

А. А. СТАВИНСЬКИЙ, О. А. АВДЕСЬВА, О. М. ЦИГАНОВ, Р. А. СТАВИНСЬКИЙ, О. С. САДОВИЙ

ПОРІВНЯННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПРЯМОКУТНИМИ І КРУГОВИМИ КОНТУРАМИ СТРИЖНІВ ПЛАНАРНИХ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ (МАСОВАРТІСТНІ ПОКАЗНИКИ)

Показано можливість і визначено цифрові значення зниження масовартістних показників варіантів активної частини з мідними і алюмінієвими обмотками трифазних трансформаторів з ідентичною електромагнітною потужністю при заміні кругових утворюючих контурів обмоткових котушок і перерізів елементів планарних стрижневих магнітопроводів на прямокутні контури. Визначена доцільність підвищення верхньої межі потужності трансформаторів з прямокутними перерізами стрижнів з метою ресурсозбереження при застосуванні засобів підвищення надійності обмоток.

Ключові слова: трифазний трансформатор, магнітопровід, обмотка, прямокутний переріз, круговий контур, маса, вартість, порівняння.

Показана возможность и определены цифровые значения снижения массовых показателей вариантов активной части с медными и алюминиевыми обмотками трехфазных трансформаторов с идентичной электромагнитной мощностью при замене круговых образующих контуров обмоточных катушек и сечений элементов планарных стержневых магнитопроводов на прямоугольные контуры. Определена целесообразность повышения верхней границы мощности трансформаторов с прямоугольными сечениями стержней с целью ресурсосбережения при использовании средств повышения надежности обмоток.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, магнитопровод, обмотка, прямоугольное сечение, круговой контур, масса, стоимость, сравнение.

Purpose. In transformers of mass productions low power planar magnetic cores with a rectangular cross section of rods are used. With a capacity of more than 16 kV·A and high power, transformers with circular forming loops of rods and winding coils are produced. In recent decades, in order to reduce the complexity of manufacturing, the transformers power with rectangular sections of magnetic circuits cores has increased. However, there is no analytical study of the effect of replacing circular core loops and winding coils on rectangular ones. **Methodology.** The influence analysis of the change in the rods configuration on the mass and cost is performed by the method of invariant and structural-parametric synthesis of electrical machines with optimized dimensionless indicators. **Results.** Indicators values comparison gives an objective assessment of the advantages or disadvantages of the considered variant with respect to base analog. **Originality.** It has been established that use of rectangular sections of rods and copper or aluminum windings forming loops in an electromagnetic system leads to an improvement in three-phase transformer mass performance of a relative to the analogue with circular generating loops. The change in mass-value indicators depends on the rods filling factor of the circular contour with rectangular packages of electrical steel. **Practical value.** Three-phase planar electromagnetic systems of 1–110 kV voltage class with rod cores and circular and rectangular generating circuits are distinguished by minimal mass and cost indicators by 5,76–5 % and 7,8–6,6 % and 2,5–2,3 % and 2,93–2,7 % with the rods filling factor 0,786 and 0,925 in variants with copper windings. These indicators, when used in aluminum windings, differ by 4–3,54 % and 6,3–4,9 % and by 1,8–1,75 % and 2,67–2,07 %.

Keywords: three-phase transformer, magnetic core, winding, rectangular section, circular contour, mass, cost, comparison.

Вступ. Аналіз стану питання. Основні різновиди планарних електромагнітних систем (ЕМС) трифазних трансформаторів і реакторів відрізняються традиційними прямокутними і круговими утворюючими контурами (УК) перерізів планарних магнітопроводів і відповідно витків обмоткових котушок [1–4].

