

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140306>

УДК 621.314

A 18

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MASS AND COST INDICATORS OF STATIC THREE-PHASE SPATIAL ELECTROMAGNETIC SYSTEMS WITH TWISTED BUTT MAGNETIC CORES

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАСОВАРТИСНИХ ПОКАЗНИКІВ СТАТИЧНИХ ТРИФАЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З ВИТИМИ СТИКОВИМИ МАГНІТОПРОВОДАМИ

Olena A. Avdieieva

[e.avdeeva@ukr.net](mailto:e.avdeeva@ukr.net)

ORCID: 0000-0003-3641-7249

О. А. Авдеева,

асп.

National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

**Abstract.** The promising direction of solving problems of the new design of the three-phase transformers and reactors is the construction of the spatial detachable magnetic cores with the twisted elements. The specific features of the existing and new structures and constructions of the three-phase spatial axial and radial static electromagnetic systems with the unconventional forming contours of rods of butt magnetic cores and winding coils are considered. Such structures are characterized by high compactness and low labor intensity of production of combined and twisted magnetic cores variants relatively to the traditional planar and spatial analogues. The mathematical models of different electromagnetic systems structures using the method of relative coefficients of the technical level indicators and geometric relative controlled variables are developed. The comparative analysis of the mass and cost indicators of the variants of the three-phase planar and spatial axial and radial structures which differ in rectangular, hexagonal and sectorial forming contours is made on the basis of these models. The optimization calculations show that under the usage of the spatial electromagnetic systems variants with the hexagonal rod sections of the butt magnetic cores with twisted elements in addition to the significant increase in compactness one can reach 7...8.2 and 11...13.6 % of decrease of the weight and cost of the active part of the three-phase transformer or reactor respectively with the copper windings with respect to the planar analogue with the rectangular outer contour and the rod sections of the magnetic cores.

**Keywords:** static electromagnetic system, compactness, winding technology, spatial butt magnetic core, objective function, geometric controlled variables, mass, cost, optimization.

**Анотація.** Виконано порівняльний аналіз масовартисних показників варіантів аксіальних і радіальних структур трифазних статичних електромагнітних систем з витими стиковими магнітопроводами. Показано переваги використання трисекційних магнітопроводів з шестигранними перерізами стрижнів.

**Ключові слова:** статична електромагнітна система, компактність, технологія навивання, просторовий стиковий магнітопровід, цільова функція, геометричні керовані змінні, маса, вартість, оптимізація.

**Аннотация.** Выполнен сравнительный анализ массостоймых показателей вариантов аксиальных и радиальных структур трехфазных статических электромагнитных систем с витыми стыковыми магнітопроводами. Показаны преимущества использования трехсекционных магнітопроводов с шестигранными сечениями стержней.

**Ключевые слова:** статическая электромагнитная система, компактность, технология навивки, пространственный стыковой магнітопровод, целевая функция, геометрические управляемые переменные, масса, стоимость, оптимизация.

#### REFERENCES

- [1] Avdieieva E.A. Sposoby obespecheniya elektromagnitnoy sovместимости trekhfaznykh transformatorov [Ways to ensure epy electromagnetic compatibility of three-phase transformers]. *Materialy Vseukrainskoi nauk.-tekhn. konf. z mizhnarodnoiu uchastiu «Pidvodna tekhnika i tekhnologija»* [Materials of Ukrainian scientific-technical conf. with international participation «Underwater equipment and technology»]. Mykolaiv, NUK Publ., 2013, pp. 39–45.
- [2] Avdieieva E.A. Sravnitelnyy analiz planarnoy i prostranstvennoy aksialnoi trekhfaznih elektromagnitnykh sistem s parallelnemi obrazu-yuschimi poverhnostjami sterzhnei i obmotochnykh okon (massostoyimostnye pokazateli)

