

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТРИФАЗНОГО ГРУПОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
ЖИВЛЕННЯ ВБУДОВАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА
ЗАНУРЕНОГО НАСОСУ**

Наведено спосіб удосконалення трифазних групових трансформаторів для живлення електроприводу заглибних насосів. Удосконалення здійснюється за рахунок заміни тороїдної на радіальну електромагнітну систему. Отримано результати чисельного оптимізаційного порівняльного аналізу показників технічного рівня однофазних електромагнітних статичних пристроїв. Заміна електромагнітної системи покращує характеристики трансформаторів, що позитивно впливає в цілому на систему електропостачання заглибних відцентрових насосів.

Ключові слова: *груповий трансформатор, відцентровий насос, однофазні електромагнітні статичні пристрої, електромагнітна система, цільова функція, керовані змінні.*

Садовой А.С. Усовершенствование трёхфазного группового трансформатора питания встроенного электродвигателя погружного насоса. Указана возможность усовершенствования системы электроснабжения электропривода погружных насосов. Модернизация осуществляется за счет замены конструкции однофазных тороидальных трансформаторов, из которых состоит групповой трансформатор, на пространственные однофазные трансформаторы с радиальной электромагнитной системой. Радиальная электромагнитная система характеризуется удобством встраивания в оболочки ограниченного диаметра, меньшей средней длиной витка, а также отсутствием недостатков укладки обмотки. Основной задачей является определение и сравнительный анализ показателей технического уровня вариантов пространственных витых электромагнитных систем. Для решения поставленной задачи используется метод оптимизации целевой функции, которая содержит безразмерные показатели технического условия, а также относительные геометрические управляемые переменные. Экстремум относительных составляющих целевой функции является функцией обмоточного окна токопроводящим материалом обмотки и трех универсальных идентичных геометрических управляемых переменных, которые применяются для любых из существующих вариантов электромагнитных систем. В соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности применяются, соответственно, одинаковые используемые материалы, средние значения амплитуд индукции магнитного потока в стержнях и ярмах, коэффициент заполнения магнитопровода сталью, а также исполнение и способы охлаждения электромагнитных статических устройств. Результаты сравнительного анализа показателей технического уровня (минимумы массы, стоимости активных материалов и потерь активной мощности) показали, что конструкция витой радиальной электромагнитной системы с прямоугольным сечением стержней обеспечивает в среднем значительное снижение массы, стоимости и потерь, относительно эквивалентного аналога с тороидальной электромагнитной системой.

Ключевые слова: *груповий трансформатор, центробежний насос, однофазні електромагнітні статическіе устройства, електромагнітна система, цільова функція, управляеміе переменніе.*

* канд. техн. наук, старший викладач, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, sadovuyos@mnaui.edu.ua

O.S. Sadoviy. Improvement of three-phase group transformers for powering the electric drive of submersible centrifugal pumps and comparison of their technical level indicators. The possibility of improving the power supply system of the electric drive of submersible pumps is indicated. The modernization is carried out by replacing the design of single-phase toroidal transformers composed into the group transformer, with spatial single-phase transformers with a radial electromagnetic system. The radial electromagnetic system is characterized by the convenience of embedding into shells of a limited diameter, by a shorter average turn length, and the absence of winding laying disadvantages. The main task is to determine and to analyze the technical level indicators for spatial twisted electromagnetic systems options. The objective function optimization method is used to solve the problem. The objective function contains technical condition dimensionless indicators as well as relative geometric controlled variables. The extremum of the objective function relative components is a function of the winding window, the conductive material of the winding and three universal identical geometric controlled variables which can be used for any of the existing electromagnetic systems variants. In accordance with the principle of electromagnetic equivalence, the same materials, the average values of the amplitudes of the magnetic flux induction in the rods and yokes, the filling factor of the magnetic circuit with steel, as well as cooling methods of the induction static devices are respectively used. The results of the comparative analysis of the technical level indicators (mass, active materials cost and active power losses) showed that the design of a twisted radial electromagnetic system with a rectangular cross-section of rods provides a significant reduction in mass, cost and losses, as compared to an equivalent analogue with a toroidal electromagnetic system.

