

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

ПОРІВНЯННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ПРЯМОКУТНИМИ І КРУГОВИМИ КОНТУРАМИ СТРИЖНІВ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ (ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ)

Визначено відмінності значень втрат активної потужності варіантів електромагнітних систем трифазних трансформаторів з мідними і алюмінієвими обмотками та стрижневими шихтованими магнітопроводами при заміні кругових утворюючих контурів стрижнів і обмоткових котушок на прямокутні контури при умові ідентичності електромагнітної потужності. Встановлена доцільність виробництва трансформаторів потужністю до 6300 кВ·А з прямокутними перерізами стрижнів, що забезпечує, на додаток до зниження трудомісткості виготовлення магнітопроводів і матеріалоемності, підвищення енергоефективності електропостачання.

Ключові слова: трифазний трансформатор, магнітопровід, обмотка, прямокутний переріз, круговий контур, втрати активної потужності, порівняння.

Определены отличия значений потерь активной мощности вариантов электромагнитных систем трехфазных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками и стержневыми шихтованными магнітопроводами при замене круговых образующих контуров стержней и обмоточных катушек на прямоугольные контуры при условии идентичности электромагнитной мощности. Установлена целесообразность производства трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А с прямоугольными сечениями стержней, что обеспечивает, в дополнение к снижению трудоемкости изготовления магнітопроводов и материалоемкости, повышение энергоэффективности электроснабжения.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, магнітопровід, обмотка, прямоугольное сечение, круговой контур, потери активной мощности, сравнение.

Purpose. In the mass production of low-power transformers, magnetic cores and windings are used with rectangular sections of rods and forming the contours of the coils turns. The contours of medium and high power transformers active elements are circles. The cross sections of the magnetic cores form rectangular steel packages of various widths with filling coefficients of circular circuits 0,786–0,925 at a power of 16–10000 kV·A. In recent decades, rectangular contour generators of planar electromagnetic systems have also been used in the transformers manufacture with a more than 250 kV·A capacity. The use of rectangular sections instead of rods circular cores changes the consumption of materials and active power losses. Therefore, it is of theoretical and practical interest an analytical substantiation of the expediency of such a replacement. **Methodology.** A comparative analysis of three-phase transformer variants is performed by the method of generalized invariant structural-parametric synthesis. Target functions are used with a component of the source data and electromagnetic loads and dimensionless components. The dimensionless optimization components of mass and cost are functions of relative geometric controlled variables. The loss component additionally depends on the relative electromagnetic controlled variable. The values of optimization components are indicators of the objective function, and their minima represent the technical level indicators of transformer. **Results.** The indicators are determined with same source data and loads, which corresponds to electromagnetic power of the compared options identity. Calculations are performed in real range of electromagnetic controlled variable variation of dry and oil transformers. This eliminates the dependence of loss indicators on power, method of heat removal and other factors. **Originality.** It has been established that, in addition to improving the mass-carrying indices, a reduction in losses of three-phase transformers is achieved when replacing circular forming circuits to rectangular circuits. **Practical value.** The reduction of loss of transformers of voltage range 1–110 kV with rod laminated magnetic cores, copper and aluminum windings with rectangular generating circuits relative to analogs with circular circuits is 6,3–8,9 % and 2,64–3 % with the rods filling factor 0,786 and 0,925.

Keywords: three-phase transformer, magnetic core, winding, rectangular section, circular contour, active power losses, comparison.

Вступ. Аналіз стану питання. Головним напрямком розвитку електромеханіки у ХХІ сторіччі є комплексне збереження енергетичних і матеріальних ресурсів при виробництві електромеханічних пристроїв. В [1] вказано, що втрати в розподільчих трансформаторах в Європейському Союзі склали 2 % від усієї виробленої електроенергії або 1/3 від загальних втрат. Основна складова цих втрат приходить на розподільчі трансформатори потужністю 25–630 кВ·А напругою 6–10 кВ. Тому існує необхідність рішення першочергової задачі зниження втрат неробочого руху і короткого замикання трифазних трансформаторів (ТТ) потужністю до 6300 кВ·А, особливо ТТ I і II габаритів [1, 2]. Задачу пропонується вирішувати відомими способами зниження електромагнітних навантажень (ЕМН), використання аморфної електротехнічної сталі (ЕТС), високо-температурних надпровідних і «кабельних» обмоток. Однак, при застосуванні таких способів погіршуються масовартісні, або вартісні показники ТТ та виникають певні особливості та питання експлуатації [1].