Магнітопроводи з прямокутними УК застосовуються в індуктивних статичних пристроях (ІСП) малої потужності масового випуску та в трансформаторах середньої потужності до 200 кВ·А. При потужності трифазних трансформаторів (ТТ) від 16 кВ·А застосовуються магнітопроводи зі східчастим заповненням кругових УК пакетами пластин електротехнічної сталі (ЕТС) різної ширини. В діапазоні потужності від 16 до 10000 кВ·А коефіцієнти заповнення кругових УК становить $K_k = 0,786–0,925$ при кількості пакетів ЕТС в половині окружності 3–11 [2].

Відомими недоліками прямокутних УК є підвищення середньої довжини і зниження надійності ізоляції витків в зонах їх вигину між ортогональними боками обмоткових котушок. Кругові УК знижують середню довжину витків відносно прямокутних периметрів аналогічних площ при значному коефіцієнті $K_k > 0,92$, однак суттєво ускладнюють заготовку пластин ЕТС та

складання магнітопроводів. Також вважається, що кругові УК підвищують електродинамічну стійкість обмоток ІСП [1, 2].

В останні десятиріччя прямокутні УК ЕМС також використовуються при виготовленні трансформаторів потужністю, що перевищує 250 кВ·А. Підвищення межі потужності вимагає застосування стрічкових обмоток, зокрема з алюмінію, що у сукупності з капсулюванням ізоляційним компаундом забезпечує їх електричну і динамічну міцність [4]. При цьому використання в обмотках алюмінію дозволяє заощаджувати більш дефіцитну мідь при зменшенні маси обмоткового матеріалу ІСП [1]. Однак аналітичного дослідження впливу на характеристики ІСП заміни кругових УК ЕМС на прямокутні до нинішнього часу не виконано. В зв'язку з сучасними вимогами енергоресурсозбереження, порівняння основних показників технічного рівня (ПТР) ТТ з прямокутними і круговими УК та мідними і алюмінієвими обмотками є доцільним і актуальним.

Аналіз основних досягнень та існуючі методи розв'язання задачі. Відсутність узагальненого аналітичного зіставлення ЕМС з прямокутними і круговими УК можна пояснити застосуванням в математичних моделях (ММ) традиційних ЕМС розуміюваних оп-

тимізаційних цільових функцій (ЦФ) з індивідуальними керованими змінними (КЗ).

Оптимізаційні ЦФ ММ ЕМС з прямокутними і круговими УК містять КЗ у виді відповідно відношень розмірів боків прямокутного перерізу магнітопроводу та величин діаметру стрижня, висоти обмоткового вікна, амплітуди індукції стрижня і усередненої густини струму обмоток. Відомі ММ [1–3] з вказаними окремими КЗ представлені ЦФ параметричного синтезу ІСП конкретних виконань і потужностей. Крім того, існує метод ЦФ структурного і структурно-параметричного синтезу електричних машин і апаратів з універсальними безрозмірними геометричними і од-

ної або двома (при мідної та алюмінієвої первинної і вторинної обмотках) електромагнітними КЗ, які надають можливість узагальненого оптимізаційного зіставлення ЕМС з рухомими і статичними елементами [5, 6].

Мета роботи – визначення та порівняння головних ПТР основних різновидів трифазних планарних статичних ЕМС ТТ (рис. 1, а) з прямокутними (рис. 1, б) і круговими (рис. 1, в) УК перерізів стрижнів та мідними і алюмінієвими обмотками на основі методу [5, 6]. В першій частині роботи розглядаються масовартісні показники.