Keywords: group transformer, centrifugal pump, single-phase electromagnetic static devices, electromagnetic system, objective function, controlled variables.

Постановка проблеми. Елементами сучасного електротехнічного обладнання є однофазні електромагнітні статичні пристрої (ЕСП). Трансформатори та реактори малої потужності значно впливають на масу, габаритні розміри, температурні режими, а також вартість всього електротехнічного [1-3]. На сьогодні існує лише декілька способів підвищення коефіцієнта корисної дії ЕСП. I спосіб – зниження електромагнітних навантажень; II спосіб – використання витих магнітопроводів з аморфної електротехнічної сталі [1, 2]. При зниженні електромагнітної індукції і густини струму відповідно знижуються втрати при неробочому русі і короткому замиканні, але при цьому вартість і габаритні розміри ЕСП значно і непропорційно збільшуються. При II способі зменшують електромагнітну індукцію у магнітопроводі до 1,28...1,35 Тл, але матеріаломісткість ЕСП при цьому збільшується на 15...20% [3, 4]. Дані способи не задовольняють умовам зниження масо-габаритних характеристик, вартості активних матеріалів ЕСП. Тому дані способи так і не знайшли широкого використання в промисловості. Альтернативою зазначеним способам є спосіб структурного перетворення електромагнітних систем (ЕМС) одно- та трифазних трансформаторів і реакторів. Даний спосіб полягає у пошуку нових структур ЕМС, що дають можливість енергоресурсозбереження, зниження займаного корисного об'єму.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних розробках в області автоматизації технологічних процесів, систем контролю захисту електрообладнання, приладобудуванні, радіоелектроніки, електричних системах і комплексах, системах енергозбереження, а також підводно (підземно)-технологічного та авіакосмічного призначення одним із габаритних і матеріаломістких елементів сучасного електротехнічного обладнання є однофазні трансформатори і реактори [5-8]. Найчастіше в ЕСП використовуються традиційні конструкторські рішення, наприклад, планарні (стрижнева, броньова) та просторова (тороїдна) ЕМС з прямокутними утворюючими контурами, що мають ряд недоліків [9-11].

В апаратах і комплексах підводного пошукового та підводно-технічного призначень, а також у суднових занурювальних апаратах і елементах авіакосмічного обладнання, містяться міцні сферичні або циліндричні трубчасті оболонки, в які вбудовано обладнання.

У циліндричні трубчасті оболонки обмеженого діаметра встановлені трифазні групи з трьох тороїдних однофазних трансформаторів (ОТ) [5, 8, 12]. Трифазні групи з понижувальни-

ми тороїдними ОТ вбудовані спільно з електродвигунами обмеженого діаметра у кільцеві трубчасті елементи, які є важливими складовими систем електроприводу свердловинних насосів і бурового обладнання (рис. 1). Відповідно до [13], у насосах видобутку нафти, а також електричних бурах, використовуються асинхронні двигуни з малими діаметрами і підвищеними довжинами десяти типорозмірів ПЕД 20...ПЕД 125 потужністю 20...125 кВт з різними робочими напругами від 700 до 2000 В.

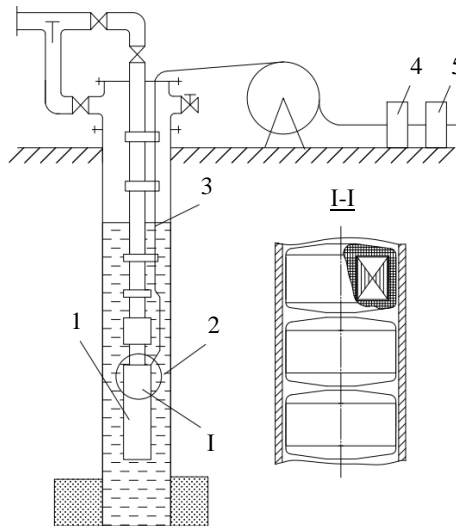


Рис. 1 – Принципова схема обладнання занурювального відцентрового електронасоса: 1 – блок понижувального групового трансформатора та електродвигуна; 2 – експлуатаційна колона; 3 – електричний кабель; 4 – станція управління; 5 – підвищувальний трифазний трансформатор

У процесі електропостачання установки, двигуни отримують живлення по кабельній лінії з перетворенням напруги мережі у кінці лінії до номінальних параметрів за допомогою трифазного групового трансформатора. Втрати напруги при передачі енергії до зануреного електро-механічного блоку у залежності від номінальної напруги та потужності ПЕД складають від 16...55 В [5, 8, 12, 13].

