

О. М. ЦИГАНОВ

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ І РЕАКТОРІВ ВІД ЗАПОВНЕННЯ СТАЛЛЮ КРУГОВИХ І ВОСЬМИГРАННИХ КОНТУРІВ СТРИЖНІВ ПЛАНАРНИХ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ

Розглянуті конструктивно-технологічні особливості варіантів планарних електромагнітних систем трифазних трансформаторів і реакторів з круговими і восьмигранними утворюючими контурами обмоткових котушок та стрижнів шихтованих магнітопроводів. Восьмигранна конфігурація забезпечує більш суттєве або повне (в стиковому та комбінованому варіантах) заповнення електротехнічною сталлю утворюючих контурів стрижнів, а також підвищення електродинамічної стійкості обмоток. На основі метода інваріантних цільових функцій з безрозмірними оптимізаційними складовими і універсальними відносними керованими змінними розроблені математичні моделі масовартисних і енергетичного показників вказаних варіантів електромагнітних систем. Такі моделі надають можливість узагальненого структурно-параметричного синтезу та визначення характеристик індукційних статичних пристроїв. Отримані відносні числові значення показників технічного рівняння на основі яких показані можливості удосконалення трансформаторів і реакторів при заміні традиційних кругових утворюючих контурів на восьмигранні та при плоских внутрішніх поверхнях ярем.

**Ключові слова:** трифазний трансформатор, реактор, круговий, восьмигранний, контур, маса, вартість, втрати.

Рассмотрены конструктивно-технологические особенности вариантов планарных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов и реакторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами обмоточных катушек и стержней шихтованных магнитопроводов. Восьмигранная конфигурация обеспечивает более существенное или полное (в стыковом и комбинированном вариантах) заполнение электро-технической сталью образующих контуров стержней, а также повышение электродинамической стойкости обмоток. На основе метода инвариантных целевых функций с безразмерными оптимизационными составляющими и универсальными относительными управляемыми переменными разработаны математические модели масстоимосных и энергетического показателей указанных вариантов электромагнитных систем. Такие модели предоставляют возможность обобщенного структурно-параметрического синтеза и определения характеристик индукционных статических устройств. Полученные относительные числовые значения показателей технического уровня на основе которых показаны возможности совершенствования трансформаторов и реакторов при замене традиционных круговых образующих контуров на восьмигранные и при плоских внутренних поверхностях ярем.

**Ключевые слова:** трехфазный трансформатор, реактор, круговой, восьмигранный, контур, масса, стоимость, потери.

**Purpose.** The main elements of power transmission systems are transformers and reactors and the tasks of their improvement are especially relevant. The most common basis for these induction static devices are planar electromagnetic systems with rod magnetic circuits. Transformers and reactors with a capacity of over 16 kV A are made with circular generatrix circuits of the rods and winding coils. To ensure the filling of the sections of such rods with electrical steel with a coefficient of 0.851-0.931, 3-16 packets of various widths are placed in the halves of their cross sections, which significantly complicates the production of magnetic cores. Also, the circular configuration of the turns reduces the electrodynamic resistance of the windings. The aim of the work is to substantiate the advantages of replacing the traditional circular generatrix contours of active elements with octagonal ones. **Methodology.** A decrease in the main indicators (mass, cost, and loss) and an increase in the electrodynamic stability of transformers and reactors are achieved by using non-traditional designs with octagonal generatrix circuits of rods and winding coils, as well as a yoke with flat inner surfaces in lathing, butt and combined planar magnetic cores. An analysis of the effect of configuration changes and filling of the contours of the rods with steel on mass, cost and loss was performed by the method of target functions of an invariant design synthesis of electrical machines with optimized dimensionless parameters and relative controlled variables. **Results.** The extrema of the indicators of mass, cost and loss are calculated. It has been established that the use of octagonal generatrix circuits of cross-sections of rods and winding coils in an electromagnetic system leads to an improvement in mass-value indicators and a decrease in losses of three-phase transformers and reactors relative to analogues with circular generatrix circuits. The change in mass-value indicators depends on the fill factor of the circular contour of the rod with rectangular packages of electrical steel. **Originality.** Comparison of the values of dimensionless indicators gives an objective assessment of the advantages or disadvantages of the considered option of the electromagnetic system relative to the base analogue, regardless of the power, performance and cooling method. **Practical value.** Replacing in traditional systems of circular generatrix circuits with a jug with octagonal contours leads to an improvement in the extreme values of mass, cost, and loss indicators.

**Keywords:** three-phase transformer, reactor, circular, octagonal, circuit, mass, cost, loss.

**Постановка проблеми.** Важливою складовою системою генерування, передачі і споживання електроенергії є трансформаторно-реакторне обладнання. Згідно [1] втрати в розподільчих трансформаторах в Європейському Союзі склали 2 % від усієї виробленої енергії, або 1/3 від загальних втрат енергосистем. Основна складова цих втрат приходить на розподільчі трансформатори I–III габаритів. Тому знижуються втрати силових трифазних трансформаторів (ТТ) потужністю до 6300 кВ·А, особливо ТТ потужністю 25–30 кВ·А напругою 6–10 кВ. Задача вирішується традиційними способами [2] використання сучасних досягнень матеріалознавства, зокрема аморфної електротехнічної сталі (ЕТС), а також зниження електромагнітних навантажень (ЕМН). При цьому погіршуються масовартисні показники ТТ, а можливості подальшого удосконалення електротехнічних матеріалів обмежені [2, 3]. Тому існує необхідність удосконалення

ТТ, трифазних реакторів (ТР) та інших електромеханічних пристроїв нетрадиційними способами, наприклад структурно-геометричним перетворенням елементів електромагнітних систем (ЕМС) [2, 4, 5].

**Аналіз актуальних досліджень.** Основою ЕМС (рис. 1, а, рис. 2) більшості перебуваючих у виробництві ТТ і ТР є планарні стрижневі магнітопроводи. При потужності ТТ від 16 кВ·А застосовуються магнітопроводи з «східчастим» заповненням кругових утворюючих контурів (УК) пакетами пластин ЕТС різної ширини. В діапазоні потужності від 16 до 10000 кВ·А коефіцієнти заповнення кругових УК перерізів стрижнів ЕТС (рис. 1, б) складають  $K_{\text{кк}} = 0,851\text{--}0,931$  при числі пакетів різної ширини в половині кола 3–16 [6, 7]. Недостатнє заповнення УК з  $K_{\text{кк}} < 0,9$  підвищує матеріалоємність та втрати ТТ і ТР, а виконання ЕМС з  $K_{\text{кк}} \geq 0,9$  суттєво підвищує трудомісткість виготовлення магнітопроводів заготовкою та

© О. М. Циганов, 2020

складанням значного числа різноманітних пакетів ЕТС [6, 7]. Також значним недоліком ЕМС з круговими УК обмоткових котушок є внутрішні залишкові механічні напруження кільцевого вигину по всій довжині витків, що погіршує електродинамічну стійкість ТТ і ТР [8].