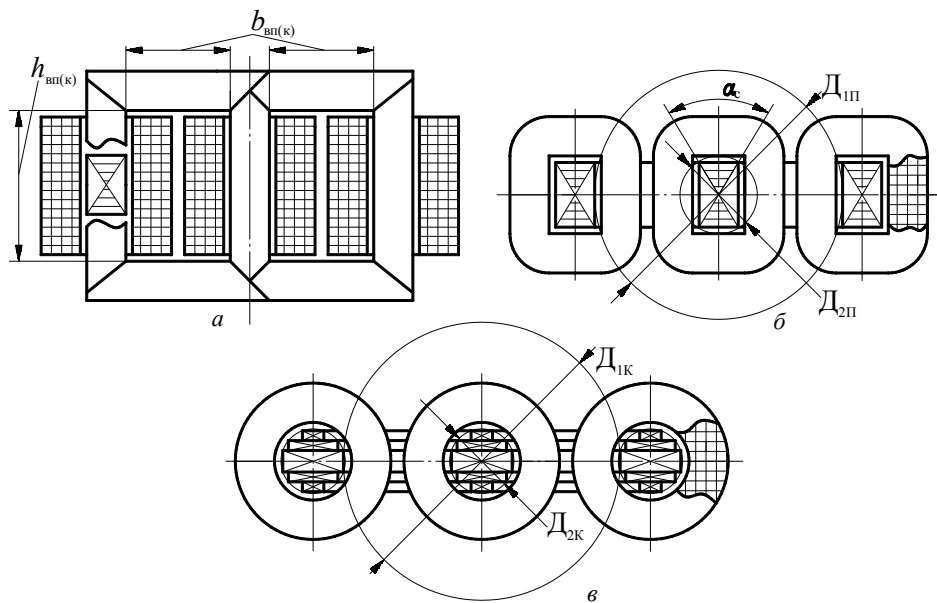


Рис. 1 – Повздовжній (а) та поперечні перерізи варіантів планарної електромагнітної системи з прямокутними (б) і круговими (в) утворюючими контурами стрижнів і обмоткових котушок

Метод дослідження. Для порівняльного аналізу будь-яких варіантів ЕМС, зокрема наведених на рис. 1, методом [5, 6] застосовується $i \geq 3$ ЦФ окремих критеріїв оптимізації. В даній роботі розглядаються ЦФ $F_{iп(к)cu}$ і $F_{iп(к)al}$ відповідно для дослідження ЕМС з мідними і алюмінієвими обмотками. Такі ЦФ [5, 6] містять загальні складові з показником вихідних даних і електромагнітних навантажень $\Pi_{тгcu(al)}$, а також оптимізаційні безрозмірні складові-показники ЦФ $\Pi_{iп(к)cu}^*$ і $\Pi_{iп(к)al}^*$ відповідно з прямокутними і круговими УК та мідними і алюмінієвими обмотками

$$F_{iп(к)cu(al)} = (\Pi_{тг})^{3/4} K_i \Pi_{iп(к)cu(al)}^*, \quad (1)$$

де K_i – складова питомих характеристик застосованої ЕТС, що відповідає i – показнику.

Головними при оптимізаційному зіставленні ЕМС ТТ є показники маси $\Pi_{1п(к)cu}^*$ і $\Pi_{1п(к)al}^*$, вартості $\Pi_{2п(к)cu}^*$ і $\Pi_{2п(к)al}^*$ та втрат активної потужності $\Pi_{3п(к)cu}^*$ і $\Pi_{3п(к)al}^*$. Чисельними розрахунками визначаються екстремуми (мінімуми) $\Pi_{iп(к)cu}^*$ і $\Pi_{iп(к)al}^*$ вказаних показників за окремими критеріями оптимізації. Такі безрозмірні екстремуми є ПТР певного варіанту ЕМС, які у сукупності з іншими співмножниками (1)

визначають фактичні розрахункові кількісні значення окремих техніко-економічних характеристик (маси і вартості ЕМС та втрат, наприклад ТТ). Показники маси і вартості є залежними від коефіцієнту заповнення обмоткового вікна обмотковим провідниковим матеріалом $K_{зв}$ (класу напруги), а також від геометричних безрозмірних КЗ. Основними геометричними КЗ є відношення висоти $h_{вп(к)}$ і ширини $b_{вп(к)}$ обмоткового вікна (рис. 1, а) та зовнішнього і внутрішнього діаметрів розрахункових окружностей варіанту магнітопроводу $D_{1п(к)}$ і $D_{2п(к)}$ (рис. 1, б, в). Додатково КЗ, що застосовується при побудові ММ деяких ЕМС, наприклад (рис. 1, б), є тригонометрична функція $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c (рис. 1, б):