Тороїдні трансформатори, які входять до складу групових трансформаторів, мають ряд особливостей, таких як нещільне укладання виткових провідників на торцевих поверхнях кільцевого магнітопроводу (рис. 2, а). Наявність порожнин між витками обмоток пов'язана з різним зовнішнім та внутрішнім контурами магнітопроводу та враховується при розрахунках ЕСП збільшенням на 8...15% значень коефіцієнтів укладання обмотки [9, 10, 13]. Нещільності укладки і зміщення на кут протилежних торцевих частин підвищують середню довжину витка, втрати і матеріаломісткість обмотки. Крім того, погіршення тепловідводу, що викликано ділянками полого простору і малим радіусом вигину 90° кутових зон внутрішніх витків, знижують надійність тороїдних ЕМС (рис. 2, а).

До наведеного вище слід додати, що традиційні тороїдні ЕМС із суцільними магнітопроводами з електротехнічної сталі (ЕТС) або магнітодіелектрика більшості ЕСП для виробів приладобудування і радіоелектронної промисловості мають центральний технологічний отвір. Такий отвір забезпечує вмотування обмотки «човниковим» верстатом [5] і значно знижує заповнення внутрішнього контуру активним матеріалом обмотки. Це призводить до погіршення показників технічного рівня (ПТР) тороїдних ЕСП.

Відповідно до евристичного напрямку удосконалення електричних машин і апаратів [14] запропонована нетрадиційна тристрижнева просторова радіальна структура [15] ЕМС одно- та трифазних ЕСП (рис. 2, б), яка є аналогом формоутворення наведених вище тороїдних ЕМС.

Мета роботи – визначення, підвищення і зіставлення показників технічного рівня (ПТР) варіантів ЕМСОТ і реакторів з тороїдним і радіальним магнітопроводами для встановлення їх у циліндричні трубчасті оболонки обмеженого діаметра.

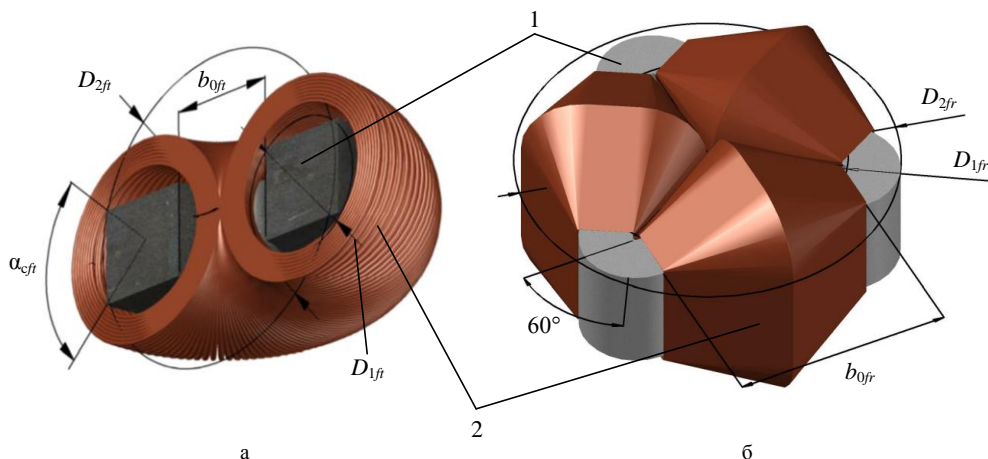


Рис. 2 – Конструктивні схеми електромагнітних систем з складовими виразів керуючих змінних тороїдної (а), просторової радіальної трьох стрижневої (б): 1 – магнітопровід; 2 – обмотка