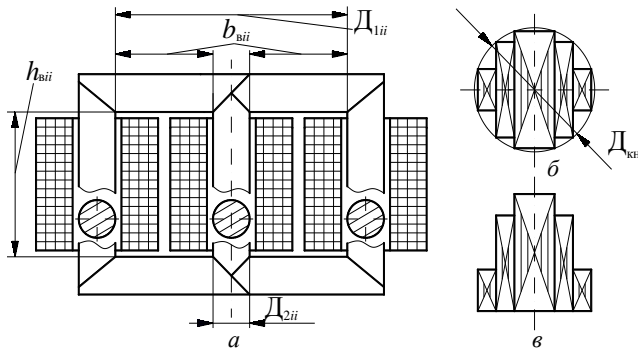


Рис. 1 – Схеми поздовжнього перерізу *a* – електромагнітної системи трансформатора і конфігурацій поперечних перерізів стрижня та яра з круговими утворюючими контурами – *b* і яра з плоскою внутрішньою поверхнею – *v*

Удосконалення ТТ І–ІІІ габаритів і ТР структурно-геометричними перетвореннями ЕМС можливо заміною кругових УК стрижнів і обмоткових котушок на восьмигранні УК (рис. 3, *a–в*) [4, 9, 10]. На відміну від традиційних ЕМС з круговими УК усього при трьох (рис. 3, *a*) і чотирьох сходинках (пакетах) в половині восьмигранного УК, забезпечуються коефіцієнти заповнення відповідно  $K_{кв3}=0,9$  і  $K_{кв4}=0,931$  [4]. Іншою перевагою восьмигранного УК елементів ЕМС є відсутність механічних напружень вигину на прямих ділянках витків обмоток. Такі напруження концентруються на вершинах граней, де підсилюється ізоляція та встановлюються опорні рейки [9]. Таким чином забезпечується підвищення електродинамічної стійкості ТТ і ТР [4, 5].

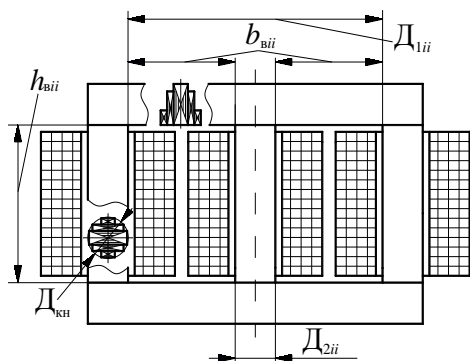


Рис. 2 – Схема поздовжнього перерізу електромагнітної системи реактора з конфігураціями поперечних перерізів стрижня з круговим утворюючим контуром і яра з плоскою внутрішньою поверхнею

В стикових і комбінованих (з боковими стиковими і середньою шихтованою «вперепліт» частинами) магнітопроводах (рис. 3, *б, в*) коефіцієнт заповнення восьмигранного УК  $K_{кв} \approx 1$ . Яра та бічні частини елементів магнітопроводу зі стрижнями відповідно (рис. 3, *б, в*) утворюються розрізами пакетів ідентичних прямокутних пластин ЕТС, що складаються із

зсувом (рис. 3, *з*). Після розрізу пластини подібних пакетів зсуваються для отримання необхідного кута граней (рис. 3, *д*) [10]. При застосуванні автоматизованого обладнання пакети пластин різної довжини формуються розділом стрічки (рулону) ЕТС з малою подачею.

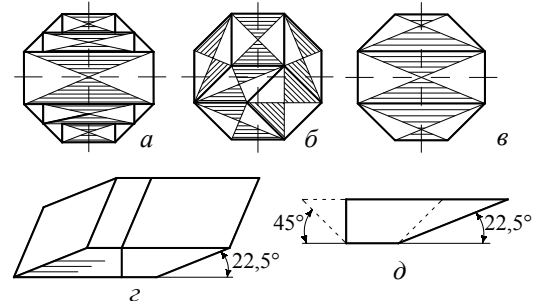


Рис. 3 – Варіанти поперечних перерізів стрижнів з частковим – *a* і повним – *б, в* заповненням восьмигранного утворюючого контура і заготовки елементів магнітопроводу – *з, д*

В зв'язку з явними конструктивно-технологічними перевагами, дослідження впливу на показники технічного рівня (ПТР) [5] ТТ і ТР заміни кругових УК на восьмигранні уявляє теоретичне і практичне значення та є актуальним.

**Мета статті.** Визначення та порівняння основних ПТР ЕМС ТТ і ТР з круговими і восьмигранними УК при кругових і плоских внутрішніх поверхнях ярем та використанні як мідних, так і алюмінієвих обмоток.

**Метод і результати досліджень.** Для досягнення мети роботи використовуються цільові функції  $F_{iiicu}$  і  $F_{iiial}$  окремих критеріїв оптимізації ЕМС ІСП. Такі функції містять загальні складові з показником вихідних даних і електромагнітних навантажень ІСП  $\Pi_{емнсу(al)}$  з мідними (алюмінієвими) обмотками і оптимізаційні безрозмірні складові (показники) ЦФ  $\Pi_{iiicu}^*$  і  $\Pi_{iiial}^*$  з круговими (восьмигранними) УК

$$F_{iiicu(al)} = (\Pi_{емнсу(al)})^{3/4} K_i \Pi_{iiicu}^* \quad (1)$$

де  $K_i$  – складова питомих показників використаної ЕТС (щільності –  $\gamma_c$ , питомої вартості –  $C_c$ , питомих втрат –  $P_c$ ), що відповідає  $i$  – показнику ( $i=1-3$ ) [5],

$$K_1 = \gamma_c; K_2 = C_c \gamma_c; K_3 = \gamma_c P_c.$$

Головними при порівняльному аналізі *ii* – варіантів ЕМС ІСП є показники маси  $\Pi_{iiicu}^*$  і  $\Pi_{iiial}^*$ , вартості  $\Pi_{2iiicu}^*$  і  $\Pi_{2iiial}^*$  та втрат активної потужності  $\Pi_{3iiicu}^*$  і  $\Pi_{3iiial}^*$ .