- [The comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of rods and coil windows (mass and cost indicators)]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electronics and Electromechanics*, 2012, issue 4, pp. 15–20.
- [3] Belopolskiy I.I., Karetnikova Ye.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drossel'ey maloy moshchnosti* [Calculation of transformers and inductors with low capacity]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 400 p.
- [4] Veselovskiy O.N., Kopylov I.P. U istokov elektromekhaniki. Stoletie transformatora [At the root of electromechanics. Century of transformer]. *Elektrotehnika – Electrotechnics*, (1984) vol. 11, pp. 62–63.
- [5] Kravchenko A., Metelskiy V. Maslyanye energosberegayushchie transformatory [Oil energy saving transformers], *Elektrik. Mezhdunarodnyy elektrotekhnicheskyy zhurnal – Electric. International Journal of Electrical Engineering*, 2013, issue 5, pp. 14–17.
- [6] Bormosov V.A., Kostousova M.N., Petrenko A.F., Smolskaya N.Ye. *Perspektivy i sostoyanie razrabotok raspredelitelnykh transformatorov massovykh seriy* [Prospects and status of development of mass series distribution transformers]. Available at: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (accessed: 13 September 2004).
- [7] Stavinskiy A.A. Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov elektromagnitnykh sistem (elektrodinamicheskaya ustoychivost i sistemy so stykovymi magnitoprovodami) [Evolution of structures and preconditions for transformers and reactors improvement via electromagnetic system circuits transformation (electrodynamic stability and systems with combined butt magnetic cores)]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering and Electromechanics*, 2011, issue 5, pp. 43–47.
- [8] Stavinskiy A.A. Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov elektromagnitnykh sistem (sistemy s shikhtovannymi i vitymi magnitoprovodami) [Evolution of structures and preconditions for transformers and reactors improvement via electromagnetic system circuits transformation (systems with laminated and twisted magnetic circuits)]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering and Electromechanics Publ.*, 2011, issue 6, pp. 33–38.
- [9] Stavinskiy A.A. Osobennosti naznacheniya i ispolzovaniya spetsialnykh elektricheskikh mashin [Assignment and application features of special electrical machines]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electronics and Electromechanics*, 2008, issue 1, pp. 44–48.
- [10] Stavinskiy A.A., Plakhtyr O.O., Stavinskiy R.A. Pokazateli kachestva i strukturnoy optimizatsii prostranstvennykh elektromagnitnykh sistem trekhfaznykh transformatorov, reaktorov i drossel'ey [Quality indicators and structural optimization of spatial electromagnetic systems of three-phase transformers, reactors and chokes]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electronics and Electromechanics*, 2003, issue 4, pp. 79–82.
- [11] Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov: uchebnoe posobie dlya vuzov* [The calculation of transformers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 528 p.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основні конфігурації перерізів стрижнів магнітопроводів і витків котушок обмоток в традиційних конструкціях планарних електромагнітних систем (ЕМС) трансформаторів, реакторів і дроселів [3, 11] характеризуються прямокутними і круговими твірними контурами (ТК) стрижнів та обмоткових котушок, а також зовнішніми прямокутними контурами магнітопроводів. В останні десятиріччя підвищується потужність трифазних трансформаторів (ТТ), магнітопроводи яких виготовляються на основі технології навивання стрічки (рулону) електротехнічної сталі (ЕТС) [5, 6]. Застосування цієї технології почалось у другій половині ХХ ст. і дозволило освоїти виробництво, додатково до планарних, також просторових аксіальних ЕМС з комбінованими (виті ярма, пластинчасті стрижні) та нероз'ємними трисекційними (з двоконтурними фазними елементами) магнітопро-

водами. При цьому виті планарні магнітопроводи ТТ малої потужності і дроселів виготовляються з прямокутними перерізами стрижнів (рис. 1, а, б), а в просторових ЕМС конфігурації перерізів стрижнів (див. рис. 1, в) і стрижневих частин витих секцій магнітопроводів традиційно утворені колом [3, 11]. Однак прямокутна форма обмоткової котушки підвищує середню довжину витка і знижує міцність ізоляції у разі вигину на 90° провідників у кутових зонах, а кругова форма котушки мінімізує довжину проводу обмоток, однак значно підвищує металомісткість та трудомісткість виготовлення магнітопроводів з шарів ЕТС різної ширини [11].

Указані конфігурації активних елементів є практично незмінними протягом сторіччя, і традиційні ЕМС не мають подальшого структурно-конструктивного потенціалу розвитку. У зв'язку з цим, з метою удосконалення планарних і просторових конструкцій активної частини трансформаторів

і реакторів запропоновано технічні рішення ЕМС з нетрадиційними, зокрема секторними і шестигранними, ТК стрижнів та обмоткових котушок [7–10].

Отже, завдання математичного моделювання та обґрунтування доцільності застосування нетрадиційних ЕМС у розподільних і спеціальних ТТ слід вважати дуже важливим та актуальним.