Виклад основного матеріалу. Тристрижнева ЕМС (рис. 2, б) з прямокутним перерізом магнітопроводу при певній величині заокруглення кутів внутрішнього трикутного контуру може мати мінімальний діаметр описаного кола і є альтернативою застосуванню тороїдних ЕМС (рис. 2, а) у блоках обладнання виду (рис. 1). Обмотувальні котушки тристрижневої ЕМС (рис. 2, б) позбавлені зазначених недоліків нещільності укладання та підвищення середньої довжини витків тороїдного намотування (рис. 2, а) і виконується аналогічно котушок планарних ЕМС. Використання трьох котушок (секцій) замість однієї або двох надає можливість зменшення середньої довжини витка обмотки і покращення основних ПТР ЕМС у порівнянні з традиційними аналогами.

Для встановлення обмотувальних котушок на розташовані під кутами 60° три стрижня магнітопроводу ЕМС (рис. 2, б), який містить заокруглення вершин граней внутрішніх контурів, повинен мати у кутових зонах три стики, що підвищує струм намагнічування. Для зменшення впливу стиків і підвищення потужності ЕСП магнітопровід ЕМС (рис. 2, б) по довжині ділиться на окремі частини. У кожній парі одна частина повертається відносно іншої на 180°, при цьому стики зсуваються на кут 60° [9, 10, 13]. Таким чином, забезпечується відхилення силових ліній поля в суміжні частини магнітопроводу і зменшується магнітний опір стиків. Також для зниження магнітного опору застосовуються косі стики розрізанням магнітопроводу у площинах граней внутрішнього контуру.

Визначення кращої конструкції ЕСП для спеціального та загальнопромислового обладнання можливо при узагальненому структурному синтезі варіантів ЕМС однофазних трансформаторів [16]. Числове порівняння ЕСП можливо на основі розробки математичних моделей (ММ), які відповідають умовам інваріантності і електромагнітної еквівалентності [16-18]. Побудова ММ ЕСП для числового порівняння можлива з єдиних позицій, при використанні універсальних керованих змінних (КЗ). Таким умовам відповідає метод математичних моделей з цільовими функціями, які включають безрозмірні оптимізаційні складові з універсальними відносними геометричними і електромагнітною КЗ [18].

$$F_{\sigma_{т(оп)}} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\sigma_{т(оп)}}} \right)^3 K_{кij} \Pi_{кij}^* \tag{1}$$

де $\Pi_{\sigma_{т(оп)}}$ – показник вихідних даних технічного завдання на проектування і електромагнітні навантаження (ЕМН) ОТ з ij -варіантом ЕМС (i – тип конструкції, j – форма перерізу магнітопроводу); $K_{кij}$ – складова питомих показників використаних активних матеріалів; $\Pi_{кij}$ – безрозмірна оптимізаційна складова, яку характеризує $i \geq 3$ цільової функції (ЦФ) ij -й ЕМС, в яких головними складовими є складові: маси Π_{1ij} ($k = 1$), вартості Π_{2ij} ($k = 2$) і втрат активної потужності Π_{3ij} ($i = 3$).

Екстремуми (мінімуми) безрозмірних складових (1) є ПТР ЕСП. При їх визначенні використовується сукупність відносних (безрозмірних) основних і додаткових геометричних КЗ, а

при визначенні Π_{3ij} використовується відносна електромагнітна КЗ K_{yij} :

$$\Pi_{1(2)ij}^* \equiv f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c); \tag{2}$$

$$\Pi_{3ij}^* \equiv f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c, K_{yij}), \tag{3}$$

де K_{30} – коефіцієнт заповнення обмотувального вікна, що враховує клас напруги ЕСП; a_m і λ_0 – геометричні відносні КЗ; α_c – центральний кут стрижня (рис. 2) – додаткова геометрична КЗ у безрозмірному значенні ($\sin\alpha, \operatorname{tg}\alpha\dots$); K_{yij} – електромагнітна відносна КЗ, в якій враховується коефіцієнт додаткових втрат $K_{днij} = K_{дн} = 1,1\dots1,3$ [16-18].