Аналіз актуальних досліджень і публікацій. В останні десятиріччя додатково до сучасних досягнень електроматеріалознавства використувувались залишкові резерви удосконалення електромагнітних систем (ЕМС) трансформаторів і реакторів. Виконана, незважаючи на значні ускладнення технології розкриття ЕТС, заміна «прямих» стиків текстурованих шихтованих магнітопроводів на «косі» [2, 4, 5]. З міркувань зниження трудомісткості виготовлення магнітопроводів використання прямокутних утворюючих контурів (УК) стрижнів і обмоткових котушок поширено до потужності 630 кВ·А – серії Tumetic (ФРГ) і ОСМ (Японія). При цьому відомі проблеми прямокутних УК обмоткових котушок [3] вирішуються клеючим покриттям міжшарової ізоляції або капсулюванням обмоток (технології «CAST RESIN» і «RESIBLOC») [2, 4]. В першій частині роботи [6] універсальним методом аналітичного оптимізаційного зіставлення [7, 8] визначено, що в ТТ класу напруги 1–110 кВ з шихтованими стрижневими магнітопроводами та мідними і алюмінієвими обмотками, заміна кругових УК на прямокутні приз-

водить до покращення показників маси і вартості ЕМС.

Мета статті. Визначення та порівняння, на додаток до [6], показників втрат активної потужності варіантів трифазних планарних ЕМС з стрижневими магнітопроводами та прямокутними і круговими УК.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для узагальненого порівняння методом [7, 8] втрат активної потужності варіантів ЕМС з прямокутними і круговими УК при використанні в обмотках міді (алюмінію) застосовуються оптимізаційні безрозмірні складові $\Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*$ і $\Pi_{3\text{к}cu(al)}^*$ цільових функцій (ЦФ) вказаних втрат $F_{3\text{п}(к)cu(al)}$ і $F_{3\text{к}cu(al)}$

$$F_{3\text{п}(к)cu(al)} = \gamma_{st} P_{nst} (\Pi_{TT})^{3/4} \Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*, \quad (1)$$

де γ_{st} і P_{st} – питомі маса і втрати ЕТС при заданому значенні магнітної індукції магнітопроводу відповідно; Π_{TT} – показник вихідних даних технічного завдання проектування і ЕМН ТТ [6–8].

Оптимізаційні складові $\Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*$ ЦФ (1), як і показники маси і вартості [6], є залежними від основних безрозмірних геометричних керувань змінних (КЗ) відношення розмірів боків поздовжнього перерізу обмоткового вікна λ_b і відношення розмірів діаметрів розрахункових окружностей магнітопроводу a_m та є залежними, в деяких ЕМС, від додаткової безрозмірної тригонометричної КЗ $t(\alpha_c)$ центрального кута стрижня α_c (рис. 1 наведеної вище в даному збірнику роботи [6]). Крім того, оптимізаційна складова, тобто показник втрат активної потужності $\Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*$ є залежною від однієї (двох у випадку наявності в ЕМС як мідної так і алюмінієвої обмоток) відносної електромагнітної (електромагнітних) КЗ втрат $K_{pcu(al)}$

$$\Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^* = f_{3\text{п}(к)cu(al)} [K_{30}, \lambda_b, a_m, t(\alpha_c), K_{pcu(al)}], \quad (2)$$

