

УДОСКОНАЛЕННЯ ТРИФАЗНИХ РЕАКТОРІВ З ПЛАНАРНИМИ ШИХТОВАНИМИ МАГНІТОПРОВОДАМИ НА ОСНОВІ ШЕСТИГРАННИХ КОНТУРІВ СТРИЖНІВ**О. М. Циганов**Миколаївській національній аграрній університет
вул. Георгія Гонгадзе, 9, м. Миколаїв, 54020, Україна. E-mail:

Розглянуто конструктивно-технологічні особливості варіантів планарних електромагнітних систем трифазних реакторів з круговими і шестигранними утворюючими контурами стрижнів шихтованих стикових магнітопроводів і витків обмоткових котушок. Шестигранна конфігурація забезпечує повне заповнення електротехнічною сталлю утворюючих контурів стрижнів та підвищення електродинамічної стійкості обмоток. На основі методу інваріантних цільових функцій з безрозмірними оптимізаційними складовими і універсальними відносними керованими змінними розроблені математичні моделі масовартісних показників вказаних варіантів електромагнітних систем. Такі моделі надають можливість узагальненого структурно-параметричного синтезу та визначення характеристик індукційних статичних пристроїв. Отримано відносні числові значення показників технічного рівняння на основі яких показані можливості удосконалення реакторів при заміні традиційних кругових утворюючих контурів на шестигранні.

Ключові слова: трифазний реактор, магнітопровід, обмотка, круговий, шестигранний, контур, маса, вага, порівняння.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ РЕАКТОРОВ С ПЛАНАРНЫМИ ШИХТОВАННЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ НА ОСНОВЕ ШЕСТИГРАННЫХ КОНТУРОВ СТЕРЖНЕЙ**А. Н. Цыганов**Николаевский национальный аграрный университет
ул. Георгия Гонгадзе, 9, г. Николаев, 54020, Украина. E-mail:

Рассмотрены конструктивно-технологические особенности вариантов планарных электромагнитных систем трехфазных реакторов с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней шихтованных стиковых магнітопроводов и витков обмоточных катушек. Шестигранная конфигурация обеспечивает полное заполнение электротехнической сталью образующих контуров стержней и повышение электродинамической стойкости обмоток. На основе метода инвариантных целевых функций с безразмерными оптимизационными составляющими и универсальными относительными управляемыми переменными разработаны математические модели масоэкономных показателей указанных вариантов электромагнитных систем. Такие модели создают возможность обобщенного структурно-параметрического синтеза и определения характеристик индукционных статических устройств. Получены относительные числовые значения показателей технического уровня на основе которых показаны возможности совершенствования реакторов при замене традиционных круговых образующих контуров на шестигранные.

Ключевые слова: трехфазный реактор, магнітопровід, обмотка, круговой, шестигранний, контур, масса, стоимость, сравнение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Додатковим, однак важливим обладнанням трансформаторних підстанцій і розподільчих пристроїв є одно та трифазні реактори. Вказані апарати мають структури, що аналогічні трансформаторам, однак відрізняються стиковими конструкціями магнітопроводів. Конструктивні зазори між стиками і площі перерізів стрижнів визначають індуктивності і реактивні потужності реакторів [1].

Електромагнітні системи (ЕМС) трансформаторів і реакторів потужністю більше 16 кВ·А (кВ·Ар) виконуються з круговими утворюючими контурами (УК) стрижнів і обмоткових котушок та східчастими перерізами елементів шихтованих магнітопроводів, що при наявності стикових зазорів є технічно і технологічно невиправданим в зв'язку з наявністю інноваційних рішень [2–5].