Використані КЗ у вигляді співвідношення a_m і λ_0 визначаються діаметрами D_{1ij} і D_{2ij} розрахункових кіл магнітопроводу, а КЗ λ_0 визначаються геометричними параметрами обмотувального вікна h_{0ij} і b_{0ij} з певними позначками ij -індексу варіанта ЕМС:

$$a_m = D_{1ij} / D_{2ij}; \tag{4}$$

$$\lambda_0 = h_{0ij} / b_{0ij}. \tag{5}$$

Для вирішення завдань структурного синтезу в роботі приймалися певні положення і припущення. За принципом електромагнітної еквівалентності при порівнянні ЕМС приймалися однаковими потужності, параметри електроенергії, добуток електромагнітних навантажень та ін. При визначенні екстремуму показників маси і вартості для ЕМС, що порівнюються, приймалися реальні діапазони відношення питомих характеристик (густини) матеріалів (обмотувальної міді і ЕТС) (кг/м^3) $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$ та їх вартостей $C_o/C_c = 3,0\dots5,5$. Також однаковими приймалися класи напруг $K_{30} = 0,3\dots0,2$ і коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю $K_{зс} = 0,91$.

При визначенні ММ і ПТР розглядалися тороїдна (рис. 2, а) і радіальна (рис. 2, б) ЕМС з прямокутними перерізами магнітопроводу. Тороїдна ЕМС має стикову конструкцію з роз'ємним магнітопроводом, в якій відсутній центральний технологічний отвір човникової укладки обмотки.

В роботі для порівняння ПТР ЕМС на підставі (1)-(5) були отримані числові значення КЗ, а також ПТР існуючої (табл. 1) і нетрадиційної (запропонованої) (табл. 2).

Таблиця 1

Екстремальні значення показників маси, вартості і втрат активної потужності однофазної тороїдної електромагнітної системи з прямокутним перерізом магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керуваних змінних		Значення мінімумів показників			
	a_m , в.о.	α_c , град.	Маса Π_{1frc}^* , в.о.	Діапазон вартостей Π_{2frc}^* , в.о.	Діапазон втрат Π_{3frc}^* , в.о.	
					$K_{дн} = 1,1$	$K_{дн} = 1,3$
0,3	2,25	45,49	20,61	41,87-54,64	43,94-171,54	39,77-153,31
0,25	2,41	45,26	21,64	43,25-56,19	45,35-173,99	41,12-155,65
0,2	2,62	44,98	22,94	45,12-58,29	47,27-177,3	42,95-158,82

Таблиця 2

Екстремальні значення показників маси, вартості і втрат активної потужності однофазної радіальної електромагнітної системи з прямокутним перерізом магнітопроводу

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в.о.	Екстремальні значення керуваних змінних		Значення мінімумів показників			
	a_m , в.о.	α_c , град.	Маса Π_{1frc}^* , в.о.	Діапазон вартостей Π_{2frc}^* , в.о.	Діапазон втрат Π_{3frc}^* , в.о.	
					$K_{дн}=1,1$	$K_{дн}=1,3$
0,3	1,37	0,38	18,23	35,21-45,67	36,92 – 140,5	33,49 – 125,75
0,25	1,34	0,35	19,14	36,47-47,09	38,20- 142,74	34,72 – 127,90
0,2	1,30	0,31	20,38	38,18-48,99	39,94 –145,77	36,12 -130, 8

Результати оптимізаційного порівняльного аналізу ЕМС за критеріями: мінімум маси, мінімум вартості активних матеріалів і мінімум втрат активної потужності показані на рис. 3.