$$\begin{aligned} \Pi_{1(2)п(к)cu(al)}^* &= f_{1(2)п(к)cu(al)} [K_{зв}, \lambda_b, a_m, t(\alpha_c)]; \\ \lambda_b &= h_{вп(к)} / b_{вп(к)}; a_m = D_{1п(к)} / D_{2п(к)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результати аналітичного та чисельного моделювання. Для адекватного зіставлення варіантів ЕМС (рис. 1, а) з прямокутними і круговими УК (рис. 1 б, в) приймаються ідентичними електромагнітні потужності з рівнями електромагнітних наван-

тажень, що залежать від призначення та виконання і типу охолодження ТТ. Також відповідно приймаються однаковими коефіцієнти заповнення обмоткового вікна провідниковим матеріалом K_{3B} (класу напруги) та середні значення амплітуд індукції в поперечних перерізах стрижнів і ярем. Для спрощення ММ реальні обмотки кожної з ЕМС замінюються розрахунковими обмотками [5, 6] структурно-еквівалентних реакторів (рис. 1, а) відповідно з прямокутними і круговими УК стрижневих магнітопроводів. Розрахунки вартості виконуються з врахуванням співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників, що складає у середньому 0,85 [1] та при відношенні цін вказаних провідників C_{al} , C_{cu} , до ціни ЕТС C_{st} в реальних діапазонах ($C_{al}/C_{st}=3-4,7$; $C_{cu}/C_{st}=3,5-5,5$).

Маси і вартості ЕТС магнітопроводу і міді (алюмінію) обмоток варіантів ЕМС (рис. 1, б, в) відповідно $m_{мпу(al)}$, $C_{мпу(al)}$, $m_{мкcu(al)}$, $C_{мкcu(al)}$ і $m_{опcu(al)}$, $C_{опcu(al)}$, $m_{окcu(al)}$, $C_{окcu(al)}$ визначаються рівняннями [5, 6]:

$$m_{мпу(al)} = \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{1мпу(al)}^* ; \quad (3)$$

$$C_{мпу(al)} = C_{st} \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{2мпу(al)}^* ; \quad (4)$$

$$m_{мкcu(al)} = \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{1мкcu(al)}^* ; \quad (5)$$

$$C_{мкcu(al)} = C_{st} \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{2мкcu(al)}^* ; \quad (6)$$

$$m_{опcu(al)} = \gamma_{cu(al)} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{1опcu(al)}^* ; \quad (7)$$

$$C_{опcu(al)} = C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{2опcu(al)}^* ; \quad (8)$$

$$m_{окcu(al)} = \gamma_{cu(al)} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{1окcu(al)}^* ; \quad (9)$$

$$C_{окcu(al)} = C_{cu(al)} \gamma_{cu(al)} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{2окcu(al)}^* , \quad (10)$$

де γ_{st} і $\gamma_{cu(al)}$ – густина ЕТС та мідного (алюмінієвого) обмоткового проводу; $\Pi_{1(2)мпу(al)}$, $\Pi_{1(2)мкcu(al)}$ і $\Pi_{1(2)опcu(al)}$, $\Pi_{1(2)окcu(al)}$ – відповідно показники маси (вартості) магнітопроводів і обмоток.