де $K_{30} = 0,3-0,15$ – коефіцієнт заповнення обмоткового вікна міддю (алюмінієм) відповідно до діапазону класу напруги 1–110 кВ. Електромагнітна КЗ ЦФ (1) є залежною від співвідношень коефіцієнтів додаткових втрат короткого замикання K_{dk} і неробочого руху $K_{дн}$ та значень питомих мас проводу обмотки $\gamma_{cu(al)}$ і ЕТС γ_{st} , а також від відношень значень питомих втрат обмотки (залежить від показника питомих втрат міді (алюмінію) $K_{ncu(al)}$ і густини струму $J_{ocu(al)}$) та величини P_{st} ЕТС [7, 8]

$$K_{pcu(al)} = \frac{K_{dk} \gamma_{cu(al)} K_{ncu(al)} J_{ocu(al)}^2}{K_{дн} \gamma_{st} P_{st}}. \quad (3)$$

Третім основним показником технічного рівня ТТ, тобто показником енергетичної ефективності ЕМС [7, 8], є екстремальне (мінімальне) значення $\Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*$ показника (2).

Результати аналітичного та чисельного моделювання. Для адекватного зіставлення на основі (2) значень енергетичних показників технічного рівня варіантів ЕМС, що розглядаються в роботі, приймаються однаковими електромагнітні потужності і показники Π_{TT} двох різновидів ТТ, що відрізняються конфігураціями стрижнів магнітопроводу і обмотко-

вих котушок. Також відповідно однаковими є електротехнічні матеріали, класи напруг, коефіцієнти заповнення ЕТС K_{30} та середні значення амплітуди індукції B_{st} поперечних перерізів елементів магнітопроводів. Реальні обмотки кожної з ЕМС замінюються розрахунковими обмотками [6] структурно і конфігураційно еквівалентних реакторів.

Загальні втрати активної потужності (1) варіантів ТТ з прямокутними і круговими УК елементів ЕМС та мідними (алюмінієвими) проводами обмоток визначаються сумою втрат відповідно неробочого руху $P_{нп(к)cu(al)}$, $P_{нкcu(al)}$ і втрат короткого замикання (навантажувальних) $P_{кп(к)cu(al)}$, $P_{ккcu(al)}$ [3, 7, 8]

$$F_{3\text{п}(к)cu(al)} = P_{нп(к)cu(al)} + P_{кп(к)cu(al)} \equiv \Pi_{3\text{п}(к)cu(al)}^*,$$

де показники втрат визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{3\text{п}cu(al)}^* = & K_{дн} \left(\sqrt[4]{\frac{8}{K_{30} K_{30} \lambda_b (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \sin \alpha_c}} \right)^3 \times \\ & \times \left\{ K_{30} \sin \alpha_c \left[3 \sin (\alpha_c / 2) + (1 + 0,75 \lambda_b) (a_m - \sin (\alpha_c / 2)) \right] + \right. \\ & + 0,75 K_{pcu(al)} K_{30} \lambda_b \times (a_m - (\sin \alpha_c / 2))^2 \left[(\sin (\alpha_c / 2)) + \right. \\ & \left. \left. + (\cos (\alpha_c / 2)) + 0,3927 (a_m - (\sin (\alpha_c / 2))) \right] \right\}; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{3\text{к}cu(al)}^* = & 0,7854 K_{дн} \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{30} K_{30} \lambda_b (a_m - 1)^2}} \right)^3 \times \\ & \times \left\{ K_{30} K_{30} \left[(a_m - 1) (2 + 1,5 \lambda_b) + 6,2146 \right] + \right. \\ & \left. 1,5 K_{pcu(al)} K_{30} \lambda_b \times \right. \\ & \left. \times \left[1 + 0,25 (a_m - 1) \right] (a_m - 1)^2 \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

