\alpha_c/2))/8); \quad (23)$$

$$\Pi_{2fc}^* = \left(\sqrt[4]{8 / (K_{30} K_{3c} \lambda_0 \sin(\alpha_c)(a_m - \sin(\alpha_c/2))^2)} \right)^3 \times \left(\frac{1}{2} K_{3c} \sin \alpha_c + \left((\lambda_0 + 1)(a_m - \sin(\alpha_c/2)) + \frac{\pi}{4} \left(\sin(\alpha_c/2) + \frac{1}{2} \cos(\alpha_c/2) \right) \right) \times \frac{C_o \gamma_o}{C_c \gamma_c} K_B K_Y K_{30} 0,5 \lambda_0 (a_m - \sin(\alpha_c/2))^2 \times (\sin(\alpha_c/2) + \cos(\alpha_c/2) + \pi/8(a_m - \sin(\alpha_c/2))) \right). \quad (24)$$

Екстремуми (мінімуми) Π_{1fce}^* , Π_{2fce}^* оптимізаційних складових (23)-(24), отримані для трьох значень K_{30} , наведено у табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1 – Екстремальні значення керованих змінних та показників маси однофазної броньової просторової електромагнітної системи з прямокутним перерізом стрижня витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних			Значення Π_{1fce}^* , в.о.
	a_m , в.о.	λ_0 , в.о.	α_c , Град.	
0,3	1,85	2,146	79,048	20,99
0,25	1,963	2,138	78,997	22,284
0,2	2,116	2,129	78,935	24,036

Таблиця 2 – Екстремальні значення показників вартості однофазної броньової просторової електромагнітної системи з прямокутним перерізом стрижня витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Співвідношення вартостей обмоткової міді й електротехнічної сталі, в.о				
	3,5	4	4,5	5	5,5
0,3	37,561	40,193	42,706	45,12	47,45
0,25	39,332	42,024	44,593	47,057	49,433
0,2	41,731	44,505	47,147	49,68	52,12

З метою визначення кращого варіанту ЕМС за критерієм мінімуму маси, були взяті екстремальні значення керованих змінних та показники маси стрижневої та броньової ЕМС ЕСП, отримані в [14, 15], зведені у табл. 3. Використовувані при порівнянні визначені в роботах [14, 15] екстремуми пока-

зники вартості броньової та стрижневої ЕМС, зведені до табл. 4.

За результатами аналізу отриманих даних побудовано залежності щодо порівняння стрижневої, броньової та просторової броньової ЕМС за критеріями мінімумів показників маси (рис. 3) та вартості (рис. 4).

Таблиця 3 – Екстремальні значення керованих змінних та показників маси однофазних планарних стрижневої та броньової електромагнітних системи з прямокутними утворюючими контурами стрижневого витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керованих змінних			Значення мінімуму показника маси, в.о.
	a_m , в.о.	λ_0 , в.о.	α_c , град.	
Стрижнева електромагнітна система				
0,3	1,879	2,1	50,474	19,748
0,25	2,013	2,095	50,362	20,778
0,2	2,196	2,089	50,229	22,172
Броньова електромагнітна система				
0,3	1,443	2,081	50,062	20,363
0,25	1,537	2,076	49,957	21,587
0,2	1,665	2,07	49,836	23,245

Таблиця 4 – Екстремальні значення показників вартості однофазних планарних стрижневої та броньової електромагнітних системи з прямокутними утворюючими контурами стрижневого витого магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Співвідношення вартостей обмоткової міді й електротехнічної сталі, в.о				
	3,5	4	4,5	5	5,5
Стрижнева електромагнітна система					
0,3	37,682	40,597	43,393	46,088	48,696
0,25	39,091	42,054	44,893	47,629	50,274
0,2	40,999	44,027	46,926	49,715	52,411
Броньова електромагнітна система					
0,3	36,827	39,454	41,964	44,376	46,706
0,25	38,502	41,186	43,748	46,208	48,581
0,2	40,771	43,532	46,164	48,689	51,122