Підвищення вимог до енергоресурсозбереження та надійності електропостачання вимагає рішення задач подальшого вдосконалення процесів виробництва, розподілення та перетворення електроенергії, і відповідно підвищення показників технічного рівня (ПТР) індукційних статичних пристроїв (ІСП) [5, 6]. Таке вдосконалення можливе зокрема впровадженням нетрадиційних технічних рішень ЕМС з їх структурною та па-

раметричною оптимізацією [2, 3]. Також важливим є порівняння ПТР ІСП при використанні як мідних так і алюмінієвих обмоткових провідників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ЕМС (рис. 1, а) кругові УК (рис. 1, б) забезпечують мінімальну середню довжину витків обмоток. При цьому заповнення УК стрижнів магнітопроводу електротехнічною сталлю (ЕТС) неповне і характеризується коефіцієнтом $K_c=0,786-0,925$ в діапазоні потужностей від 16 до 10000 кВ·А (кВ·Ар) відповідно при розміщенні в половині поперечного перерізу 3-11 шихтованих пакетів. Крім цього технологія виготовлення стрижнів і ярем (рис. 1, б, с) вказаного магнітопроводу ускладнена заготовкою різномірних пакетів ЕТС та їх складанням з утворенням східчастого перерізу. Також відомим недоліком [4, 7] ЕМС з вказаними магнітопроводами є наявність внутрішніх залишкових механічних напружень кільцевого вигину по всій довжині кожного витка, що утворюються при намотуванні обмоткових котушок. Такі напруження при складанні з напруженнями від електромагнітних сил короткого замикання суттєво впливають на електродинамічну стійкість і надійність обмоток [7].

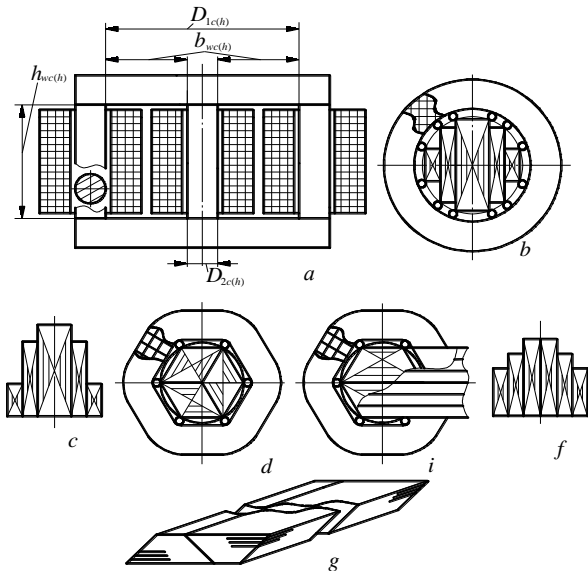


Рисунок – 1 Повздовжній переріз планарної стикової електромагнітної системи (а) і варіанти конфігурацій перерізів стрижнів і ярем, що відповідають круговим, і шестигранними (b-f) утворюючими контурами та заготовка елементів магнітопроводу (g)

Витки обмоткової котушки з круговим УК не мають безпосереднього жорсткого зв'язку із стрижнем, їх радіальному переміщенню протидіють тільки прошивні рейки, що призначені для дистанціонування провідників певного шару. Тому в ЕМС (рис. 1, а) з стрижнями магнітопроводу перерізу (рис. 1, b), електромагнітні коливальні сили, що діють на витки в радіально-тангенціальних напрямках, не сприймаються у повній мірі жорстким остовом, що є причиною аварійного руйнування обмотки [7].

Виробництво трифазних ІСП з шестигранними УК ЕМС (рис. 1, d-i) уявляється перспективним за рахунок повного заповнення УК стрижнів при використанні одностипних пакетів з ідентичних пластин ЕТС (рис. 1, d). Також можливо використання структур стрижнів і ярем (рис. 1, i, f), які забезпечуються механічним розділенням під кутом пакетів з одностипних листів ЕТС, що складені із суміщенням кожного наступного листа до утворення паралелепіпеду (рис. 1, g). При застосуванні автоматизованого обладнання, частини ярем (рис. 1, i) з пластин різної довжини формуються розділом стрічки (рулону) ЕТС з малою подачею. Подібні рішення дозволяють в повній мірі використовувати площу УК стрижня та зменшити масу і вартість елементів ЕМС. Також перевагою шестигранного УК стрижня є відсутність механічних напруг вигину на прямих ділянках витків. Такі напруги концентруються на вершинах граней, де підсилюється ізоляція та встановлюються опорні рейки. Вказані особливості конструкції підвищують надійність ІСП та стійкість при дії електродинамічних сил короткого замикання [3].