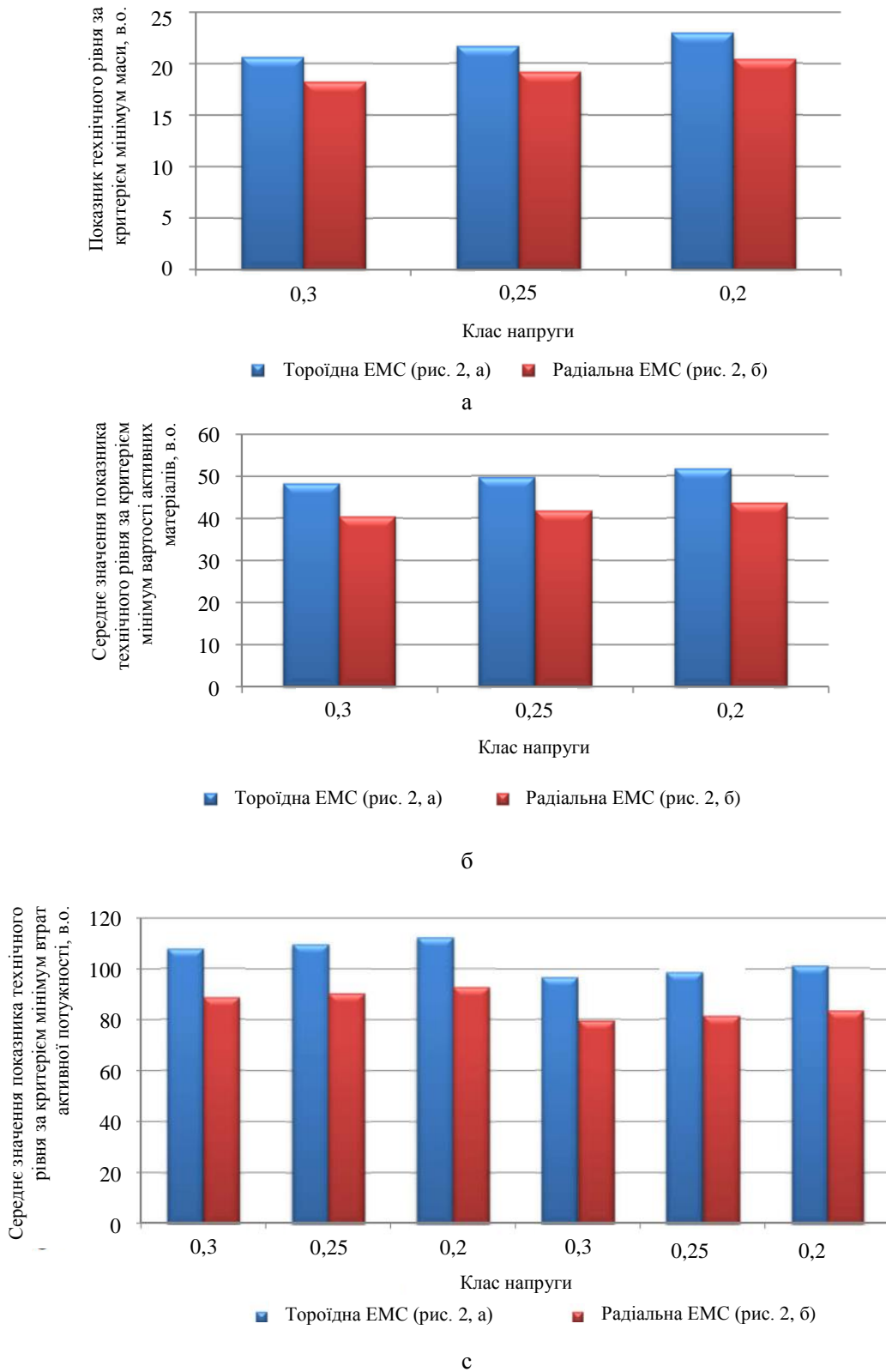


Рис. 3 – Порівняльний аналіз показників технічного рівня тороїдної та радіальної електромагнітних систем за критеріями мінімумами: маси (а), вартості активних матеріалів (б) та втрат активної потужності (с)

Висновки

1. Наведено спосіб удосконалення трифазних групових трансформаторів для живлення електроприводу заглибних насосів.
2. Отримані екстремальні (мінімуми) значення показників технічного рівня тороїдної та радіальної електромагнітних систем.
3. Визначено, що показники технічного рівня (у розрахунковому діапазоні електромагнітних навантажень, вартостей активних матеріалів та названого класу напруг) покращуються за критерієм мінімум маси на (11,54; 11,55; 11,15)%, за критерієм мінімум вартості активних матеріалів на (23,07-16,42; 15,87-16,19; 15,38-15,95)% та за критерієм мінімум втрат активної потужності (11,82-18,09; 15,77-17,96; 15,5-17,7)% відносно просторової тороїдної електромагнітної системи.