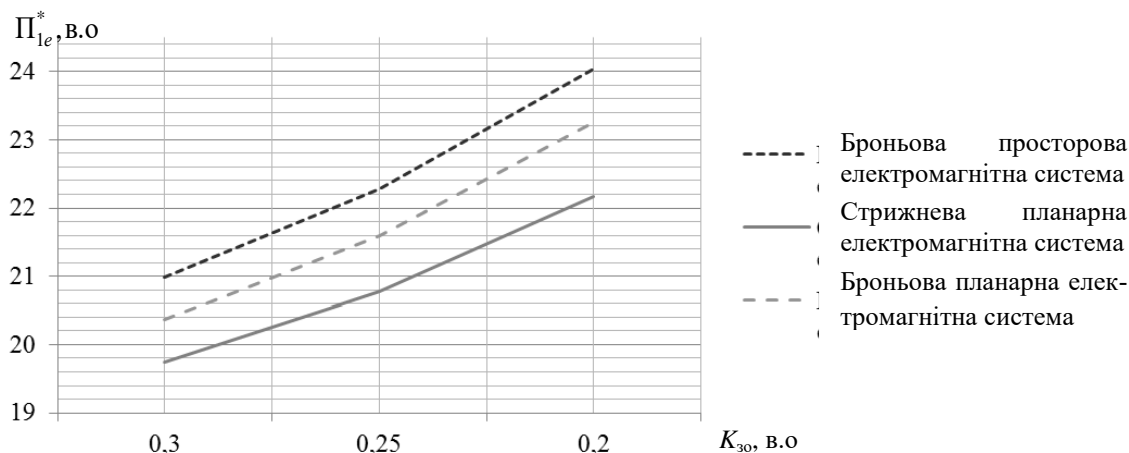


Рисунок – 3 Екстремуми показників маси при різних значеннях класу напруги стрижневої, броньової та просторової броньової електромагнітних систем