Аналітичного дослідження впливу на характеристики ІСП з стрижневим планарним шихтованим магнітопроводом заміни кругових УК ЕМС на шестигранні до цього часу не виконано. Тому порівняння основних ПТР ІСП з круговими і шестигранними УК та мідними і алюмінієвими обмотками є доцільним і актуальним.

Мета дослідження. Порівняльний аналіз головних ПТР (маса, вартість) трифазних реакторів з планарними шихтованими стиковими магнітопроводами, що відрізняються традиційними круговими і нетрадиційними шестигранними УК при використанні мідних та алюмінієвих обмоток.

В відомих математичних моделях традиційних ЕМС [1, 8–10] застосовуються розуніфіковані оптимізаційні цільові функції (ЦФ) з індивідуальними керуваннями змінними (КЗ). Це унеможливило застосування їх для проведення узагальненого аналітичного зіставлення ЕМС з круговими, прямокутними та нетрадиційними, зокрема шестигранними УК. Умовам такого аналізу відповідає метод [2, 3] інваріантних оптимізаційних ЦФ ЕМС ІСП. Такі ЦФ мають загальний вид

$$F_{ic(h)cu(al)} = \left(\sqrt[4]{I_R}\right)^3 K_i I_{ic(h)cu(al)}^*, \quad (1)$$

де I_R – показник вихідних даних технічного завдання проектування і електромагнітних навантажень ІСП; K_i – складова питомих показників використаної ЕТС, що відповідає i – показнику; $I_{ic(h)cu(al)}^*$ – показник (маси, $i=1$; вартості, $i=2$), тобто оптимізаційна безрозмірна складова цільової функції ЕМС відповідно з круговими (шестигранними) УК та мідними (алюмінієвими) обмотками.

Оптимізаційна складова ЦФ (1) залежить від коефіцієнта заповнення обмоткового вікна провідниковим матеріалом K_w , а також універсальних для будь якої ЕМС двох основних та третьої додаткової (для деяких ЕМС) відносних геометричних КЗ $a_c, \lambda_w, t(\alpha_c)$ [2, 3]

$$I_{ic(h)cu(al)}^* = f(K_w, a_c, \lambda_w, t(\alpha_c)), \quad (2)$$

де a_c – відношення розмірів діаметрів $D_{1c(h)}$ і $D_{2c(h)}$ (рис. 1, а) розрахункових окружностей магнітопроводу; λ_w – відношення розмірів боків поздовжнього перерізу обмоткового вікна $h_{wc(h)}$ та $b_{wc(h)}$; $t(\alpha_c)$ – керування змінна відносною тригонометричної функції центрального кута стрижня (в математичних моделях ЕМС зі стрижнями по рис. 1, b, d, i відсутня):

$$a_c = D_{1c(h)} / D_{2c(h)}; \lambda_w = h_{wc(h)} / b_{wc(h)}. \quad (3)$$

Мінімальні значення сукупності складових $(I_{ic(h)cu(al)}^*)_e$ ЦФ (1) є ПТР ІСП.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. При порівнянні варіантів ЕМС з елементами (рис. 1, b-f) магнітопроводів, що мають кругові і шестигранні УК, приймаються однаковими електромагнітні потужності, електромагнітні навантаження, величини K_w (класу напруги), коефіцієнти заповнення магнітопроводу ЕТС K_β та середні значення амплітуд індукцій в стрижнях і ярмах. При розрахунку вартості враховується реальне співвідношення цін алюмінієвих і мідних провідників ($\approx 0,85$). Також прийняті реальні співвідношення цін провідників C_{al}, C_{cu} до ціни ЕТС C_{st} в діапазонах $(C_{al}/C_{st}=3-4,7; C_{cu}/C_{st}=3,5-5,3)$.