Рівняння маси (вартості) (1) варіантів ЕМС (рис. 1) визначаються на основі (3)–(10):

$$m_{п(к)cu(al)} = m_{мп(к)cu(al)} + m_{оп(к)cu(al)} = \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{1п(к)cu(al)}^* ;$$

$$C_{п(к)cu(al)} = C_{мп(к)cu(al)} + C_{оп(к)cu(al)} = C_{st} \gamma_{st} (\Pi_{тг})^{3/4} \Pi_{2п(к)cu(al)}^* ,$$

де показники маси (вартості) (2) з врахуванням складових [9, 10] мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Pi_{1пcu(al)} = & \left(\sqrt[4]{\frac{8}{K_{3c} K_{3B} \lambda_B (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \sin \alpha_c}} \right)^3 \{ K_{3c} \times \\ & \times [(1 + 0,75 \lambda_B) a_m + (2 - 0,75 \lambda_B) (\sin \alpha_c / 2)] + \\ & 0,75 (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) K_{3B} \lambda_B (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \times [(\sin \alpha_c / 2) + \\ & + (\cos \alpha_c / 2) + 0,3927 (a_m - (\sin \alpha_c / 2))] \} ; \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2пcu(al)} = & \left(\sqrt[4]{\frac{8}{K_{3c} K_{3B} \lambda_B (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \sin \alpha_c}} \right)^3 \{ K_{3c} \times \\ & \times [(1 + 0,75 \lambda_B) a_m + (2 - 0,75 \lambda_B) (\sin \alpha_c / 2)] + 0,75 \times \\ & \times (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) K_{3B} \lambda_B (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \times [(\sin \alpha_c / 2) + \\ & + (\cos \alpha_c / 2) + 0,3927 (a_m - (\sin \alpha_c / 2))] \left(\frac{C_{cu(al)}}{C_{st}} \right) \} ; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{1кcu(al)}^* = & \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{3B} \lambda_B (a_m - 1)^2}} \right)^3 \{ 0,7854 K_{3c} K_{3B} \times \\ & \times [(a_m - 1)(2 + 1,5 \lambda_B) + 6,2146] + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) \times \\ & 1,178 K_{3B} \lambda_B (a_m - 1)^2 [1 + (a_m - 1)/4] \} ; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{2кcu(al)}^* = & \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_{3B} \lambda_B (a_m - 1)^2}} \right)^3 \{ 0,7854 K_{3c} K_{3B} \times \\ & \times [(a_m - 1)(2 + 1,5 \lambda_B) + 6,2146] + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) \times \\ & 1,178 K_{3B} \lambda_B (a_m - 1)^2 [1 + (a_m - 1)/4] (C_{cu(al)} / C_{st}) \} . \quad (14) \end{aligned}$$

Результати оптимізаційних розрахунків по рівнянням (11)–(14) основних ПТР ($\Pi_{1(2)п(к)cu(al)}^*$) та розрахунків показників вартості ($\Pi_{2п(к)cu(al)}^*$) і показників маси ($\Pi_{1п(к)cu(al)}^*$) при значеннях КЗ (λ_{Be} , a_{Me} , α_{ce}), що відповідають критеріям відповідно мінімумів маси і вартості, наведено в табл. 1–табл. 8. Розрахунки виконані при $K_{3c}=0,97$, $K_{3B}=0,3$ і $K_{3B}=0,15$ (класи напруги 1 і 110 кВ) та вказаних вище значеннях $C_{al(cu)}/C_{st}$ і K_{3c} .

Таблиця 1 – Мінімальні значення показника маси та значення показника вартості планарної електромагнітної системи з мідними обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму маси

K_{3B}	Екстремальні значення керованих змінних			$(\Pi_{1пcu}^*)_e$	$(\Pi_{2пcu}^*)'$	
	λ_{Be} , в.о.	a_{Me} , в.о.	α_{ce} , град.		C_{cu}/C_{st}	
0,3	2,76	2,11	50,9	27,8	59,5	84,8
0,15	2,74	2,8	50,6	34,5	70,4	99,2

Таблиця 2 – Мінімальні значення показника маси та значення показника вартості планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму маси

K_{3B}	Екстремальні значення керованих змінних			$(\Pi_{1пal}^*)_e$	$(\Pi_{2пal}^*)'$	
	λ_{Be} , в.о.	a_{Me} , в.о.	α_{ce} , град.		C_{al}/C_{st}	
0,3	2,73	3,46	50,4	16,8	29,9	41,0
0,15	2,71	4,7	50,2	21,8	37,4	50,6