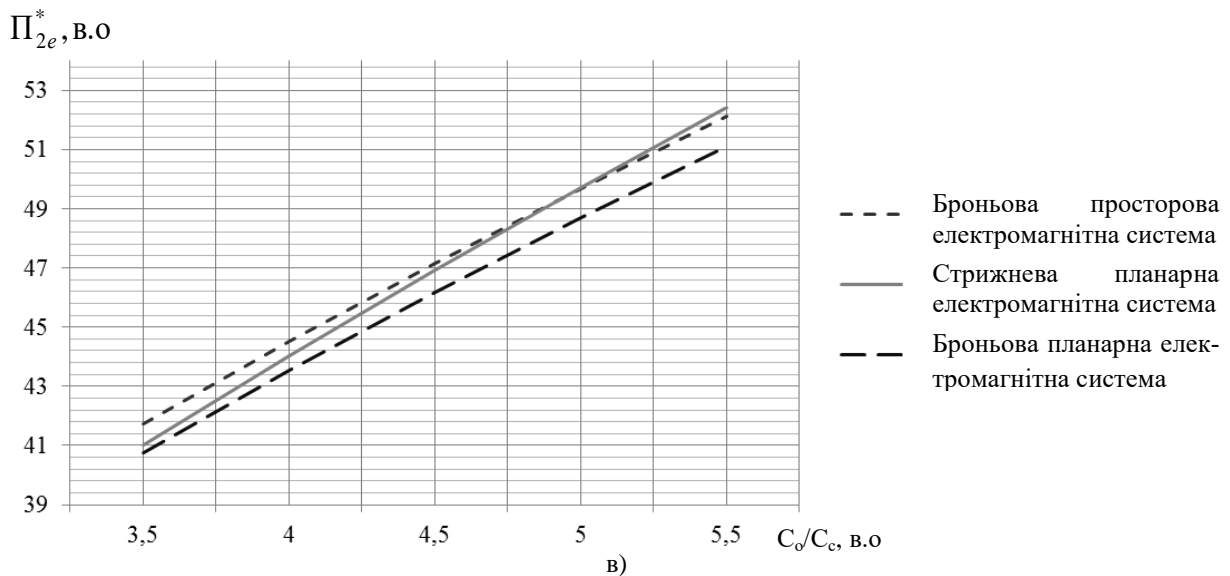
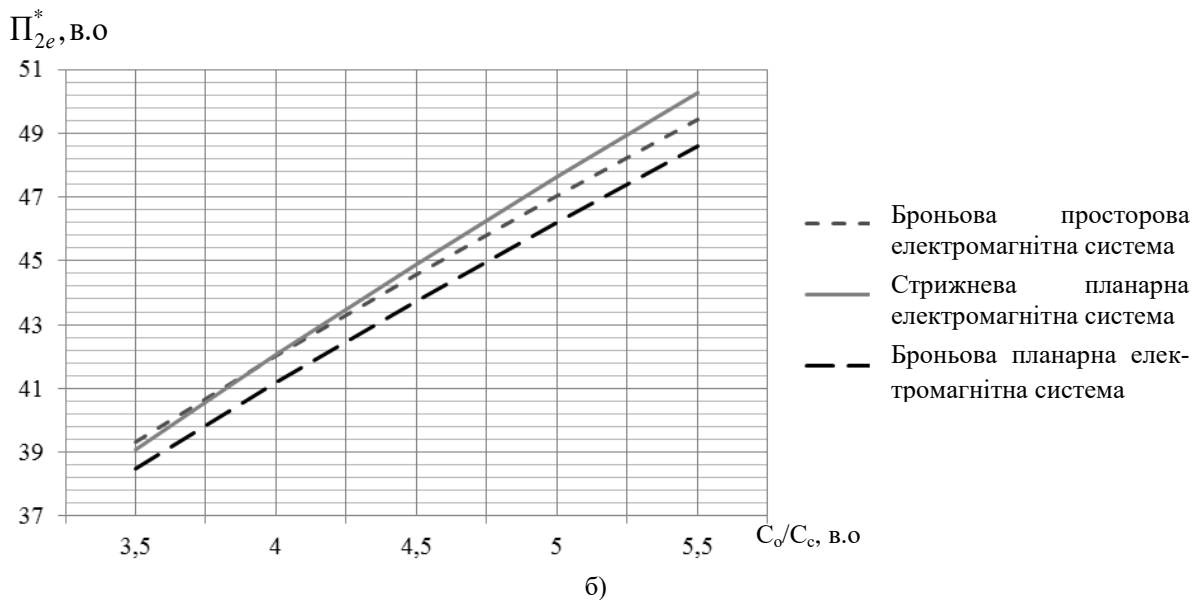
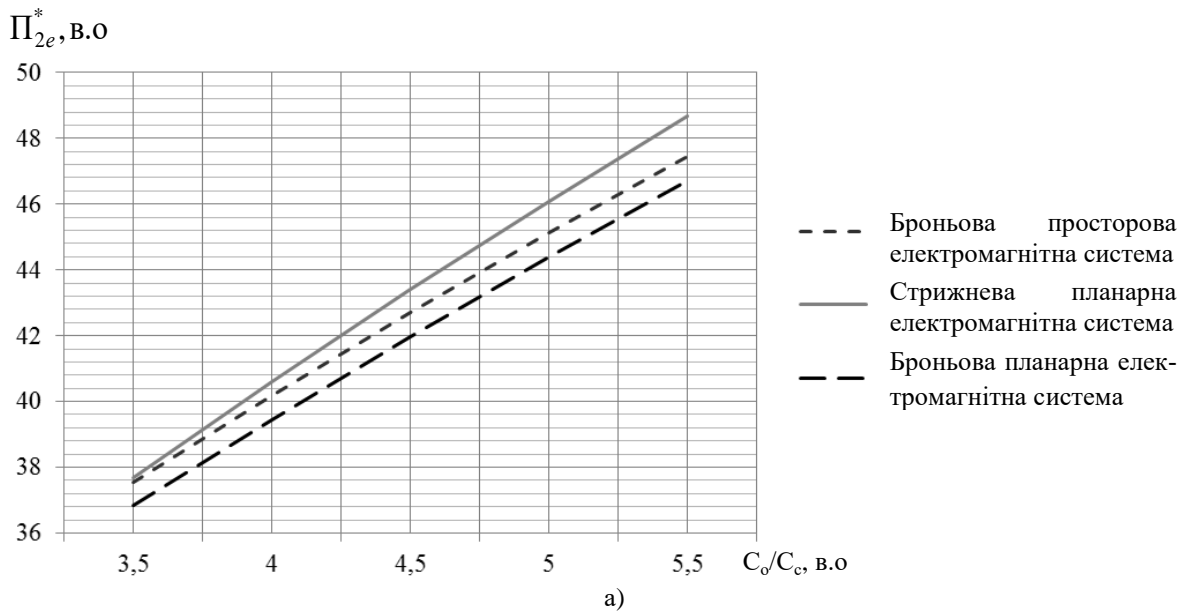