ЦФ маси (вартості) виду (1) варіантів ЕМС (рис. 1, а) є підсумками мас $m_{m(w)c(h)cu(al)}$ і вартостей $C_{m(w)c(h)cu(al)}$ магнітопроводів (обмоток) і мають вид:

$$m_{c(h)cu(al)} = m_{mc(h)cu(al)} + m_{wc(h)cu(al)} = \gamma_{st} (I_R)^{3/4} I_{1c(h)cu(al)}^*;$$

$$C_{mc(h)cu(al)} = C_{mc(h)cu(al)} + C_{wc(h)cu(al)} =$$

$$= C_{st} \gamma_{st} (I_R)^{3/4} I_{2c(h)cu(al)}^*;$$

де залежні від керованих змінних (3) оптимізаційні складові (2) визначаються рівняннями:

$$I_{1ccu(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{fs} K_c K_w \lambda_w (a_c - 1)^2}} \right)^3 \{0,7854 K_{fs} K_c \times [(a_c - 1)(2 + 1,5\lambda_w) + 6,2146] + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) \times 1,178 K_{fs} \lambda_w (a_c - 1)^2 [1 + (a_c - 1)/4]\}; \quad (4)$$

$$I_{2ccu(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{fs} K_c K_w \lambda_w (a_c - 1)^2}} \right)^3 \{0,7854 K_c K_w \times [(a_c - 1)(2 + 1,5\lambda_w) + 6,2146] + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) \times 1,178 K_w \lambda_w (a_c - 1)^2 [1 + (a_c - 1)/4] \times (C_{cu(al)} / C_{st})\}; \quad (5)$$

$$I_{1hcu(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{fs} K_c K_w \lambda_w (a_c - 1)^2}} \right)^3 \{K_w K_c \times \left[\frac{6\sqrt{3}}{8} (a_c - 1) + \frac{9\sqrt{3}}{16} (a_c - 1) \lambda_w + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] +$$

$$+ (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) \times K_w \lambda_w 1,5 \frac{1}{4} (a_c - 1)^2 \left[3 + \frac{\pi}{8} (a_c - 1) \right]\}; \quad (6)$$

$$I_{2hcu(al)}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{32}{3\sqrt{3} K_{fs} K_c K_w \lambda_w (a_c - 1)^2}} \right)^3 \{K_w K_c \times \left[\frac{6\sqrt{3}}{8} (a_c - 1) + \frac{9\sqrt{3}}{16} (a_c - 1) \lambda_w + 2,2893 + \frac{6\sqrt{3}}{8} \right] + (\gamma_{cu(al)} / \gamma_{st}) K_w \lambda_w 1,5 \frac{1}{4} (a_c - 1)^2 \times \left[3 + \frac{\pi}{8} (a_c - 1) \right] (C_{cu(al)} / C_{st})\}; \quad (7)$$

Результати оптимізаційних розрахунків по рівняннях (4)–(7) екстремумів показників маси ($I_{1c(h)cu(al)}^*$ і показників вартості ($I_{2c(h)cu(al)}^*$) та екстремумів показників вартості ($I_{2c(h)cu(al)}^*$) і показників маси ($I_{1c(h)cu(al)}^*$) при значеннях КЗ (λ_{we} , a_{ce}), що відповідають критеріям відповідно мінімумів маси і вартості, наведено в табл. 1–8. Розрахунки виконано при $K_{fs}=0,97$, $K_w=0,3$ і $K_w=0,15$ (класи напруги 1 і 110 кВ) та вказаних вище значеннях $C_{al(cu)}/C_{st}$ і K_c .