Методика побудови узагальнених математичних моделей оптимізаційного зіставлення, тобто структурного синтезу, повинна забезпечувати порівняння варіантів ЕМС при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності (рівності Π_{TT}) і інваріантності (універсальності) виду ЦФ та основних КЗ. Таким вимогам відповідають ЦФ $F_{1(2)\text{п}(к)cu(al)}$ маси і вартості ЕМС [6–8], безрозмірні оптимізаційні складові яких визначаються виключно КЗ геометричних співвідношень активних елементів і є незалежними від електромагнітних КЗ (обумовлено винесенням ЕМН в показник Π_{TT}). Однак вказаний принцип при визначенні показників втрат знаходиться у протиріччі з процесом параметричного синтезу ТТ та інших електромеханічних пристроїв, який передбачає варіювання ЕМН, тобто можливість змін їх величин та співвідношень при перевірці і врахуванні проектних обмежень, зокрема нагріву обмоток. В свою чергу варіювання ЕМН при параметричній оптимізації протирічить рішенню задачі узагальненого структурного синтезу ЕМС. Протиріччя обумовлено прив'язкою діапазону змін ЕМН до конкретних виконань, потужностей і способів відводу тепла від активної частини. Тому для подолання названого протиріччя і вилучення залежності узагальненого структурного синтезу від потужності, величин ЕМН і особливостей

структур і УК елементів ЕМС та систем охолодження, КЗ і показники окремих критеріїв оптимізації повинні бути уявлені у відносному (безрозмірному) виді. Також при визначенні показників втрат відносна електромагнітна КЗ повинна змінюватись в певному реальному діапазоні, що враховує відомі мінімальні і максимальні розрахункові значення ЕМН [3]. Відповідно порівнюються діапазонні значення показників втрат.

Згідно [3] в сучасних ТТ використовуються анізотропні ЕТС марок 3406–3409 з $K_{zc} = 0,96–0,97$ при товщині стрічки (рулону) $\delta_c = 0,27–0,35$ мм. Для розрахунків $K_{pcu(al)}$ і $\Pi_{3п(к)cu(al)}^*$ приймаються значення $B_{st} = 1,45–1,75$ Тл та ЕТС 3407 товщиною $\delta_c = 0,35$ мм, у якої при частоті $f_1 = 50$ Гц питомі втрати при значеннях магнітної індукції 1,45 Тл і 1,7 Тл відповідно складають $P_{1,45/50} = 0,988$ Вт/кг і $P_{1,7/50} = 1,36$ Вт/кг. В розрахунках «сухих» і «масляних» ТТ потужністю 10–160 кВ·А, а також 160–630 кВ·А використовуються значення $K_{dk} \leq 1,04$ і $K_{dk} \leq 1,075$. Приймається $K_{dk} = 1,04$. Для мідного (алюмінієвого) проводу з значеннями $\gamma_{cu(al)} = 8900$ (2700) кг/м³, $K_{pcu(al)} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ ($12,75 \cdot 10^{-12}$) Вт·м⁴/(А²кг) і при частоті $f_1 = 50$ Гц, у діапазонах номінальної потужності $S_n = 0,3–1$ кВ·А і $S_n = 1–2,5$ кВ·А щільності струму складають $J_{ocu(al)} = 1,4–2,4$ (1,1–1,8) А/мм². В масляних ТТ при $S_n = 2,5–63$ кВ·А $J_{ocu(al)} = 1,8–2,2$ (1,4–1,8) А/мм² і при $S_n = 63–630$ кВ·А $J_o = 2,2–3,5$ (1,6–2,7) А/мм², а в "сухих" ТТ з $S_n = 10–1600$ кВ·А напіввідсумок густин струму первинної і вторинної концентричних обмоток складає $J_{ocu(al)} = 1,7–2,4$ (1,2–1,8) А/мм² [3].

Підвищення втрат неробочого ходу в готовому планарному магнітопроводі відносно значень P_{st} анізотропної ЕТС залежить від сукупності фізичних і конструктивно-технологічних чинників [3]. Відомо [2], що загальне підвищення питомих втрат в головному планарному магнітопроводі з усіма косими стиками відносно питомих втрат ЕТС складає 1,37–1,58. Також в [5] зроблено висновок, що використання в шихтованих магнітопроводах з анізотропної ЕТС усіх косих стиків в ТТ малої і середньої потужності призводить

до підвищення на 15–20 % втрат неробочого руху відносно ТТ з магнітопроводами, що містять прямі стики. У зв'язку з цим для розрахунків приймається середнє значення $K_{zn} = 1,475$.