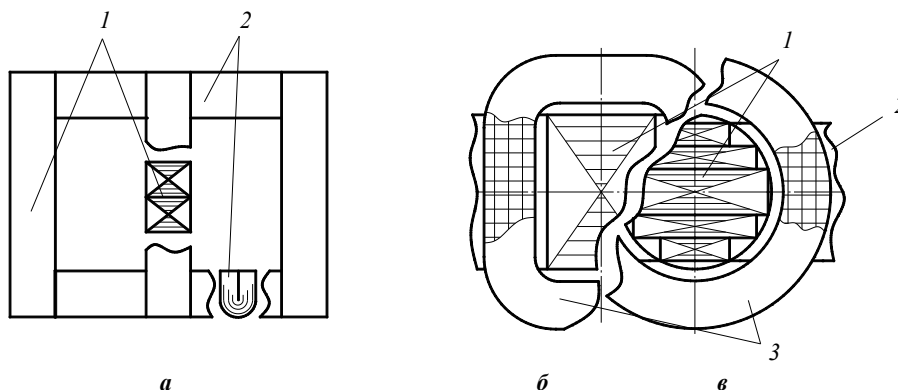


Рис. 1. Конструктивна схема планарного стикового магнітопроводу з витих розрізних сплюснутих елементів (а) і традиційній конфігурації (б, в) котушок обмоток та перерізів стрижнів: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Перспективним напрямом розв'язання задач енергоресурсозбереження при виконанні нових розробок ТТ потужністю до 630 кВ·А визначено створення просторових витих магнітопроводів, у яких досягається максимальний ефект використання нових високопроникливих анізотропних та аморфних ЕТС. Також, згідно з [6], актуальним є досягнення ремонтпридатності, зниження втрат і матеріалоємності ТТ на основі роз'ємного (стикового) виконання подібних магнітопроводів.

Крім виробництва ефективних індукційних статичних пристроїв розподільного призначення існує необхідність розробки і вдосконалення трансформаторів, що призначені для встановлення у циліндричні та сферичні оболонки обмеженого діаметра [8, 9]. Підвищенням заповнення сферичного контурного об'єму відрізняється вихідна конструкція ТТ з просторовою радіальною ЕМС [4]. У такій ЕМС стрижні з обмотковими котушками розташовані під кутами 120°, з'єднані у центрі і зістиковані з кільцевим зовнішнім ярмом шихтованого магнітопроводу. Подібне технічне рішення практично не використовувалось і не набуло подальшого розвитку у зв'язку із значними відходами ЕТС при виробництві магнітопроводів і подальшій розробці планарної ЕМС після варіантів просторових аксіальних конструктивних схем [4, 7].

Заміна кругових ТК ЕМС (див. рис. 1, в) на секторні і шестигранні ТК підвищує показник компактності ТТ з просторовими аксіальними ЕМС, а використання замість шихтування технології навивання ЕТС надає можливість виробництва радіальних ЕМС без указаних недоліків [4, 8].

Існуюча різноманітність технічних рішень просторових ЕМС [4, 6–11] обумовлює необхідність їх

аналітичного порівняльного аналізу. Виконання подібного аналізу можливе методом структурної оптимізації [10] з відносними показниками технічного рівня та універсальними геометричними керованими змінними [2, 10].

**МЕТА СТАТТІ** – порівняння масовартісних показників варіантів трифазних просторових ЕМС з витими елементами магнітопроводів.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Спеціальні компактні ТТ можуть бути розроблені на основі існуючих просторових ЕМС за умови усунення їх відомих недоліків [4, 7, 11]. Варіанти трифазних просторових компактних ЕМС з нетрадиційними витими стиковими магнітопроводами [7, 8] наведені на рис. 2–4, де позначено: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

В ЕМС із секторними ТК (див. рис. 2) стрижні виконуються розрізанням коаксіальних витих заготовок, що обумовлює паралельність стінок обмоткових вікон (див. рис. 2, а) і суміщення периферійних контурів стрижнів з кутовими ділянками витих ярм трикутної форми [2, 8]. Цим досягається зниження на 15...20 % габаритних розмірів ЕМС відносно традиційних просторових аналогів та зручність вбудовування у сферичний контурний об'єм діаметра  $D_k$  (див. рис. 2, б). Також конфігурації елементів магнітопроводу й обмоток ЕМС (див. рис. 2) знижують на 4...6 та 5...8 % показники маси і вартості відносно електромагнітно-еквівалентного планарного аналога (див. рис. 1, а). Однак конструктивні і технологічні особливості магнітопроводу обумовлюють ортогональність магнітного потоку стрижнів напряму прокату ЕТС, що передбачає використання для навивання витих розрізних заготовок тільки ізотропної або