Чисельними розрахунками визначаються екстремуми (мінімуми)  $\Pi_{iiicu}^*$  і  $\Pi_{iiial}^*$  таких показників за окремими критеріями оптимізації. Зазначені екстремуми є ПТР певного *ii* – варіанту ЕМС [5]. У сукупності з іншими співмножниками (1), величини  $\Pi_{iiicu(al)}^*$  визначають фактичні розрахункові кількісні значення техніко-економічних характеристик (маси, вартості і втрат, наприклад ТТ). Показники маси ( $i=1$ ) і вартості ( $i=2$ ) залежать від коефіцієнта заповнення обмоткового вікна  $K_v$  провідниковим матеріалом обмоток (класу напруги) і від геометричних відносних оптимізаційних координат. При аналізі ЕМС (рис. 1, *a*) з конфігураціями стрижнів (рис. 1, *б*, рис. 3, *a–в*) використовуються дві координати  $a_m$  і  $\lambda_b$ . Їх значення визнача-

ються відношеннями діаметрів  $D_{1ii}$ ,  $D_{2ii}$  розрахункових кіл і висоти  $h_{Bii}$  та ширини  $b_{Bii}$  обмоткового вікна магнітопроводу (рис. 1, а):

$$\Pi_{1iii cu(al)}^* = f_{1iii cu(al)}(K_B, a_M, \lambda_B, \gamma_{cu(al)} / \gamma_c); \quad (2)$$

$$\Pi_{2iii cu(al)}^* = f_{2iii cu(al)} \left[ K_B, a_M, \lambda_B, \frac{C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)}}{C_c \gamma_c} \right]; \quad (3)$$

$$a_M = D_{1ii} / D_{2ii}; \quad \lambda_B = h_{Bii} / b_{Bii},$$

де  $\gamma_{cu(al)}$  і  $C_{cu(al)}$  – щільність і питома вартість мідного (алюмінієвого) обмоткового матеріалу.

Показник  $\Pi_{3iii cu(al)}^*$  функції втрат виду (1) додатково залежить від відносної електромагнітної координати втрат  $K_{pcu(al)}$ :

$$\Pi_{3iii cu(al)}^* = f_{3iii cu(al)}(K_B, a_M, \lambda_B, K_{pcu(al)}); \quad (4)$$

$$K_{pcu(al)} = K_{дж} \gamma_{cu(al)} K_{посу cu(al)} J_{оосу cu(al)}^2 / (K_{дн} \gamma_c P_c), \quad (5)$$

де  $K_{дн(к)}$  – коефіцієнт додаткових втрат неробочого руху (короткого замикання) ТТ або додаткових втрат магнітопроводу (обмотки) ТР;  $K_{pcu(al)}$  – коефіцієнт питомих втрат мідної (алюмінієвої) обмотки;  $J_{оосу cu(al)}$  – середня щільність струму обмоток ТТ, або щільність струму обмотки ТР.

Для адекватного зіставлення варіантів ЕМС (рис. 1, а, рис. 2) з конфігурацією стрижнів і ярем (рис. 1, б, в, рис. 3, а–з) приймаються ідентичними електромагнітні потужності і відповідно показники  $\Pi_{емн cu(al)}$ , електротехнічні матеріали і класи напруги, а також середні значення амплітуд індукції в стрижнях і ярмах. Розрахунки вартості виконуються з урахуванням співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників, що у середньому становить 0,85 та при відношенні цін вказаних провідників  $C_{cu}$  та  $C_{al}$  до ціни ЕТС  $C_c$  в реальних діапазонах ( $C_{al}/C_c = 3-4,7$ ;  $C_{cu}/C_c = 3,5-5,5$ ). Також при визначенні показників втрат електромагнітна координата повинна змінюватися в реальному діапазоні, що враховує відомі мінімальні і максимальні розрахункові значення ЕМН. Такий діапазон обґрунтований в [13].

Маси і вартості ЕТС магнітопроводу і мідних (алюмінієвих) обмоток  $ii$  – варіанту ЕМС – відповідно  $M_{ciii cu(al)}$ ,  $C_{ciii cu(al)}$ ,  $M_{oiii cu(al)}$ ,  $C_{oiii cu(al)}$ , визначаються рівняннями [5]:

$$M_{ciii cu(al)} = \gamma_c (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{1ciii cu(al)}^*; \quad (6)$$

$$C_{ciii cu(al)} = C_c \gamma_c (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{2ciii cu(al)}^*; \quad (7)$$

$$M_{oiii cu(al)} = \gamma_o (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{1oiii cu(al)}^*; \quad (8)$$

$$C_{oiii cu(al)} = C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{2oiii cu(al)}^*, \quad (9)$$

де  $\Pi_{1(2)ciii cu(al)}^*$  і  $\Pi_{1(2)oiii cu(al)}^*$  – відповідно показники маси (вартості) магнітопроводу і системи обмоток  $ii$  – варіанту ЕМС.

Рівняння маси і вартості варіантів ЕМС виду (1) визначаються на основі (6)–(9):

$$F_{1iii cu(al)} = M_{ciii cu(al)} + M_{oiii cu(al)} = \gamma_c (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{1iii cu(al)}^*; \quad (10)$$

$$F_{2iii cu(al)} = C_{ciii cu(al)} + C_{oiii cu(al)} = C_c (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{2iii cu(al)}^*. \quad (11)$$

Загальні втрати активної потужності  $ii$  – варіанту ЕМС визначаються на основі (4), (6) і (8)

$$F_{3iii cu(al)} = P_{xiii cu(al)} + P_{kiii cu(al)} = \gamma_c P_c (\Pi_{емн})^{3/4} \Pi_{3iii cu(al)}^*, \quad (12)$$

де  $P_{x(к)iii cu(al)}$  – втрати неробочого руху (короткого замикання) ТТ або втрати магнітопроводу (обмотки) ТР.

Оптимізаційні складові ЦФ (6)–(11) для ЕМС з УК ярем, що відповідають круговим і восьмигранним УК стрижнів визначаються рівняннями [11, 12].

Для ЕМС з круговими і восьмигранними УК стрижнів та плоскими внутрішніми поверхнями ярем індекси  $ii$  замінюються відповідно на КП і КВ і оптимізаційні складові ЦФ (6)–(11) визначаються наступними рівняннями:

$$\Pi_{1КПcu(al)}^* = \left( \sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_K K_{3B} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \{ K_{3c} K_K \times \\ \times [((a_M - 1)/2) \pi + ((a_M - 1)/2) \lambda_B 2,356 + 3,713] + \\ + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) ((a_M - 1)/2)^2 \pi [1 + (a_M - 1)/4] \}; \quad (13)$$

$$\Pi_{2КПcu(al)}^* = \left( \sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_K K_{3B} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \{ K_{3c} K_K \times \\ \times [((a_M - 1)/2) \pi + ((a_M - 1)/2) \lambda_B 2,356 + 3,713] + \\ + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) \left( \frac{(a_M - 1)}{2} \right)^2 \pi \left[ 1 + \frac{(a_M - 1)}{4} \right] (C_{cu(al)} / C_c) \}; \quad (14)$$

$$\Pi_{3КПcu(al)}^* = \left( \sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_K K_{3B} \lambda_B (a_M - 1)^2}} \right)^3 \{ K_{3c} K_K \times \\ \times [((a_M - 1)/2) \pi + ((a_M - 1)/2) \lambda_B 2,356 + 3,713] + \\ + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) ((a_M - 1)/2)^2 \pi [1 + (a_M - 1)/4] K_{pcu(al)} \}; \quad (15)$$