Таблиця 3 – Мінімальні значення показника вартості та значення показника маси планарної електромагнітної системи з мідними обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму вартості

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних						(Π [*] _{2лсu}) _e		(Π [*] _{1лсu})'	
	C _{cu} /C _{st}									
	3,5			5,5			C _{cu} /C _{st}		C _{cu} /C _{st}	
	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.	3,5	5,5	3,5	5,5
0,3	2,8	1,345	51,5	2,81	1,16	51,7	51,7	66,2	31,9	35,8
0,15	2,77	1,71	51,2	2,79	1,46	51,3	60,9	76,5	39,5	44

Таблиця 4 – Мінімальні значення показника вартості та значення показника маси планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму вартості

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних						(Π [*] _{2паl}) _e		(Π [*] _{1паl})'	
	C _{al} /C _{st}									
	3			4,7			C _{al} /C _{st}		C _{al} /C _{st}	
	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	α _{се} , град.	3	4,7	3	4,7
0,3	2,76	2,19	50,9	2,77	1,85	51	26,6	32,8	18,6	20,4
0,15	2,74	2,91	50,5	2,75	2,42	50,8	33,2	40,1	24,1	26,3

Таблиця 5 – Мінімальні значення показника маси та значення показника вартості планарної електромагнітної системи з мідними обмотками та круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму маси

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних				(Π [*] _{1кcu}) _e		(Π [*] _{2кcu})'			
	K _к						K _к			
	0,786		0,925				0,786		0,925	
	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	K _к		C _{cu} /C _{st}		C _{cu} /C _{st}	
					0,786	0,925	3,5	5,5	3,5	5,5
0,3	3,49	3,32	3,45	3,51	29,5	28,5	64,2	91,9	61,3	87,5
0.15	3.3	4.24	3.31	4.51	36.3	35.3	75.4	106.6	72.5	102.2

Таблиця 6 – Мінімальні значення показника маси та значення показника вартості планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму маси

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних				(Π [*] _{1kal}) _e		(Π [*] _{2kal})'			
	K _к						K _к			
	0,786		0,925				0,786		0,925	
	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	K _к		C _{aI} /C _{st}		C _{aI} /C _{st}	
					0,786	0,925	3	4,7	3	4,7
0,3	3,25	5,12	3,22	5,45	17,5	17,1	31,7	43,7	30,6	42,1
0,15	3,12	6,75	3,1	7,21	22,6	22,2	39,3	53,5	38,2	51,9

Таблиця 7 – Мінімальні значення показника вартості та значення показника маси планарної електромагнітної системи з мідними обмотками та круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму вартості

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних								(Π [*] _{2кcu}) _e				(Π [*] _{2кcu})'			
	K _к															
	0,786				0,925				K _к				K _к			
	C _{cu} /C _{st}				C _{cu} /C _{st}				0,786		0,925		0,786		0,925	
	3,5		5,5		3,5		5,5		C _{cu} /C _{st}		C _{cu} /C _{st}		C _{cu} /C _{st}		C _{cu} /C _{st}	
	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	λ _{вe} , В.О.	a _{ме} , В.О.	3,5	5,5	3,5	5,5	3,5	5,5	3,5	5,5
0,3	3,75	2,27	3,84	2,02	3,72	2,37	3,81	2,1	55,8	71,8	53,2	68,2	34,0	38,2	38,2	36,8
0,15	3,65	2,43	3,61	2,77	3,57	2,92	3,67	2,54	65,2	82,4	62,6	78,7	41,7	46,5	40,5	45,1

Таблиця 8 – Мінімальні значення показника вартості та значення показника маси планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму маси