нової кошовної аморфної ЕТС. Також на зовнішньому контурі стрижнів витки котушок обмоток ЕМС, як

і у планарних структурах ТТ малої потужності, вигнуті під прямими кутами, що знижує надійність.

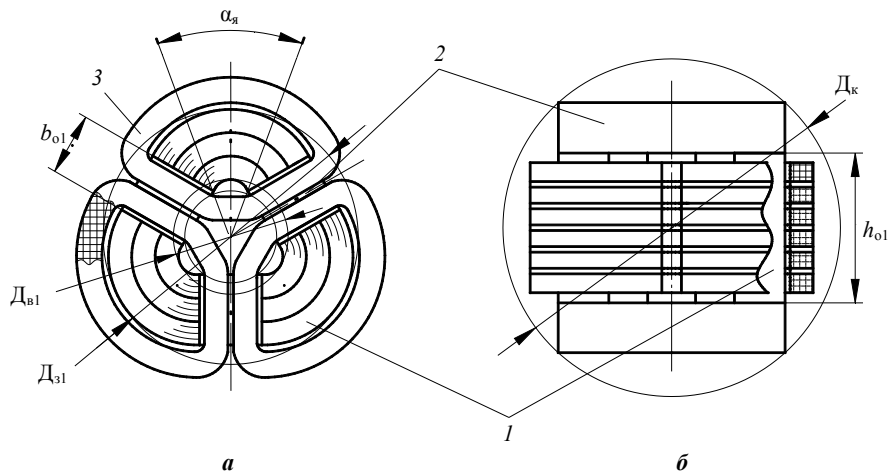


Рис. 2. Поперечна структура (а) та загальний вигляд (б) конструктивної схеми просторової трифазної електромагнітної системи з витим стиковим магнітопроводом

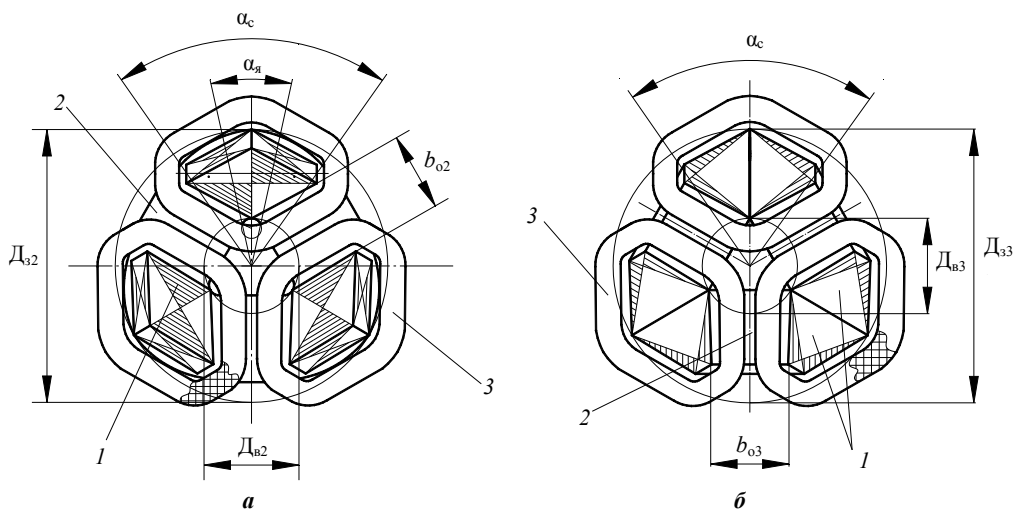


Рис. 3. Поперечні структури варіантів просторових аксіальних електромагнітних систем з комбінованим (а) та витим трисекційним (б) стиковими магнітопроводами