$$\Pi_{1ВПcu(al)}^* = \left( \sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{3c} K_K K_{3B} \lambda_B (a_M - 0,9239)^2}} \right)^3 \{ K_{3c} K_K \times \\ \times [2,828((a_M - 0,9239)/2) + 2,121((a_M - 0,9239)/2) \lambda_B + \\ + 3,7298946] (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) 1,5 K_{3B} \lambda_B ((a_M - 0,9239)/2)^2 \times \\ \times [3,0616 + (\pi/8)(a_M - 0,9239)]; \quad (16)$$

$$\Pi_{2ВПcu(al)}^* = \left( \sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{3c} K_K K_{3B} \lambda_B (a_M - 0,9239)^2}} \right)^3 \{ K_{3c} K_K \times \\ \times [2,828((a_M - 0,9239)/2) + 2,121((a_M - 0,9239)/2) \lambda_B + \\ + 3,7298946] (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) 1,5 K_{3B} \lambda_B ((a_M - 0,9239)/2)^2 \times \\ \times [3,0616 + (\pi/8)(a_M - 0,9239)(C_{cu(al)} / C_c)]; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{3ВПcu(al)}^* &= \left( \sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{zc} K_k K_{zb} \lambda_b (a_m - 0,9239)^2}} \right)^3 \{ K_{zc} K_k \times \\ &\times [2,828((a_m - 0,9239)/2) + 2,121((a_m - 0,9239)/2) \lambda_b \\ &+ 3,7298946] (\gamma_{cu(al)} / \gamma_c) 1,5 K_{zb} \lambda_b ((a_m - 0,9239)/2)^2 \times \\ &\times [3,0616 + (\pi/8)(a_m - 0,9239) K_{pcu(al)}] \}; \quad (18) \end{aligned}$$

Для традиційної ЕМС з круговими УК стрижнів і ярем (рис. 1, б) індекси *ii* замінюються позначенням  $KK_{cu(al)}$ . Для ЕМС з круговими УК стрижнів і плоскими внутрішніми поверхнями ярем виду (рис. 1, в) і ЕМС з круговими УК стрижнів і стиковим магнітопроводом (рис. 2) індекси *ii* замінюються позначеннями  $KP_{cu(al)}$ . Значення ПТР  $\Pi_{iKKcu(al)}^*$  і  $\Pi_{iKPcu(al)}^*$  визначаються для значень

$K_{kk} = 0,851, K_{kk} = 0,861, K_{kk} = 0,931$ , що відповідає трьом, чотирьом і шістнадцяти пакетам ЕТС в половині кола.

Для ЕМС з восьмигранними УК стрижнів і ярем (рис. 3, а) з оптимізаційним складовим ЦФ [11, 12] індекси *ii* приймають позначення  $ВВ_{cu(al)}$ . Значення ПТР  $\Pi_{iВВcu(al)}^*$  і  $\Pi_{iВPcu(al)}^*$  відповідно визначаються при  $K_{kb} = 0,851, K_{kb} = 0,861, K_{kb} = 0,931$ , і  $K_{kb} = 1$ . Обрання для восьмигранного контуру при трьох сходінках (рис. 3, а) замість  $K_{kb3} = 0,9$  значень 0,851 і 0,861 (утворюються на відміну від рис. 3, а пакетами різної товщини) обумовлено міркуванням адекватності порівняння.

Кількість і розміри пакетів ЕТС ярем (рис. 1, в) відповідають пакетам ЕТС стрижнів (рис. 1, б і рис. 3,а).

Результати оптимізаційних розрахунків показників  $\Pi_{iiccu(al)}^*$  рівнянь (13)–(18) при  $K_b = 0,3, K_b = 0,25$  і  $K_b = 0,15$  (класи напруги 1 кВ, 10 кВ і 110 кВ) наведені в табл. 1–12 та на рис. 4–6.

Таблиця 1 – Екстремуми показників маси варіантів систем з мідними обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$K_b,$ о.е.	$\Pi_{iKKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPcu}^*$ , о.е.		
	$K_{kk}$												
	0,851				0,861				0,931				
	cu		%		cu		%		cu		%		cu
0,3	29,06	<b>3,7</b>	28,03	28,99	<b>3,6</b>	27,97	28,51	<b>3,6</b>	27,52				
0,25	30,64	<b>3,5</b>	29,59	30,57	<b>3,5</b>	29,53	30,09	<b>3,4</b>	29,09				
0,15	35,89	<b>3,1</b>	34,82	35,81	<b>3,1</b>	34,75	35,34	<b>3,0</b>	34,31				

Таблиця 2 – Екстремуми показників маси варіантів систем с алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$K_b,$ о.е.	$\Pi_{iKKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPale}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPale}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{iKPale}^*$ , о.е.		
	$K_{kk}$												
	0,851				0,861				0,931				
	al		%		al		%		al		%		al
0,3	17,34	<b>2,7</b>	16,89	17,31	<b>2,7</b>	16,86	17,1	<b>2,5</b>	16,68				
0,25	18,50	<b>2,6</b>	18,04	18,47	<b>2,5</b>	18,02	18,27	<b>2,5</b>	17,83				
0,15	22,37	<b>2,1</b>	21,91	22,34	<b>2,1</b>	21,88	22,14	<b>2,1</b>	21,69				

Таблиця 3 – Екстремуми показників вартості варіантів систем з мідними обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$K_b,$ о.е.	$\Pi_{2KKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KKcu}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPcu}^*$ , о.е.				
	$K_{kk}$														
	0,851				0,861				0,931						
	$C_{cu}/C_c$		%		$C_{cu}/C_c$		%		$C_{cu}/C_c$		%		$C_{cu}/C_c$		
	3	4,7			3	4,7			3	4,7			3	4,7	
0,3	50,3	64,2	<b>4,8</b>	48,1	61,2	50,1	64,0	<b>4,9</b>	47,9	60,9	49,0	62,5	<b>4,7</b>	46,9	59,6
0,25	52,4	66,6	<b>4,6</b>	50,1	63,5	52,2	66,3	<b>4,7</b>	49,9	63,3	51,1	64,8	<b>4,6</b>	48,9	61,9
0,15	59,3	74,4	<b>4,3</b>	57,0	71,2	59,2	74,2	<b>4,4</b>	56,8	71,0	58,1	72,6	<b>4,2</b>	55,8	69,6

Таблиця 4 – Екстремуми показників вартості варіантів систем з алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

$K_b,$ о.е.	$\Pi_{2KKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPale}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPale}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KKale}^*$ , о.е.		$\Pi_{2KPale}^*$ , о.е.				
	$K_{kk}$														
	0,851				0,861				0,931						
	$C_{al}/C_c$		%		$C_{al}/C_c$		%		$C_{al}/C_c$		%		$C_{al}/C_c$		
	3	4,7			3	4,7			3	4,7			3	4,7	
0,3	27,8	34,3	<b>3,8</b>	26,8	33,0	27,7	34,2	<b>3,9</b>	26,7	32,9	27,2	33,6	<b>3,7</b>	26,3	32,3
0,25	29,3	36,1	<b>3,7</b>	28,3	34,7	29,2	35,9	<b>3,7</b>	28,2	34,6	28,8	35,3	<b>3,5</b>	27,8	34,1
0,15	34,4	41,8	<b>3,4</b>	33,4	40,4	34,3	41,7	<b>3,3</b>	33,3	40,3	33,9	41,1	<b>3,2</b>	32,9	39,8