Рисунок – 4 Екстремуми показників вартості варіантів електромагнітних систем при різних значеннях класу напруги: а - $K_{30}=0,3$; б - $K_{30}=0,25$; в - $K_{30}=0,2$ та у діапазоні 3,5...5,5 співвідношень вартостей обмоткової міді й електротехнічної сталі

ВИСНОВКИ. 1. Визначено цільові функції і показники технічного рівня за критеріями мінімуму маси та вартості просторової броньової електромагнітної системи.

2. При порівнянні екстремумів мас активних матеріалів при різних значеннях класу напруги визначено, що визначені показники стрижневої ЕМС є кращими відносно броньової ЕМС і просторової броньової ЕМС. Аналогічні показники броньової ЕМС є кращими у порівнянні з просторовим аналогом.

3. Екстремуми показників вартості стрижневої ЕМС при значенні класу напруги $K_{30}=0,3$ та різних співвідношеннях вартості активних матеріалів покращуються у порівнянні з аналогічними показниками броньової та просторової броньової ЕМС.

4. При порівнянні показників вартості стрижневої та броньової ЕМС при значенні класу напруги $K_{30}=0,25$ та $C_o/C_c=3,5$ відбувається погіршення показника стрижневої ЕМС, а при значеннях $C_o/C_c=4,5\dots5,5$ - його покращення.

5. При порівнянні показників вартості стрижневої та броньової планарних ЕМС при значенні класу напруги $K_{30}=0,2$ та $C_o/C_c=3,5\dots5$ відбувається погіршення зазначених показників стрижневої ЕМС, а при значеннях $C_o/C_c=5\dots5,5$ відбувається їх покращення.

6. Показники вартості просторової броньової ЕМС є гіршими у порівнянні з аналогічними показниками стрижневої та броньової планарних ЕМС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Белопольский И. И., Каретникова Е. И., Пикалова Л. Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Москва: Альянс, 2013. 400 с.
2. Robert Fosbinder, Denise Orth. Essentials of Radiologic Science US. Wolters Kluwer Health, Lippincott Williams & Wilkins, 2012. 392 p.
3. Ставинский А. А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики. *Електротехніка і електромеханіка*. 2004. № 1. С. 57–61.
4. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий. URL: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (13.10.2020).
5. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. Москва: Альянс, 2013. 528 с.
6. Hurley W.Gt, Wolfe W.H. Transformers and inductors for power electronics : theory, design and application – John Wiley & Sonst, Ltd, 2013. 370p.
7. Ставинский А. А. «Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами)», *Електротехніка і електромеханіка*, 2011 № 6. С. 33–38.
8. Пентегов И. В., Рымар С. В., Лавренко А. В., Петриенко О. И. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами. *Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ». 2002. № 14. С. 86–97.
9. Kefalas T. D., Georgilaks P. S., Kladas A. G., Soufiaris A.T., Paparigas D. G. Multiple grade lamination wound Core: A novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model. *IEEE Trans Magn*. 2008: 44(6). Pp. 1082–1085.
10. Блинцов В. С., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А., Садовый А. С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 2. С. 16–21.
11. Садовой О. С. Варианты и преобразование структур однофазных трансформаторов и реакторов с витым магнитопроводом. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2017. Вип. 2(103) ч.1. С. 15–21.
12. Трансформатор: пат. 960976 СССР: М.Кл. НО1F 27/24. № 960976; заявл. 12.06.1980; опубл. 23.09.1982, Бюл. № 35.
13. Ставинский А. А., Ставинский Р. А., Авдеева Е. А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований. *Електричество*. 2014 № 9. С. 34–43.
14. Sadovuy A., Cherepovskaya A. Comparative analysis of mass and cost indicators of single-phase transformers and reactors with rectangular and hexagonal cross sections of armored rods twisted magnetic core. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2017. №. 3. С. 208–218.
15. Садовой А. С. Сравнительный анализ массово-стоимостных показателей однофазных трансформаторов и реакторов с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней стержневого витого магнитопровода. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2016. №. 4(92). С. 143–153.