K _{зв}	Екстремальні значення керованих змінних								(Π [*] _{2kal}) _e				(Π [*] _{2kal})'			
	K _к								K _к				K _к			
	0,786				0,925				0,786				0,925			
	C _{al} /C _{st}				C _{al} /C _{st}				C _{al} /C _{st}				C _{al} /C _{st}			
	3		4,7		3		4,7		3		4,7		3		4,7	
	λ _{вг} , в.о.	a _{ме} , в.о.	λ _{вг} , в.о.	a _{ме} , в.о.	λ _{вг} , в.о.	a _{ме} , в.о.	λ _{вг} , в.о.	a _{ме} , в.о.	3	4,7	3	4,7	3	4,7	3	4,7
0,3	3,47	3,43	3,56	2,96	3,43	3,63	3,53	3,12	28,2	35	27,3	33,7	19,5	21,4	19	20,9
0,15	3,32	4,39	3,41	3,73	3,29	4,67	3,38	3,96	34,9	42,5	33,9	41,1	25	27,4	24,5	26,9

З розрахунків (табл. 1–табл. 8) випливає, що побудова трифазних ЕМС з планарним стрижневим магнітопроводом на основі прямокутних УК додатково до зниження трудомісткості виробництва призводить до покращення масовартісних показників відносно електромагнітно-еквівалентних аналогів з круговими УК.

Висновки. Трифазні планарні ЕМС класу напруги 1–110 кВ з стрижневими магнітопроводами та круговими і прямокутними УК відрізняються значеннями мінімальних показників маси і вартості відповідно на 5,76–5 % і 7,8–6,6 % при K_к = 0,786 та 2,5–2,3 % і 2,93–2,7 % при K_к = 0,925 в варіантах з мідними обмотками. Вказані показники при використанні в обмотках алюмінію покращуються, як і при наявності мідних обмоток, на 4–3,54 % і 6,3–4,9 % при K_к = 0,786 та на 1,8–1,75 % і 2,67–2,07 % при K_к = 0,925.

Список літератури

1. Зенова В. П. Об электродинамической эффективности трансформаторов с алюминиевыми обмотками / В. П. Зенова, А. И. Лурье // В кн. «Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. Составитель и научный редактор А. И. Лурье. – М.: «Знак», 2005. – 520 с. – С. 348–355.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.
3. Белопольский И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И. И. Белопольский, Е. И. Каретникова, Л. Г. Пикалова. – М.: Альянс, 2013. – 400 с.
4. Кравченко А. Масляные энергосберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев: Радиоаматор, 2013. – №5. – С. 14–17.
5. Авдеева Е. А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массоистинные показатели) /

Е. А. Авдеева // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 4. – С. 15–20.

6. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массоистинных показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №5 (81). – С. 106–112.

References (transliterated)

1. Zenova V. P., Lur'e A. I. Ob ehlektrodinamicheskoy ehffektivnosti transformatorov s alyuminiyevymi obmotkami [On the electrodynamic efficiency of transformers with aluminum windings]. V kn. «Elektrodinamicheskaya stojkost' transformatorov i reaktorov pri korotkih замыкaniyah. Sostavitel' i nauchnyj redaktor A. I. Lur'e. Moscow, «Znak», 2005, 520 p. pp. 348–355.
2. Tihomirov P. M. Raschet transformatorov [Transformer Calculation]. Uchebnoe posobie dlya vuzov Moscow, Al'yans, 2013, 528 p.
3. Belopol'skij I. I., Karetnikova E. I., Pikalova L. G. Raschet transformatorov i drossel'ey maloj moshchnosti [Calculation of transformers and low power chokes]. Moscow, Al'yans, 2013, 400 p.
4. Kravchenko A., Metel'skij V. Masljanye jenergosberegajushhie transformatory [Calculation of transformers and low power chokes]. Elektrik. Mezhdunarodnyj elektrotehnicheskij zhurnal. – Kiev: Radioamator, 2013, pp. 14–17.
5. Avdeeva E. A. Sravnitel'nyj analiz planarnoj i prostranstvennoj aksial'noj trehfaznyh jelektromagnitnyh sistem s parallel'nymi obrazujushhimi poverhnost'jami sterzhnej i obmotochnyh okon massosistinnye pokazateli [Comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of rods and winding windows (mass-value indicators)]. Elektrotehnika i elektromexanika. 2012, no. 4, pp. 15–20.
6. Stavinskij A. A., Stavinskij R. A., Cyganov A. N. Sravnitel'nyj analiz massosistinnnyh pokazatelej planarnykh trehfaznyh jelektromagnitnyh sistem s krugovymi i vos'migrannymi obrazujushhimi konturami sterzhnej [Comparative analysis of mass-cost indicators of planar three-phase electromagnetic systems with circular and octahedral forming contours of the rod] Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sy'stemy. 2012, no. (81), pp. 106–112.