Таблиця 1 – 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_w	Екстремальні значення керованих змінних				$(I_{1ccu}^*)_e$		$(I_{2ccu}^*)'$				
	K_c						K_c				
	0,786		0,925				0,786		0,925		
	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	K_c		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 2 – 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_w	Екстремальні значення керованих змінних				$(I_{1cal}^*)_e$		$(I_{2cal}^*)'$				
	K_c						K_c				
	0,786		0,925				0,786		0,925		
	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	K_c		C_{al}/C_{st}		C_{al}/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 3 – 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_w	Екстремальні значення керованих змінних										$(I_{2ccu}^*)_e$				$(I_{1ccu}^*)'$			
	K_c																	
	0,786					0,925					K_c				K_c			
	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_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.
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 4 – 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_w	Екстремальні значення керованих змінних								$(I_{2cal}^*)_e$				$(I_{1cal}^*)'$				
	K_c								K_c				K_c				
	0,786				0,925				0,786		0,925		0,786		0,925		
	C_{al}/C_{st}				C_{al}/C_{st}				C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		
	3		4,7		3		4,7		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}		
λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , 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	

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

K_w	Екстремальні значення керованих змінних		$(I_{1hcu}^*)_e$	$(I_{2hcu}^*)'$	
	K_c			K_c	
	1			1	
	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	K_c	C_{cu}/C_{st}	
			1	3,5	5,5
0,3	2,73	4,06	25,47	56,11	80,63
0,15	2,72	5,32	31,15	65,34	92,69

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

K_w	Екстремальні значення керованих змінних		$(I_{1hal}^*)_e$	$(I_{2hal}^*)'$	
	K_c			K_c	
	1			1	
	λ_{we} , В.О.	a_{ce} , В.О.	K_c	C_{cu}/C_{st}	
			1	3	4,7
0,3	2,71	6,55	14,95	27,22	37,65
0,15	2,70	8,84	19,16	32,76	47,29

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

K_w	Екстремальні значення керованих змінних				$(I_{2ccu})_e$		$(I_{1ccu}^*)'$	
	K_c				K_c		K_c	
	1				1		1	
	C_{cu}/C_{st}				C_{cu}/C_{st}		C_{cu}/C_{st}	
	3,5		5,5		C_{cu}/C_{st}		C_{cu}/C_{st}	
λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	λ_{wce} , В.О.	a_{ce} , В.О.	3,5	5,5	3,5	5,5	
0,3	2,75	2,64	2,75	2,31	48,86	63,26	29,38	33,02
0,15	2,74	3,32	2,74	2,85	56,63	71,95	35,72	39,94

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

K_w	Екстремальні значення керованих змінних				$(I_{2cal}^*)_e$		$(I_{1cal}^*)'$	
	K_c							
	1				K_c		K_c	
	C_{al}/C_{st}				1		1	
	3		4,7		C_{al}/C_{st}		C_{al}/C_{st}	
	λ_{wep} В.О.	a_{cep} В.О.	λ_{wep} В.О.	a_{cep} В.О.	3	4,7	3	4,7
0,3	2,73	4,21	2,73	3,57	24,30	30,26	16,61	18,29
0,15	2,72	5,54	2,73	4,63	29,839	36,46	21,23	23,25

На основі розрахункових значень (табл. 1–8) можна стверджувати, що виготовлення трифазних ІСП з шестигранными УК (рис. 1, *d, i*) ЕМС (рис. 1, *a*) покращує масовартісні показники в порівнянні з електромагнітно-еквівалентними варіантами з круговими УК (рис. 1, *b*) та крім того, дозволяє суттєво знизити трудомісткість виробництва магнітопроводів.

ВИСНОВКИ. Трифазні ЕМС з планарними стрижневими магнітопроводами і шестигранными УК відрізняються від аналогів з круговими УК покращеними значеннями мінімальних показників маси і вартості відповідно на 13,7%–14,2% і 12,4%–13,1% при $K_c = 0,786$ та 10,6%–11,8% і 8,1% – 9,5% при $K_c = 0,925$ в варіантах з мідними обмотками. При використанні алюмінієвих обмоток такі показники також покращуються на 14,6%–15,2% і 13,8%–14,6% при $K_c = 0,786$ та 12,6%–13,7% і 10,9%–11,9% при $K_c = 0,925$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лизунов С. Д., Лоханин А. К. Силовые трансформаторы: Справочная книга: под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
2. Ставинский А. А., Ставинский Р. А. Плахтырь О. О., Цыганов А. Н. Направления усовершенствования индукционных статических устройств на основе электромагнитных систем с многоплоскостными образующими поверхностями и метод их структурной оптимизации. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* Харків, НТУ "ХПИ". 2008. № 40. С. 115–124.
3. Ставинский Р. А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств. *Віс-*

ник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2010. Вип. 4 (63) ч. 2. С. 91–4.

4. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) *Електротехніка и електромеханіка.* 2011. № 5. С. 43 – 47.

5. Stavinsky A., Plarhtyr O., Tsyganov A., Stavinsky R. Possibilities of improving the transformers and reactors on the basis of multiple counters of the rods *IEEE «International Conference on modern electrical and energy systems»:* 2017. Pp. 176–179.

6. Загирняк М. В., Прус В. В., Невзлин Б. И. Оценка трансформаторов и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера. *Електротехніка і електромеханіка.* 2012. № 4. С. 36–40.

7. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов. *Техническая электродинамика.* 2005. Вып. 1. С. 53–60.

8. Amoiraliz E. I. Georgilakis P. S. Methodology for the optimum dising of power transformers using minimum number of input parameters. *ICEM.* 2006. No. 470. Pp. 1–6.

9. Khatri A., Rahi O. P. Optimal design of transformer: A Compressive bibliographical survey *International Journal of scientific Engineering Technology.* 2012. April. Pp. 159–167.

10. Amadi – Echendu J. E., Mafutsana J. M. A bibliographic review of trends in design and management of electrical power transmission transformers. *Proceedings of the 2016 International conference on Industrial Engineering and Operations Management.* Cuala Lumpur. Malaysia. Mach 8 – 10. 2016. Pp. 2010–2018.

IMPROVEMENT OF THREE PHASE REACTORS WITH PLANAR MIXED MAGNETIC WIRES BASED ON HEXAGONAL BOUND CIRCUITS

A. Tsyganov

Mykolayiv National Agrarian University
vul. Heorhiia Honhadze, 9, Mykolaiiv, 54020, Ukraine. E-mail:

Purpose. Planar rod magnetic cores are considered the basis in the production of the electromagnetic systems for the most of three-phase reactors. Such magnetic cores, as well as magnetic cores of transformers, at capacities above 16 (kV·Ar) kV·A

are made with circular generatrix circuits of the rods and winding coils. In circular circuits in the power range of 16...10,000 kV·A, respectively, 6 – 22 burnt packages of rectangular plates of electrical steel of various widths are installed. Moreover, the filling of such circuits with steel, depending on the power, is characterized by the coefficients $K_c=0,786 - 0,925$. Improving the manufacturability of reactors magnetic cores is achieved by using instead of the circular contours of the hexagonal cross-sections of the rods. Also, hexagonal configurations provide almost complete filling of the section of the rods with steel. Therefore, comparing the optimized values of the mass-value indices of three-phase electromagnetic systems with circular and hexagonal generatrix circuits is of theoretical and practical interest. **Methodology.** Well-known optimization techniques for transformers and reactors use unified target functions. Controlled variables that are individual for specific structures are used and it is difficult to solve the problems of comparison and structural synthesis of electromagnetic systems. Therefore, to compare reactor options, a new method of invariant target functions of structural-parametric synthesis with dimensionless optimization components and universal relative controlled variables was used. **Results.** The possibility to reduce the complexity of production, mass, cost for increasing the reliability of three-phase reactors is shown. **Originality.** Hexagonal forming circuits allow making magnetic core rods from identical rectangular plates. On the straight sections of the turns of the windings with hexagonal generatrix circuits, mechanical stresses arising during the curvilinear winding of the turns of the winding are excluded. The complexity of production is reduced and the electro-dynamic stability of reactors is increased. **Practical value.** Three-phase electromagnetic systems of reactors with planar core magnetic circuits and hexagonal generating circuits differ from analogues with circular generating circuits in terms of improved values of the minimum mass and cost indices by 13.7% - 14.2% and 12.4% - 13.1%, respectively $K_c=0,786$ and 10,6% – 11,8% and 8,1% – 9,5% при $K_c=0,925$ in versions with copper windings. When using aluminum windings, such indicators also improve by 14,6% – 15,2% and 13,8% – 14,6% at $K_c=0,786$ and 12,6% – 12,7% and 10,9% – 11,9% at $K_c=0,925$. References 6, tables 8, figures 1.