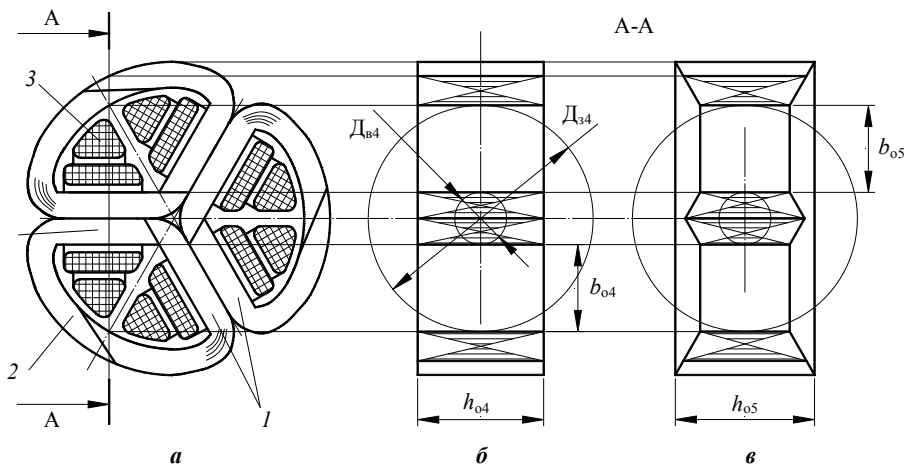


Рис. 4. Поперечна структура (а) просторової радіальної електромагнітної системи з прямокутними (б) і шестигранними (в) перерізами стрижнів витого магнітопроводу

Перетворення кругових ТК аксіальних ЕМС (див. рис. 1, *б*) на шестигранні ТК надає можливість формування стрижнів (див. рис. 3, *а*) або стрижневих частин (див. рис. 3, *б*) магнітопроводів відповідно з ідентичних прямокутних пластин і секційних стрічкових заготовок (розгорток), які мають текстуру вздовж потоку та більш просту безвідходну форму [7, 8]. При цьому кути вигину обмоткових витків збільшуються до 120°, знижується трудомісткість виготовлення, а також аналогічно конструкції на рис. 2 підвищується компактність ЕМС на 15...20 %.

У радіальній ЕМС (див. рис. 4, *а*) намотка витків і формування котушок обмотки повинні відповідати секторним формам обмоткових вікон. Застосування замість прямокутної (див. рис. 4, *б*) трапецієподібної (див. рис. 4, *в*) форми перерізів секцій дещо знижує механічну деформацію кутових зон і матеріаломісткість ЕМС утворенням шестигранної конфігурації витків і котушок обмоток [7].

Порівняльний аналіз варіантів ЕМС виконується у відповідності до принципу електромагнітної еквівалентності на основі визначення екстремумів унімодальних цільових функцій (ЦФ) показників технічного рівня. Згідно з метою роботи та [10] визначено ЦФ маси і вартості активних матеріалів ЕМС (див. рис. 2–4), які мають вигляд

$$F_{и,м(в)і} = \left(\sqrt[4]{\Pi_B}\right)^3 K_{м(в)і} \Pi_{м(в)і}^* \quad (1)$$

$$\Pi_{м(в)і}^* = f(K_{3.0}, a_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (2)$$

де  $\Pi_B$  – показник вихідних даних (технічного завдання та електромагнітних навантажень) трансформатора або реактора;  $K_{м(в)і}$  та  $\Pi_{м(в)і}^*$  – коефіцієнт питомих характеристик електротехнічних матеріалів та відносний коефіцієнт – показник маси (вартості)  $i = 1...5$  – варіантів ЕМС (див. рис. 2–4);  $K_{3.0}$  – такий, що відповідає класу напруги, відомий коефіцієнт заповнення обмоткового вікна провідниковим матеріалом [11];  $a_m, \lambda_o$  – основні відносні геометричні керовані змінні;  $\alpha_c$  – центральний кут стрижня – додаткова геометрична керована змінна, яка використовується у деяких ЕМС.

Указані ЦФ (1) з показниками (2) визначені з використанням базових рівнянь і математичних перетворень, відомих у тому числі з [2], а відносні керовані змінні є співвідношеннями розрахункових геометричних параметрів [10]:

$$a_m = D_{zi} / D_{vi};$$

$$\lambda_o = h_{oi} / b_{oi},$$

де  $D_{zi}$  та  $D_{vi}$ ,  $h_{oi}$  та  $b_{oi}$  – зовнішній та внутрішній розрахункові діаметри магнітопроводу і відповідно висота й ширина обмоткового вікна магнітопроводу ЕМС (див. рис. 2) та магнітопроводів інших ЕМС (див. рис. 3, 4).