Таблиця 5 – Екстремуми показників втрат варіантів систем з мідними обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	П* <sub>ЗКК<sub>сue</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>сue</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКК<sub>сue</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>сue</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКК<sub>сue</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>сue</sub></sub> , о.е.			
	К <sub>кк</sub>																							
	0,851								0,861								0,931							
	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>			
3	8	24		3		8	24	3	8		24	3	8	24		3	8	24	3		8	24		
0,3	50,3	87,2	171,5	<b>5,5</b>	48,1	82,8	162,0	50,1	86,8	170,8	<b>5,5</b>	47,9	82,5	161,3	49,1	84,6	165,7	<b>5,5</b>	46,9	80,4	156,5			
0,25	52,4	89,8	175,1	<b>5,3</b>	50,1	85,5	165,5	52,2	89,5	174,3	<b>5,4</b>	49,9	85,1	164,8	51,1	87,3	169,2	<b>5,4</b>	48,9	83,0	160,0			
0,15	59,3	98,8	186,9	<b>1,5</b>	57,0	94,3	177,2	59,2	86,8	186,2	<b>1,5</b>	56,9	93,9	176,4	58,1	84,6	181,1	<b>1,4</b>	55,9	91,9	171,7			

Таблиця 6 – Екстремуми показників втрат варіантів систем з алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються круговими контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	П* <sub>ЗКК<sub>ale</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>ale</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКК<sub>ale</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>ale</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКК<sub>ale</sub></sub> , о.е.				П* <sub>ЗКП<sub>ale</sub></sub> , о.е.			
	К <sub>кк</sub>																							
	0,851								0,861								0,931							
	C <sub>al</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>al</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>al</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>al</sub> /C <sub>c</sub>				%	C <sub>al</sub> /C <sub>c</sub>			
3	8	24		3		8	24	3	8		24	3	8	24		3	8	24	3		8	24		
0,3	27,8	44,8	82,3	<b>4,7</b>	26,8	42,9	78,2	27,7	44,7	81,9	<b>4,3</b>	26,8	42,9	78,2	27,3	43,8	79,9	<b>4,8</b>	26,3	41,9	75,9			
0,25	29,3	46,8	84,9	<b>4,6</b>	28,3	44,9	80,8	29,2	46,7	84,6	<b>4,3</b>	28,3	44,9	80,8	28,8	45,8	82,5	<b>4,5</b>	27,8	43,9	78,5			
0,15	34,4	53,4	93,6	<b>4,1</b>	33,4	51,5	89,4	34,3	53,3	93,3	<b>3,8</b>	33,4	51,5	89,4	33,9	52,4	91,2	<b>4,2</b>	32,9	50,5	87,1			

Таблиця 7 – Екстремуми показників маси варіантів систем з мідними обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	П* <sub>1ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.	
	К <sub>кв</sub>															
	0,851				0,861				0,931				1			
	cu		%	cu		%	cu		%	Cu		%	cu		%	cu
3	4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7
0,3	26,3	<b>1,5</b>	25,9	26,2	<b>1,2</b>	25,9	25,7	<b>1,2</b>	25,4	25,3	<b>1,2</b>	25,0				
0,25	27,6	<b>1,1</b>	27,3	27,5	<b>1,1</b>	27,2	26,9	<b>1,0</b>	26,7	26,6	<b>1,1</b>	26,3				
0,15	31,9	<b>1,0</b>	31,6	31,8	<b>1,0</b>	31,6	31,3	<b>0,6</b>	31,1	30,9	<b>0,6</b>	30,7				

Таблиця 8 – Екстремуми показників маси варіантів систем з алюмінієвими обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	П* <sub>1ВВ<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВВ<sub>ale</sub></sub> , о.е.		П* <sub>1ВП<sub>ale</sub></sub> , о.е.	
	К <sub>кв</sub>															
	0,851				0,861				0,931				1			
	al		%	al		%	al		%	Al		%	al		%	al
3	4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7
0,3	15,3	<b>0,7</b>	15,2	15,2	<b>0,7</b>	15,1	15,0	<b>0,7</b>	14,9	14,9	<b>0,7</b>	14,8				
0,25	16,2	<b>0,6</b>	16,1	16,2	<b>0,6</b>	16,1	16,0	<b>0,6</b>	15,9	15,8	<b>0,6</b>	15,7				
0,15	19,5	<b>0,5</b>	19,3	19,4	<b>0,5</b>	19,3	19,2	<b>0,5</b>	19,1	19,1	<b>0,5</b>	18,9				

Таблиця 9 – Екстремуми показників вартості варіантів систем з мідними обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	П* <sub>2ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВВ<sub>сue</sub></sub> , о.е.		П* <sub>2ВП<sub>сue</sub></sub> , о.е.					
	К <sub>кв</sub>																			
	0,851				0,861				0,931				1							
	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>		%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>		%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>		%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>		%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>		%	C <sub>cu</sub> /C <sub>c</sub>				
3	4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7				
0,3	46,6	60,1	<b>1,4</b>	46,0	59,4	46,4	59,9	<b>1,4</b>	45,8	59,1	45,3	58,4	<b>1,3</b>	44,8	57,6	44,4	57,1	<b>1,4</b>	43,8	56,3
0,25	48,3	62,1	<b>1,3</b>	47,7	61,3	48,1	61,8	<b>1,2</b>	47,6	61,0	47,0	60,3	<b>1,1</b>	46,5	59,6	46,1	58,9	<b>1,2</b>	45,6	58,2
0,15	54,0	68,5	<b>1,1</b>	53,5	67,7	53,9	68,3	<b>1,1</b>	53,3	67,5	52,8	66,7	<b>1,1</b>	52,2	65,9	51,8	65,4	<b>1,0</b>	51,3	64,7

Таблиця 10 – Екстремуми показників вартості варіантів систем з алюмінієвими обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	Π* <sub>2ВВale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВПale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВВale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВПale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВВale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВПale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВВale</sub> , о.е.		Π* <sub>2ВПale</sub> , о.е.					
	K <sub>кв</sub>																			
	0,851				0,861				0,931				1							
	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>		%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>		%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>		%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>		%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>		%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>				
3	4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7	3		4,7				
0,3	25,0	31,2	<b>1,2</b>	24,8	30,9	24,9	31,1	<b>1,2</b>	24,7	30,8	24,5	30,5	<b>1,1</b>	24,3	30,2	24,1	29,9	<b>1,1</b>	23,9	29,7
0,25	26,3	32,7	<b>1,0</b>	26,0	32,3	26,2	32,6	<b>1,0</b>	25,9	32,2	25,8	31,9	<b>1,0</b>	25,5	31,6	25,4	31,4	<b>1,0</b>	25,2	31,1
0,15	30,5	37,4	<b>0,7</b>	30,3	37,1	30,5	37,3	<b>0,9</b>	30,2	37,0	30,0	36,7	<b>0,7</b>	29,8	36,4	29,6	36,2	<b>0,9</b>	29,4	35,9