Key words: three-phase reactor, magnetic circuit, winding, circular, hexagonal, circuit, mass, cost, comparison.

REFERENCES

1. Lizunov, S. D., Lohanin, A. K. (2004), *Silovye transformatory: Spravochnaya kniga [Power Transformers: Reference Book]* Moscow: Energoatomizdat, 616 p.
2. Stavinskij, A. A., Stavinskij, R. A. Plahtyr, O. O., Cyganov, A. N. (2008), "Napravleniya usovershenstvovaniya indukcionnyh staticheskikh ustrojstv na osnove elektromagnitnyh sistem s mnogoploskostnymi obrazuyushimi poverhnostyami i metod ih strukturnoj optimizacii" [Directions for improving induction static devices based on electromagnetic systems with multi-plane forming surfaces and a method for their structural optimization], *Bulletin of the National Technical University "KPI". Collection of scientific works. Thematic issue: Problems of improvement of electrical machines and apparatus. Theory and Practice*, Kharkiv, NTU "KPI". no. 40. pp. 115–124.
3. Stavinskij, R. A. (2010), "Netradicionnye tehnicheckie resheniya, postanovka zadachi i metod strukturnoj optimizacii indukcionnyh staticheskikh ustrojstv" [Unconventional technical solutions, problem statement and method of structural optimization of induction static devices], *KSU Bulletin Kremenuchug*, Vol. 4 (63), Part 2, pp. 91-94.
4. Stavinskij, A. A. (2011), "Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov elektromagnitnyh sistem (elektrodinamicheskaya ustojchivost i sistemy so stykovymi magnitoprovodami)" [Genesis of structures and prerequisites for improving transformers and reactors by converting the contours of electromagnetic systems (electrodynamic stability and systems with butt magnetic circuits)], *Electrical engineering and electromechanics*, no. 5. pp. 43–47.
5. Stavinsky, A., Plarhtyr, O., Tsyganov, A., Stavinsky, R.. (2017), "Possibilities of improving the transformers and reactors on the basis of multiple counters of the rods", *IEEE «International Conference on modern electrical and energy systems»*, pp. 176–179.
6. Zagirnyak, M. V., Prus, V. V., Nevzlin, B. I. (2012), "Ocenka transformatorov i ih serij s ispolzovaniem funkcionalnyh zavisimostej parametrov ot obobshennogo linejnogo razmera" [Evaluation of transformers and their series using the functional dependencies of the parameters on the generalized linear size], *Electrical engineering and electromechanics*, no.4, pp. 36–40.
7. Lazarev, V. I. (2005), "Obobshenie rezultatov issledovaniy po probleme elektrodinamicheskoy stojkosti silovyh transformatorov" [Generalization of research results on the problem of electrodynamic resistance of power transformers], *Technical electrodynamics*, Vyp. 1. pp. 53–60.
8. Amoiraliz, E. I., Georgilakis, P. S. (2006), "Methodology for the optimum dishing of power transformers using minimum number of input parameters", *ICEM*, no. 470. pp. 1–6.
9. Khatri, A., Rahi, O. P. (2012), "Optimal design of transformer: A Compressive bibliographical survey", *International Journal of scientific Engineering Technology*, April, pp. 159–167.
10. Amadi-Echendu, J. E., Mafutsana, J. M. (2016), "A bibliographic review of trends in design and management of electrical power transmission transformers", *Proceedings of the 2016 International conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Cuala Lumpur, Malaysia, Mach 8–10. pp. 2010–2018.

Стаття надійшла 22.12.2019.