Перелік використаних джерел:

1. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов (перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди (тема «В» совместного с Европейской комиссией проекта № STB-1678-98-BE) : перевод с англ. Е.В. Мельниковой) // Энергосбережение. – 2003. – № 6. – С. 66-70.
2. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / А.А. Ставинский // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – № 1. – С. 57-61.
3. Умные сети требуют умных и энергоэффективных трансформаторов [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/614>.
4. Hurley W.G. Transformers and inductors for power electronics : theory, design and application / W.G. Hurley, W.H. Wölfle. – John Wiley & Sons, Ltd, 2013. – 370 p.
5. Блинцов С.В. Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невідомості / С.В. Блинцов. – Миколаїв : ТОВ «Фірма Іліон», 2008. – 204 с.
6. Moore S. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. – Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
7. Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu. Instructor's Manual for Electric Machinery and Transformers / S. Guru Bhag, Hiziroglu Huseyin R. – Oxford University Press, 2000. – 222 p.
8. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин / А.А. Ставинский // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 53-58.
9. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л.Г. Пикалова. – М. : Альянс, 2013. – 400 с.
10. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов : учебное пособие для ВУЗов / П.М. Тихомиров. – М. : Альянс, 2013. – 528 с.
11. Фарбман С.А. Ремонт и модернизация трансформаторов / С.А. Фарбман, А.Ю. Бун. – М. : Книга по требованию, 2013. – 554 с.
12. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В.С. Блинцов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовый // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 16-21.
13. Хныков А.В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного питания / А.В. Хныков. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2010. – 128 с.
14. Ставинский А.А. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей / А.А. Ставинский, И.А. Тищенко, Н.И. Зеленый // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 1 (77). – С. 64-69.
15. Пат. 100077 Україна, МПК Н 01 F 27/24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Ставинська, О.С. Садовый, О.М. Циганов. – № а201104987; заявл. 20.04.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. – 8 с.
16. 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.
17. Ставинский А.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 2. Примеры структур и результатов преобразований / А.А. Ставин-

ский, Р.А. Ставинский, Е.А. Аведеева // Электричество. – 2014. – № 10. – С. 28-34.

18. Универсальный метод обоснованного выбора технических решений активной части электрических машин и аппаратов / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Аведеева, О.О. Пальчиков // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут»: Зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 70-79. – (Серія : Електричні машини та електро-механічне перетворення енергії).

References:

1. Energoseberezhenie v Evrope: primeneniye energoeffektivnykh transformatorov (perepecha-tano s sokrashcheniiami iz izdaniia Evropeiskogo instituta medi (tema «V» sovmestnogo s Evropeiskoi komissiei proekta no. STB-1678-98-BE). Perevod s angliiskogo E.V. Mel'nikovoi [Energy saving in Europe: the use of energy efficient transformers (reprinted with abbreviations from the publication of the European Copper Institute (theme «B» of the joint project with the European Commission no. STB-1678-98-BE). Translated from English by E.V. Melnikova)]. *Energoseberezhenie – Energy saving*, 2003, no. 6, pp. 66-70. (Rus.)
2. Stavinskii A.A. Problema i napravleniia dal'neishei evoliutsii ustroistv elektromekhaniki [The problem and directions for the further evolution of electromechanical devices]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrotechnics and electromechanics*, 2004, no. 1, pp. 57-61. (Rus.)
3. Umnye seti trebuiut umnykh i energoeffektivnykh transformatorov (Smart grids require smart and energy efficient transformers) Available at : www.portal-energo.ru/articles/details/id/614 (accessed 15 February 2020). (Rus.)
4. Hurley W.G., Wolfe W.H. Transformes and inductors for power electronics : theory, design and application. John Wiley & Sons Ltd Publ., 2013. 370 p.
5. Blintsov S.V. *Avtomatichne keruvannia avtonomnimi pidvodnimi aparatami v umovakh neviznachenosti* [Automatic control of autonomous submarines in conditions of uncertainty]. Mikolaïv, TOV «Firma Ilion» Publ., 2008. 204 p. (Ukr.)
6. Moore S., Bohm H., Jensen V. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication. Marine Advanced Technology Education (MATE) Center Publ., 2010. 770 p.
7. Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu. Instructor's Manual for Electric Machinery and Transformers. Oxford University Press Publ., 2000. 222 p.
8. Stavinskii A. A. Osobennosti naznacheniia i ispol'zovaniia spetsial'nykh elektricheskikh mashin [Features of the appointment and use of special electrical machines]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrotechnics and electromechanics*, 2008, no. 2, pp. 53-58. (Rus.)
9. Belopolsky I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drosselei maloi moshchnosti* [Calculation of low-power transformers and chokes]. Moscow, Alliance Publ., 2013. 400 p. (Rus.)
10. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov: uchebnoe posobie dlia vuzov* [Calculation of transformers: textbook for universities]. Moscow, Alliance Publ., 2013. 528 p. (Rus.)
11. Farbman S.A., Bun A.Yu. *Remont i modernizatsiya transformatorov* [Repair and modernization of transformers]. Tbilisi State University Publ., 2013. 560 p. (Rus.)
12. Blintsov S.V., Stavinskii R.A., Avedeeva E.A., Sadovoj A.S. Transformatory dlia vstraivaniia v obolochki ogranichenogo diametra ob"ektov spetsial'noi tekhniki i postanovka zadachi ikh usovershenstvovaniia [Transformers for embedding into shells of limited diameter of special equipment objects and setting the problem of their improvement.]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrotechnics and electromechanics*, 2012, no. 2, pp. 16-21. (Rus.)
13. Khnykov A.V. *Teoriia i raschet transformatorov istochnikov vtorichnogo pitaniia* [Theory and calculation of transformers of secondary power supplies]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2010. 128 p. (Rus.)
14. Stavinskii A.A., Tishchenko I.A., Zelenyi N.I. Perspektivy i osobennosti dal'neishego usovershenstvovaniia induktsionnykh elektromekhanicheskikh i staticheskikh preobrazovatelei [Prospects and features of further improvement of induction electromechanical and static converters]. *Elektrotekhnichni ta komp'uterni sistemi – Electrotechnical and computer systems*, 2010, no. 1 (77), pp. 64-69. (Rus.)
15. Stavinskii A. A., Stavinskii R. A., Avedeeva E. A., Sadovoj A. S., Cyganov O. M. *Magnitoprovod*

- indukcijnogo statychnogo prystroju* [Magnetic conductor of an induction static annex]. Patent UA, no. 10007, 2012. (Ukr.)
16. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avedeeva E.A. Optimizacionnyj sravnitel'nyj analiz struktur staticheskikh jelektromagnitnyh sistem. Ch. 1. Varianty i metod ocenki preobrazovanij [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part 1. Options and method of assessing transformations]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no. 9, pp. 34-43. (Rus.)
 17. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avedeeva E.A. Optimizacionnyj sravnitel'nyj analiz struktur staticheskikh jelektromagnitnyh sistem. Ch. 2. Primery struktur i rezul'tatov preobrazovanij [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part 2. Examples of structures and results of transformations]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2014, no. 10, pp. 28-34. (Rus.)
 18. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avedeeva E.A., Pal'chikov O.O. Universal'nyj metod obosnovanogo vibora tehniceskikh reshenij aktivnoj chasti jelektricheskikh mashin i apparatov [A universal method of sound selection of technical solutions for the active part of electrical machines and devices]. *Visnik NTU «Kharkivs'kii politekhnichnii institut». Serija: Elektrichni mashini ta elektromehanichne peretvorennja energii – Bulletin of the NTU «Kharkiv Polytechnic Institute». Series: Electrical Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2016, no. 11(1183), pp.70-79. (Rus.)

Рецензент: А.А. Ставинський
д-р техн. наук, проф., МНАУ

Стаття надійшла 28.03.2020