Таблиця 11 – Екстремуми показників втрат варіантів систем з мідними обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	Π* <sub>3ВВсue</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПсue</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВВсue</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПсue</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВВсue</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПсue</sub> , о.е.												
	K <sub>кв</sub>																											
	0,851						0,861						0,931						1									
	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>cu</sub> /C <sub>с</sub>			%				
3	8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24		
0,3	46,6	82,6	166,1	<b>1,6</b>	46,0	81,4	163,4	46,4	82,3	165,3	<b>1,5</b>	45,8	81,1	162,6	45,3	80,0	160,2	<b>1,5</b>	44,8	78,9	157,6	44,4	78,0	155,6	<b>1,5</b>	43,8	76,9	153,1
0,25	48,3	84,8	169,0	<b>1,5</b>	47,7	83,6	166,3	48,1	84,5	168,2	<b>1,4</b>	45,6	83,3	165,5	47,0	82,2	163,0	<b>1,4</b>	46,5	81,1	160,5	46,1	80,2	158,5	<b>1,4</b>	45,6	79,1	156,0
0,15	54,1	92,2	178,7	<b>1,4</b>	53,5	90,9	175,9	53,9	91,8	177,9	<b>1,3</b>	53,3	90,6	170,4	52,8	89,5	172,7	<b>1,3</b>	52,2	88,4	170,1	51,8	87,5	168,2	<b>1,4</b>	51,3	86,4	165,6

Таблиця 12 – Екстремуми показників втрат варіантів систем з алюмінієвими обмотками та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів, що відрізняються восьмигранними контурами та плоскими внутрішніми поверхнями ярем

К <sub>в</sub> , о.е.	Π* <sub>3ВВale</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПale</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВВale</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПale</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВВale</sub> , о.е.			Π* <sub>3ВПale</sub> , о.е.												
	K <sub>кв</sub>																											
	0,851						0,861						0,931						1									
	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>			%	C <sub>al</sub> /C <sub>с</sub>			%								
3	8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24	3		8	24						
0,3	25,0	41,4	77,8	<b>1,2</b>	24,8	40,9	76,7	24,9	41,2	77,5	<b>1,3</b>	24,7	40,7	76,4	24,5	40,3	75,4	<b>1,3</b>	24,3	39,8	74,3	24,1	39,5	73,5	<b>1,3</b>	23,9	39,0	72,5
0,25	26,3	42,9	79,9	<b>1,2</b>	26,0	42,5	78,8	26,2	42,8	79,6	<b>1,1</b>	25,9	42,4	78,5	25,8	41,9	77,5	<b>1,2</b>	25,5	41,4	76,5	25,4	41,1	75,7	<b>1,3</b>	25,2	40,6	74,6
0,15	30,5	48,4	87,1	<b>1,2</b>	30,3	47,9	86,0	30,5	48,3	86,8	<b>1,0</b>	30,2	47,8	85,7	30,0	47,4	84,7	<b>1,0</b>	29,8	46,9	83,6	29,6	46,5	82,8	<b>1,1</b>	29,4	46,1	81,8

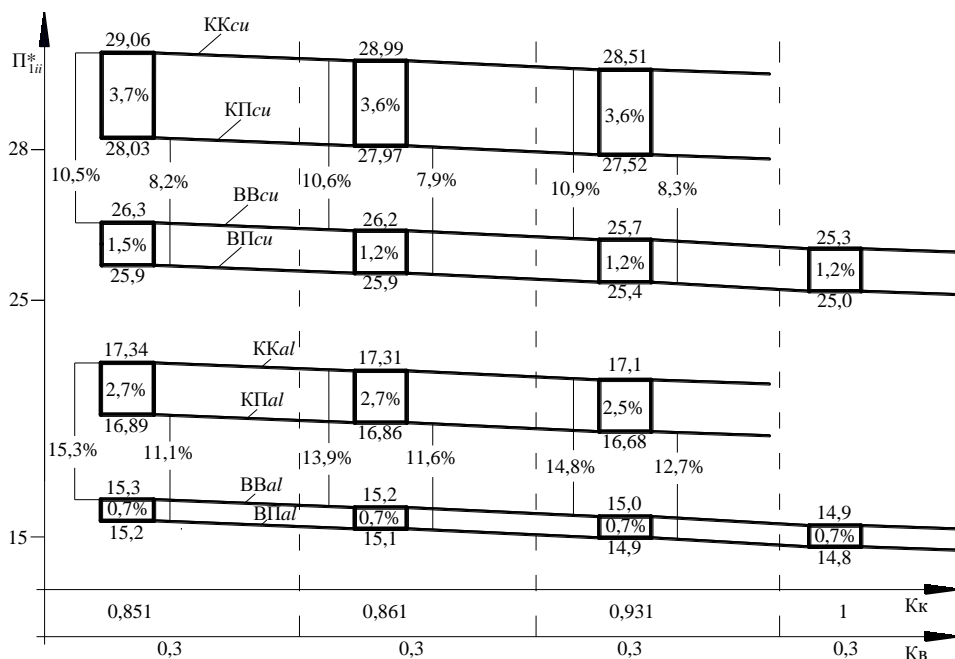


Рис. 4 – Значення екстремумів показників маси варіантів електромагнітних систем з круговими та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів

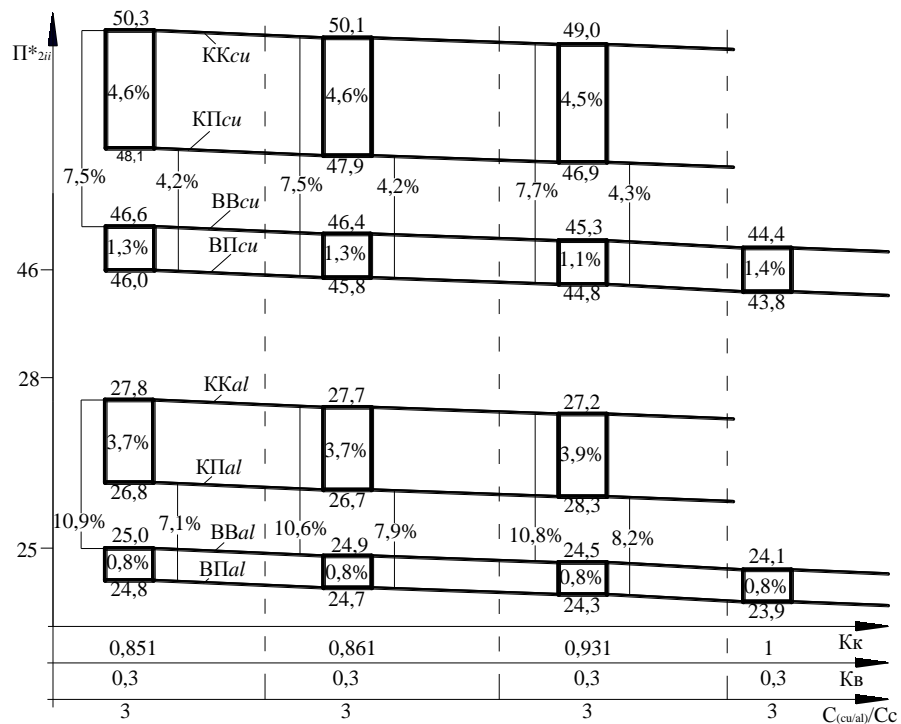


Рис. 5 – Значення екстремумів показників вартості варіантів електромагнітних систем з круговими та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів

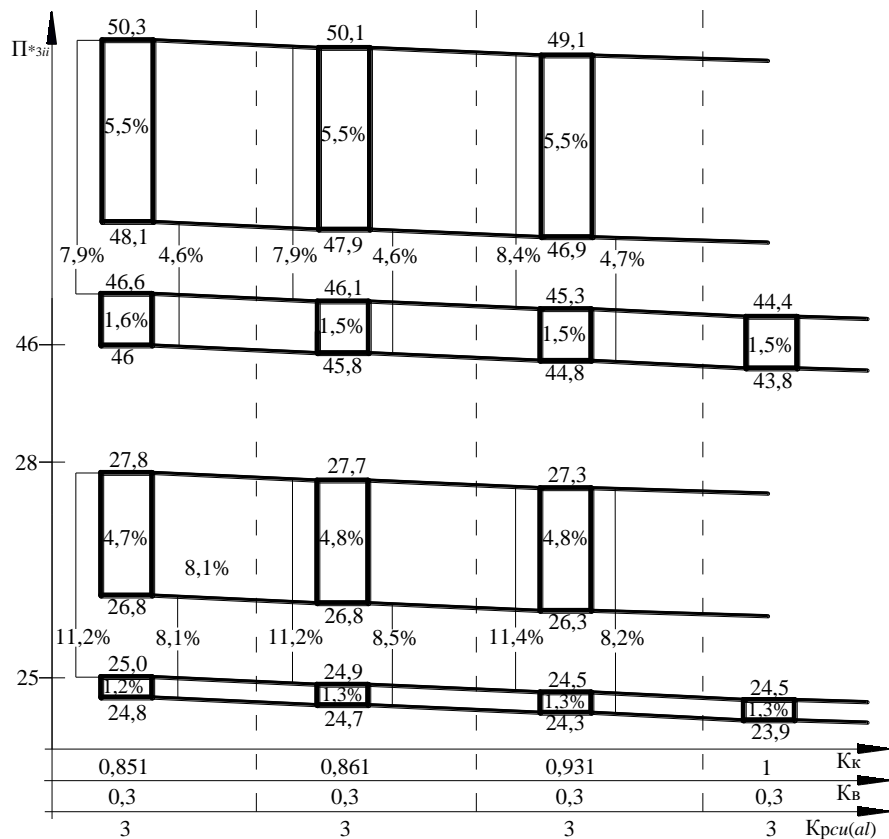


Рис. 6 – Значення екстремумів показників втрат варіантів електромагнітних систем з круговими та восьмигранними утворюючими контурами стрижнів

Наведені вище результати розрахунків свідчать про можливість енергоресурсозбереження при виробництві ТТ і ТР у випадку заміни кругових УК стрижнів і обмоткових котушок на восьмигранні УК.

### Висновки.

1. Заміна в традиційних ЕМС (рис. 1, а) кругових УК ярем (рис. 1, б) на контури схеми (рис. 1, в) призводить до покращення екстремальних значень показників маси, вартості і втрат. При мідних і алюмінієвих обмотках та при  $K_k$ , що приймає значення 0,851, 0,861 і 0,931 вказані ПТР покращуються відповідно на (3,1–3,6) %, (3,2–4,8) % і (1,5–4,5) % та на (2,1–2,7) %, (3,4–4,0) % і (4,1–4,7) %;

2. Заміна кругових УК стрижнів на восьмигранні при плоских внутрішніх поверхнях ярем призводить до покращення відносно аналогу (рис. 1, а) вказаних в п. 1 показників при аналогічних значеннях  $K_k$ . При мідних і алюмінієвих обмотках ПТР покращуються відповідно на (8,7–10,9) % (3,5–6,1) % і (1,2–3,1) % та на (11,3–13,5) %, (7,0–9,3) % і (4,3–6,4) %.

3. Заміна кругових УК стрижнів ( $K_k=0,931$ ) на восьмигранні ( $K_k=1$ ) при плоских внутрішніх поверхнях ярем призводить до більш суттєвого покращення ПТР, які при мідній і алюмінієвій обмотках покращуються відповідно на (10,1–11,8) % (6,0–7,8) % і (3,6–5,3) %; та на (12,7–14,8) %, (9,2–11,0) % і (6,4–8,5) %.

### Список літератури

1. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов (перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди, тема «В» совместного с Европейской комиссией проекта № STR – 1678 – 98 – BE). Перевод с английского Е. В. Мельниковой, редактор перевода В. С. Ионов // Энергосбережение. – 2003. – № 6 – С. 14–15, 2004. – № 1 – С. 61–65.
2. Ставинский А. А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / А. А. Ставинский // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 1. – С. 54–61.
3. Костинский С. С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкции силовых трансформаторов / С. С. Костинский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. том 20. – № 1–2. – С. 14–32.
4. Ставинский А. А. Направления усовершенствования индукционных статических электромагнитных систем с многоплоскостными образующими поверхностями и метод их структурной оптимизации / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, О. О. Плахтырь, А. Н. Цыганов // Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 40. – 160 с.
5. Ставинский А. А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч.1. Варианты и метод оценки преобразований / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 34–43.
6. W. M. Flanagan. Handbook of transformers designand application / W. M. Flanagan. – Boston : Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.
7. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М. : Альянс, 2013. – 528 с.
8. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов / В. И. Лазарев // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 53–60.
9. Пат. 39631 Україна МПК НО1F27/28 ; НО1F27/30 ; НО1F27/32. Обмотка індукційного статичного пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов – №u200809425 ; Заявл. 18.07.2008 ; Опубл. 10.03.2009. Бюл. № 5.
10. Пат. 121405 Україна, МПК (2017) НО1F27/28, НО1F27/30, НО1F27/32. Планарний магнітопровід індукційного статичного

пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов, О. С. Циганова (Україна) – u200809425 ; заявл. 19.04.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 5.

11. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массо-стоимостных показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 5 (81). – С. 106–112.
12. Ставинский А. А. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 7(77). – С. 47–52.
13. Ставинський А. А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (втрати активної потужності) / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. М. Циганов, [та ін.] // Вісник НТУ "ХПІ", Збірник наукових праць. Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. № 4. – С. 44–49. Doi:10.20998/2409-9295.2019.4.06

### References (transliterated)

1. *Energosberezhenie v Evrope: primenenie energoeffektivnykh transformatorov (perepechatano s sokrashcheniyami iz izdaniya Evropeyskogo instituta medi, tema «V» sovmejnogo s Evropeyskoy komissiej projekta* [Energy conservation in Europe: the use of energy-efficient transformers (reprinted with abbreviations from the publication of the European Copper Institute, topic “B” of the joint project with the European Commission)] № STR–1678–98–BE). Perевod s anglijskogo E. V. Melnikovoy, redaktor perevoda V. S. Ionov // *Energosberezhenie*. 2003, no. 6, pp. 14–15, 2004, no. 1, pp. 61–65. (Rus)
2. Stavinskiy A. A. Problema i napravleniya dalneyshey evolyutsii ustroystv elektromekhaniki [The problem and directions of the further evolution of electromechanical devices] *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2004, no. 1, pp. 54–61. (Rus)
3. Kostinskiy S. S. Obzor sostoyaniya otrasli transformatornogo proizvodstva i tendentsiy razvitiya konstruksii silovykh transformatorov [Overview of the state of the transformer industry and trends in the design of power transformers] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2018, vol. 20, no. 1–2, pp. 14–32. (Rus)
4. Stavinskiy A. A., Stavinsky R. A., Plakhtyr O. O., Tsyganov A. N. Napravleniya usovershenstvovaniya induktsionnykh staticheskikh elektromagnitnykh sistem s mnogoploskostnymi obrazuyushchimi poverkhnostyami i metod ikh strukturnoy optimizatsii [Directions of improvement of induction static electromagnetic systems with multiple plane generating surfaces and the method of their structural optimization] *Visnyk NTU «KhPI», Zbirnyk naukovykh prats. Seriya : Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkiv : NTU «KhPI»*. 2008, no. 40, 160 p. (Rus)
5. Stavinskiy A. A., Stavinskiy R. A., Avdeeva E. A. *Optimizatsionnyy sravnitel'nyy analiz struktur staticheskikh elektromagnitnykh sistem. Ch.1. Varianty i metod otsenki preobrazovaniy* [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part 1. Options and method for evaluating transformations] *Elektrichestvo*. 2014, no. 9, pp. 34–43. (Rus)
6. Flanagan W. M. Handbook of transformers designand application. Boston, Mc Graw Hill, 1993, 232 p.
7. Tikhomirov P. M. *Raschet transformatorov* : [Transformer Calculation] *Uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow, Alyans, 2013, 528 p. (Rus)
8. Lazarev V. I. Obobshchenie rezultatov issledovaniy po probleme elektrodinamicheskoy stoykosti silovykh transformatorov [Generalization of research results on the problem of electrodynamic resistance of power transformers] *Tekhnichna elektrodynamika*. 2005, no. 1, pp. 53–60. (Rus)
9. *Pat. 39631 Ukrayina MPK HO1F27/28 ; HO1F27/30 ; HO1F27/32. Obmotka induktsionnoho statychnoho prystroyu* / A. A. Stavynskyy, R. A. Stavynskyy, O. M. Tsyhanov №u200809425 ; Zayavl. 18.07.2008 ; Opubl. 10.03.2009. Byul. no. 5. (Ukr)
10. *Pat. 121405 Ukrayina MPK (2017) HO1F27/28, HO1F27/30, HO1F27/32. Planarnyy mahnitoprovod induktsionnoho statychnoho prystroyu* / A. A. Stavynskyy, R. A. Stavyn'skyy, O. M. Tsyhanov,



- O. S. Tsyhanova (Ukrayina) u200809425 ; Zayavl. 19.04.2017 ; Opubl. 11.12.2017, Byul. no. 5. (Ukr)
11. Stavinskiy A. A., Stavinskiy R. A., Tsyganov A. N. Sravnitel'nyy analiz massostoimostnykh pokazately planarnykh trekhfaznykh elektromagnitnykh sistem s krugovymi i vos'migrannymi obrazuyushchimi konturami sterzhney [Comparative analysis of mass-value indicators of planar three-phase electromagnetic systems with circular and octagonal generatrix contours of rods] *Elektrotekhnichni ta kompyuterni systemy*. 2012, no. 5 (81), pp. 106–112. (Rus)
  12. Stavinskiy A. A., Stavinskiy R. A., Tsyganov A. N. Sravnitel'nyy analiz poter trekhfaznykh transformatorov s krugovymi i vos'migrannymi obrazuyushchimi konturami sterzhney planarnykh magnetoprovodov [Comparative analysis of losses of three-phase transformers with circular and octagonal generatrix contours of the rods of planar magnetic cores] *Elektrotekhnichni i kompyuterni systemy*. 2012, no. 7 (77), pp. 47–52. (Rus)
  13. Stavynskyy A. A., Avdyeyeva O. A., Tsyhanov O. M., [et al.] Porivnyannya tryfaznykh transformatoriv z pryamokutnyymi i kruhovymy konturamy stryzhniv planarnykh shykhtovanykh mahnitoprovodiv (vtraty aktyvnoyi potuzhnosti) [Porting of three-phase transformers with rectilinear and circular contours of shears of planar sheathed magnetic conductors (one-third of active work)] *Visnyk NTU "KhPI", Zbirnyk naukovykh prats. Seriya : Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi. Kharkiv : NTU "KhPI"*. 2019, no. 4, pp. 44–49. (Ukr.) doi: 10.20998/2409-9295.2019.4.06

Надійшла (received) 31.01.2020

### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Цыганов О. М. Залежність показників трифазних трансформаторів і реакторів від заповнення сталлю кругових і восьмигранних контурів стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів / О. М. Цыганов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 15-23. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.03.

Цыганов А. Н. Зависимость показателей трехфазных трансформаторов и реакторов от заполнения сталью круговых и восьмигранных контуров стержней планарных шихтованных магнитопроводов / А. Н. Цыганов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3(1357). – С. 15-23. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.03.

Tsyganov A. N. Dependence of the three-phase transformers and reactors indicators from the steel filling of the circular and eight-plane contours of the rod of planar mixed magnetic wires / A. N. Tsyganov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion» – 2020. – No. 3 (1357). – P. 15-23. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.03.

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Цыганов Олександр Миколайович (Цыганов Александр Николаевич, Tsyganov Alexander Nikolaevich)** – Миколаївський національний аграрний університету, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, м. Миколаїв, Україна, тел. (066)353-81-01, ORCID: 0000-0003-0424-6086; e-mail: potomkinske@gmail.com.