У відповідності до наведених вище значень ЕМН, питомих характеристик і коефіцієнтів додаткових втрат, розраховуються наступні значення електромагнітних КЗ (3) ЦФ (1) варіантів ЕМС з мідними (алюмінієвими) обмотками та магнітопроводами з косими стиками сухих і масляних і ТТ:

$$\left. \begin{aligned} K_{pcu1} &\geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 3; \\ K_{pcu2} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 8; \\ K_{pcu3} &\leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24; \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{pal1} &\geq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,1 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 3; \\ K_{pal2} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (1,8 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 1,36} \approx 8; \\ K_{pal3} &\leq \frac{1,04 \cdot 2700 \cdot 12,75 \cdot 10^{-12} (2,7 \cdot 10^6)^2}{1,475 \cdot 7650 \cdot 0,988} \approx 24. \end{aligned} \right\} (7)$$

Результати чисельних оптимізаційних розрахунків екстремумів ($\Pi_{3пcu(al)}^*$) показників енергетичної ефективності (4), (5) та розрахунків значень показників маси ($\Pi_{1п(к)cu(al)}^*$) і вартості ($\Pi_{2п(к)cu(al)}^*$) при значеннях $\lambda_{ве}$, $a_{ме}$, $\alpha_{се}$, що відповідають окремому критерію мінімуму втрат активної потужності, наведено в табл. 1–табл. 7. Розрахунки виконані при $K_{zc} = 0,97$ ($\delta_c = 0,35$ мм), $K_{зв} = 0,3–0,15$ і проектних діапазонних змінах КЗ $K_{pcu(al)}$ (6), (7)

Таблиця 1 – Мінімальні значення показника втрат планарної електромагнітної системи з прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	Екстремальні значення геометричних керованих змінних при величині K _{pcu(al)}									(Π _{3пcu(al)}) _e		
	3			8			24			K _{pcu(al)}		
	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	λ _{ве} , в.о.	a _{ме} , в.о.	α _{се} , град.	3	8	24
0,3	2,79	1,49	51,3	2,82	1,09	51,8	2,84	0,82	52,2	64,9	110,8	215,1
0,15	2,77	1,92	51	2,8	1,35	51,4	2,83	0,97	52,0	77,5	126,9	236,3

Таблиця 2 – Значення показників маси і вартості планарної електромагнітної системи з мідними обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	(Π _{1пcu}) _e			(Π _{2пcu}) _e					
	K _{pcu}			C _{ст} /C _{ст}					
	3	8	24	3,5			5,5		
	3	8	24	3	8	24	3	8	24
0,3	30,1	38,2	58,3	52,1	53,9	69,4	69,7	66,5	78,3
0,15	37,3	46,8	69,2	61,4	63,5	80,8	80,7	76,9	90,1

Таблиця 3 – Значення показників маси і вартості планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками та прямокутними утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	(Π [*] _{1nal})'						(Π [*] _{2nal}) ⁿ					
							C _{al} /C _{st}					
	3			4,7			3			4,7		
	K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}		
	3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24
0,3	24	33,9	55,2	29,3	37,7	57,9	33,9	40,9	60,2			
0,15	30,6	42,2	66	36,5	46,2	68,8	41,4	49,7	71,2			

Таблиця 4 – Мінімальні значення показника втрат планарної електромагнітної системи з круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	Екстремальні значення геометричних керованих змінних при величинах K _к і K _{pcu(al)}												(Π [*] _{3ncu(al)}) _ε					
	K _к												K _к					
	0,786						0,925						0,786			0,925		
	K _{pcu(al)}						K _{pcu(al)}						K _{pcu(al)}			K _{pcu(al)}		
	3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24			
λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	λ _{всв} , в.о.	α _{всв} , в.о.	3	8	24	3	8	24	
0,3	3,69	2,47	3,88	1,91	4,07	1,53	3,65	2,59	3,85	1,99	4,04	1,56	69,8	120,5	236,2	66,8	114,2	221,9
0,15	3,54	3,6	3,75	2,28	3,96	1,75	3,51	3,22	3,71	2,38	3,93	1,81	82,7	137	258,1	79,6	130,7	243,7