DETERMINATION OF THE TECHNICAL LEVEL INDICATORS OF A SINGLE-PHASE TRANSFORMER WITH A SPATIAL ARMOR ELECTROMAGNETIC SYSTEM

O. Sadovoy

Mykolaiv National Agrarian University

vul. Georgiy Gongadze, 9, Nikolaev, 54020, Ukraine. E-mail: sadovuyos@mnau.edu.ua

Purpose. Determination and comparison of the technical level indicators for a single-phase transformer with spatial armored electromagnetic system, which consists of two twisted cores pairs with equal rectangular winding windows, but different size of rectangular sections and have in each pair the same dimensions with existing analogues of planar, rod and armored electromagnetic systems. **Methodology.** The method of objective functions with dimensionless optimization components and universal relative geometric and electromagnetic controlled variables it is advisable to use for an analytical assessment of the transformation of configurations' and structures' influence on the mass-cost indicators

of single-phase electromagnetic static devices. The method is based on the electromagnetic equivalence principle, the identity of power, electromagnetic load and winding voltages, and the installation and cooling conditions of compared electromagnetic static devices. **Results.** The target functions and indicators of the technical level are determined according to the criteria of the mass and cost minimum of the spatial armored electromagnetic system. Comparing the extrema of active materials masses at different values of the voltage class, showed that the indicators of the rod electromagnetic system are the best comparatively to the armored electromagnetic system and the spatial armored electromagnetic system. Similar indicators of the armor electromagnetic system are the best in comparison with the spatial analogue. The cost indices of the spatial armored electromagnetic system are worse than ones of the rod and armored planar electromagnetic systems. **Originality.** The extrema of the objective functions for a spatial armored electromagnetic system were obtained for the first time by the criteria of mass and cost minimum. A comparative analysis of the numerical values of the spatial armor electromagnetic system with the numerical values of analogs has been carried out at various values of the voltage class in the range of ratios of winding copper and electrical steel cost. **Practical value.** The obtained comparative analysis results make it possible to determine and rationally choose the best electromagnetic system configuration for various equipment electrical systems. Bibliographic link - 15, figures - 4.

Key words: single-phase transformer, twisted magnetic circuit, cost and energy indicators, controlled geometric variables.