Надійшла (received) 05.02.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів планарних шихтованих магнітопроводів (масовартісні показники) / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. М. Циганов, Р. А. Ставинський, О. С. Садовий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 38–43. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Сравнение трехфазных трансформаторов с прямоугольными и круговыми контурами стержней планарных шихтованных магнитопроводов (массо-стоимостные показатели) / А. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, А. Н. Цыганов, Р. А. Ставинский, А. С. Садовий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 38–43. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Comparison of three-phase transformers with rectangular and circular rod contour of planar laminated magnetic cores (mass and cost indicators) / A. A. Stavinskiy, E. A. Avdieieva, A. N. Tsyganov, R. A. Stavinskiy, A. S. Sadovoy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 38–43. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ставинський Андрій Андрійович, доктор технічних наук, професор, Миколаївський національний аграрний університет, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, тел. +38(099)004-45-31.

Ставинский Андрей Андреевич, доктор технических наук, профессор, Николаевский национальный аграрный университет, заведующий кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики, тел. +38(099)004-45-31.

Stavinskiy Andrey Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Mykolayiv National Agrarian University, Chair of the Department of Electric power industry, electrical engineering and electromechanics; tel. +38(099)004-45-31.

Авдеева Олена Андріївна, кандидат технічних наук, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем, тел. +38(095)056-05-75, e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Авдеева Елена Андреевна, кандидат технических наук, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем, тел. +38(095)056-05-75, e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Avdieieva Elena Andreevna, candidate of technical sciences, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Associate Professor of the Department of the Shipboard electrical power systems, tel. +38(095)0560575, e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Цыганов Олександр Миколайович, Миколаївський національний аграрний університет, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, тел. +38(066)353-81-01, e-mail: potomkinske@gmail.com.

Цыганов Александр Николаевич, Николаевский национальный аграрный университет, асистент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики, тел. +38(066)353-81-01, e-mail: potomkinske@gmail.com.

Tsyganov Alexander Nikolaevich, Mykolayiv National Agrarian University, Assistant of the Department of Electric power industry, electrical engineering and electromechanics; tel. +38(066)353-81-01, e-mail: potomkinske@gmail.com.

Ставинський Ростислав Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем, тел. +38(066)-128-55-18, e-mail: strostand@mail.ru.

Ставинский Ростислав Андреевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем, тел. +38(066)-128-55-18, e-mail: strostand@mail.ru.

Stavinskiy Rostislav Andreevich, candidate of technical sciences, Associate Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Associate Professor of the Department of the Shipboard electrical power systems, tel. +38(066)-128-55-18, e-mail: strostand@mail.ru.

Садовий Олексій Степанович, Миколаївський національний аграрний університет, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, +38(063)268-31-22, e-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua.

Садовой Алексей Степанович, Николаевский национальный аграрный университет, асистент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики, тел. +38(063)268-31-22, e-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua.

Sadovoy Alexey Stepanovich, Mykolayiv National Agrarian University, Assistant of the Department of Electric power industry, electrical engineering and electromechanics; tel. +38(063)268-31-22, e-mail: sadovuyos@mnaeu.edu.ua.