Таблиця 5 – Значення показників маси планарної електромагнітної системи з мідними і алюмінієвими обмотками та круговими утворюючими контурами при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	(Π _{1кcu})'						(Π _{1kal})'					
	K _к						K _к					
	0,786			0,925			0,786			0,925		
	K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}		
	3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24
0,3	32	40,9	62,9	30,9	39,3	60,1	25,3	36,1	59,4	24,6	34,8	56,9
0,15	39,4	49,6	74,1	38,2	48,1	71,3	32	44,5	70,5	31,3	43,3	68

Таблиця 6 – Значення показників вартості планарної електромагнітної системи з мідними обмотками при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	(Π _{2кcu}) ⁿ											
	C _{cu} /C _{st}											
	3,5						5,5					
	K _к						K _к					
	0,786			0,925			0,786			0,925		
K _{pcu}			K _{pcu}			K _{pcu}			K _{pcu}			
3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24	
0,3	56,3	58,3	75,3	53,7	55,6	71,6	75,6	72,6	85,2	71,85	68,5	80,8
0,15	65,8	68	86,9	63,1	65,3	83,3	86,9	82,8	97,2	83,1	79,1	92,8

Таблиця 7 – Значення показників вартості планарної електромагнітної системи з алюмінієвими обмотками при оптимізації геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат

K _{зв}	(Π _{2kal}) ⁿ											
	C _{al} /C _{st}											
	3						4,7					
	K _к						K _к					
	0,786			0,925			0,786			0,925		
K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}			K _{pal}			
3	8	24	3	8	24	3	8	24	3	8	24	
0,3	31,2	40,3	62,5	30,1	38,8	59,7	36,2	43,9	65	34,8	42,1	62,1
0,15	38,4	49	73,6	37,3	47,5	70,9	43,9	52,8	76,3	42,5	51	73,3

На основі наведених в роботі результатів розрахунків показана ідентичність проектних діапазонів змін відносних електромагнітних КЗ в ЕМС з мідними і алюмінієвими обмотками та встановлено підвищення енергетичних показників ТТ заданої електромагнітної потужності при заміні кругових УК з $K_k \leq 0,925$ на прямокутні УК. Також встановлено покращення масовартісних показників ЕМС з прямокутними УК відносно ЕМС з круговими УК при оптимізації ТТ за критерієм мінімуму втрат в реальному проектному діапазоні змін електромагнітної КЗ.

Висновки. Зниження екстремумів показників втрат активної потужності ТТ з прямокутними УК відносно електромагнітно еквівалентних аналогів з круговими УК при використанні в обмотках як міді, так і алюмінію, в проектному діапазоні змін величин і співвідношень ЕМН та в діапазоні напруг, що характеризується $K_{зв} = 0,3-0,15$, складають при $K_k = 0,786$ і $K_k = 0,925$ відповідно 6,3–8,9 % та 2,64–3 %.

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-VE). Перевод с английского Е. В. Мельниковой, редактор перевода В. С. Ионов // Энергосбережение. – 2003. – №6 – С. 14–15, 2004. – №1–С. 61–65.
2. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий. – Режим доступа : <http://www.transform.ru/articles/html/03.project/a000001.article>. – Дата звертання : 13.09.2017.
3. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М. : Альянс, 2013. – 528 с.
4. Кравченко А. Сухие энергосберегающие трансформаторы / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – Киев : Радиоаматор. – 2013. – №4. – С. 12–15.
5. Levin M. I. Анализ конструкций шихтованных магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов / М. I. Levin, И. В. Пентегов, С. В. Рымар, А. V. Lavreniuk // Электротехника і електромеханіка. – 2014. – №1. – С. 40–44.
6. Ставинський А. А. Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів шихтованих магнітопроводів (масовартісні показники) / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. М. Циганов, Р. А. Ставинський, О. С. Садовий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Зб. наук. праць – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 4 (1329). – С. 38–43.
7. Авдеева Е. А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) / Е. А. Авдеева // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 13–17.