REFERENCES

1. Belopol'skij, I. I., Karetnikova, E. I., Pikalova, L. G. (2013). *Raschet transformatorov i drossel'noj maloj moshchnosti*, [Calculation of transformers and low-power chokes]. Moscow . Alliance, 400 p.
2. Robert, Fosbinder, Denise, Orth. (2012). *Essentials of Radiologic Science US*. Wolters Kluwer Health, Lippincott Williams & Wilkins, 392 p.
3. Stavinskij, A. A. (2004). Problema i napravleniya dal'nejshej evolyucii ustrojstv elektromekhaniki, [The problem and directions of further evolution of electromechanical devices]. *Electrical engineering and electrical engineering*. № 1. pp. 57–61.
4. Prospects and state of development of distribution transformers of mass series. URL: http://www.transform.ru/articles/html/03_project/a000001.article (13.10.2020).
5. Tihomirov, P. M. (2013). *Raschet transformatorov: uchebnoe posobie dlya vuzov*, [Calculation of transformers: a textbook for universities]. Moscow: Alliance, 528 p.
6. Hurley, WGT, Wolfe, W. H. (2013). *Transformers and inductors for power electronics : theory, design and application* – John Wiley & Sonst, Ltd. 370 p.
7. Stavinskij, A. A. (2011). Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov elektromagnitnyh sistem (sistemy s shihtovannymi i vitymi magnitoprovodami) [Genesis of structures and prerequisites for the improvement of transformers and reactors by transforming the circuits of electromagnetic systems (systems with laminated and twisted magnetic circuits)], *Electrical engineering and electrical engineering*, № 6, pp. 33–38.
8. Pentegov, I. V., Rymar, S. V., Lavrenyuk, A. V., Petrienko, O. I. (2002). Novye konstrukcii trekhfaznyh transformatorov s lentochnymi magnitoprovodami [New designs of three-phase transformers with magnetic tape conductors]. *Visnik of NTU "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of Science Works. Thematic issue: Problems of improving electrical machines and equipment. Theory and practice*. Kharkiv: NTU "KhPI". № 14. pp. 86–97.
9. Kefalas, T. D., Georgilaks, P. S., Kladas, A. G., Soufiaris, A. T., Pappas, D. G. (2008). Multiple grade lamination wound Core: A novel technigue for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model. *IEEE Trans Magn*: 44(6) pp. 1082–1085.
10. Blincov, V. S., Stavinskij, R. A., Avdeeva, E. A., Sadovij, A. S. (2012). Transformatory dlya vstraivaniya v obolochki ogranichenogo diametra ob'ektov special'noj tekhniki i postanovka zadachi ih usovershenstvovaniya. [Transformers for embedding in shells of limited diameter of special equipment objects and setting the task of their improvement]. *Electrotechnics and electromechanics*. № 2. pp. 16–21.
11. Sadovij, O. S. (2017). Varianty i preobrazovanie struktur odnofaznyh transformatorov i reaktorov s vitym magnitoprovodom [Variants and transformation of structures of single-phase transformers and reactors with a twisted magnetic core]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. Kremenchuk: KRNU, Issue 2(103), part. 1, pp. 15–21.
12. Transformator: pat. 960976 SSSR: M.KI NO1F 27/24. № 960976; zayavl. 12.06.1980; opubl. 23.09.1982, Byul. № 35.
13. Stavinsky, A. A., Stavinsky, R. A., Avdeeva, E. A. (2014). Optimizacionnyj sravnitel'nyj analiz struktur staticheskikh elektromagnitnyh sistem. part. 1. Varianty i metod ocenki preobrazovaniy. [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part. 1. Options and method of assessing transformations.]. *Electricity*. № 9. pp. 34–43.
14. Sadovij, A., Cherepovskaya, A. (2017). Comparative analysis of mass and cost indicators of single-phase transformers and reactors with rectangular and hexagonal cross sections of armored rods twisted magnetic core. *Visnik of Agrarian Science Prychornomor'ya*. № 3. pp. 208–218.
15. Sadovij, A. S. (2016). Sravnitel'nyj analiz massostoimostnyh pokazatelej odnofaznyh transformatorov i reaktorov s pryamougol'nymi i shestigrannymi secheniyami sterzhnej sterzhnovego vitogo magnitoprovoda [Comparative analysis of mass-cost indicators of single-phase transformers and reactors with rectangular and hexagonal sections of the rods of the twisted core magnetic circuit]. *Visnik of Agrarian Science Prychornomor'ya*. №. 4(92). Pp. 143–153.

Стаття надійшла 27.11.2020.