8. Ставинський А. А. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и вольфрамовыми образующими контурами стержней планарных магнитопроводов / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, А. Н. Цыганов // Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2012. – №7(77). – С. 47–52.

References (transliterated)

1. Jenergosberezhenie v Evrope: primeneniye jenergoeffektivnykh transformatorov (perepechatano s sokrashheniyami iz izdaniya Evropejskogo instituta medi (Tema "V" sovmestnogo s Evropejskoj komissiej projekta №STR-1678-98-VE). Perevod s anglijskogo E. V. Mel'nikovoj, redaktor perevoda V. S. Ionov // Jenergosberezhenie. 2003, no. 6 pp. 14–15, 2004, no. 1, pp. 61–65.
2. Perspektivy i sostoyaniye razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh serij [Prospects and state of development of mass-market distribution transformers]. Available at : <http://www.transform.ru/articles/html/03.project/a000001.article> (accessed 13.09.2017)
3. Tihomirov P. M. Raschet transformatorov [Transformer Calculation]. Uchebnoye posobie dlya vuzov Moscow, A'l'yans, 2013, 528 p.
4. Kravchenko A., Metel'skij V. Suhie jenergosberegajushhie transformatory [Dry Energy Saving Transformers]. *Jelektrik. Mezhdunarodnyj jelektrotechnicheskij zhurnal*. Kiev. Radioamator. 2013, no. 4, pp. 12–15.
5. Levin M. I., Pentegov I. V., Rymar S. V., Lavreniuk A. V. Analiz konstrukcij shihtovannykh magnitoprovodov silovykh trehfaznykh transformatorov [Analysis of the structures of laminated magnetic circuits of power three-phase transformers]. *Elektrotexnika i elektromexanika*. 2014, no. 1, pp. 40–44.
6. Stavyn's'kyj A. A., Avdeyeva O. A., Cy'ganov O. M., Stavyn's'kyj R. A., Sadovyj O. S. Porivnyannya try'fazny'x transformatoriv z pryamokutny'my' i krugovy'my' konturamy'stry'zhniv shy'xtovany'x magnitoprovodiv (masovartisni pokazny'ky') [Comparison of three-phase transformers with rectangular and circular contours of the cores of charged magnetic circuits (mass indexes)]. *Visnyk NTU "XPI". Seriya: Elektry'chni mashyny' ta elektromexanichne peretvorenniya energiyi* : Zb. nauk. prac' Xarkiv: NTU "XPI". 2019, no.4 (1329), pp. 38 – 43.
7. Avdeeva E. A. Sravnitel'nyj analiz planarnoj i prostranstvennoj aksial'noj trehfaznykh jelektromagnitnykh sistem s parallel'nymi obrazujushhimi poverhnost'jami sterzhnej i obmotochnykh okon [Comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel generating surfaces of rods and winding windows (watt loss)]. *Elektrotexnika i elektromexanika*. 2012, no. 5, pp. 13–17.
8. Stavinskij A. A., Stavinskij R. A., Cyganov A. N. Sravnitel'nyj analiz poter' trehfaznykh transformatorov s krugovymi i vos'migrannymi obrazujushhimi konturami sterzhnej planarnykh magnitoprovodov [Comparative analysis of losses of three-phase transformers with circular and octagonal generators of the contours of the rods of planar magnetoplasty]. *Elektrotexnichni i komp'yuterni sy'stemy*. 2012, no. 7(77), pp. 47–52.

Надійшла (received) 18.02.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Порівняння трифазних трансформаторів з прямокутними і круговими контурами стрижнів шихтованих магнітопроводів (втрати активної потужності) / 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". – X. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 44–49. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Сравнение трехфазных трансформаторов с прямоугольными и круговыми контурами стержней шихтованных магнитопроводов (потери активной мощности) / А. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, А. Н. Цыганов, Р. А. Ставинский, А. С. Садовой // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 44–49. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Comparison of three-phase transformers with rectangular and circular conversion of laminated magnetic cores (active power losses) / 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. 44–49. – Bibliogr.: 8. – 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 Елена 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: potomkynske@gmail.com.

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