Маси магнітопроводів ЕМС (див. рис. 2, 3) також є залежними від центрального кута  $\alpha_\pi$  округлення внутрішнього контуру ярма. Однак  $\alpha_\pi$  не є додатковою керованою змінною, а має технологічні обмеження і залежить від радіуса округлення внутрішніх кутових зон ярма, який для ЕМС малої потужності  $r_\pi \geq 3...5$  мм. Крім того, маси ЕМС залежать від коефіцієнта заповнення магнітопроводу ЕТС  $K_{3.0}$  [3, 11].

Показники  $\Pi_{м(в)2}^*$  та  $\Pi_{м(в)3}^*$  варіантів ЕМС (див. рис. 3) з шестигранними перерізами стрижнів магнітопроводу визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{м2}^* = & 6 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3.0}K_{3.0}\lambda_o f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ & \times \{K_{3.0} f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + \\ & + f_{ш.к}(a_m, \alpha_c)] 0,866K_{3.0}\lambda_o f_{ш.к2}(a_m, \alpha_c) \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{в2}^* = & 6 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3.0}K_{3.0}\lambda_o f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ & \times \{K_{3.0} f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + f_{ш.к}(a_m, \alpha_\pi)] + \\ & + 0,866K_{3.0}\lambda_o f_{ш.к2}(a_m, \alpha_c) C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{м3}^* = & 1,5 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3.0}K_{3.0}\lambda_o f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) f_{ш.в3}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ & \times \{K_{3.0} [f_{ш.в1}^2(a_m, \alpha_c) F_{ш.в1}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) \times \\ & \times f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c) F_{ш.в2}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928K_{3.0}\lambda_o [f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) + \\ & + 0,866 f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c) + 1,1781] \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{в3}^* = & 1,5 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3.0}K_{3.0}\lambda_o f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) f_{ш.в3}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ & \times \{K_{3.0} [f_{ш.в1}^2(a_m, \alpha_c) F_{ш.в1}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) \times \\ & \times f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c) F_{ш.в2}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928K_{3.0}\lambda_o [f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) + \\ & + 0,866 f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c) + 1,1781] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}; \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\gamma_{o(c)}$  і  $C_{o(c)}$  – питомі маса та вартість матеріалу обмотки (магнітопроводу);  $f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c)$ ,  $f_{ш.к}(a_m, \alpha_\pi)$ ,  $f_{ш.к2}(a_m, \alpha_c)$ ,  $f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c)$ ,  $f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c)$ ,  $f_{ш.в3}(a_m, \alpha_c)$ ,  $F_{ш.в1}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)$ ,  $F_{ш.в2}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)$  – співмножники скорочення запису рівнянь,

$$\begin{aligned} f_{ш.к}(a_m, \alpha_\pi) = \\ = 2,4184 \left\{ \left[ \frac{1}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha_\pi}{2}} \right] + (a_m - 1)/2 \right\}^2 / (a_m - 1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{ш.к1}(a_m, \alpha_c) = \\ = (a_m + 1) [a_m - 1 - (a_m + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c/2) / (2\sqrt{3})] \operatorname{tg}(\alpha_c/2); \end{aligned}$$

$$f_{ш.к2}(a_m, \alpha_c) = [\sqrt{3}a_m + (a_m + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c/2) + 0,62414];$$

$$f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) = (a_m + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c/2);$$

$$f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c) = a_m - 1 - f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) / \sqrt{3};$$

$$f_{ш.в3}(a_m, \alpha_c) = a_m - 1 - f_{ш.в1}(a_m, \alpha_c) / (2\sqrt{3});$$

$$F_{ш.в1}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) = 1 + \lambda_o + \pi f_{ш.в3}(a_m, \alpha_c)/2;$$

$$F_{ш.в2}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) = 1 + \lambda_o + \pi f_{ш.в2}(a_m, \alpha_c)/4.$$

Показники  $\Pi_{м(в)4}^*$  і  $\Pi_{м(в)5}^*$  варіантів ЕМС (див. рис. 4,а) з прямокутними (б) та трапецієподібними (в) перерізами секцій магнітопроводу визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} \Pi_{м4}^* &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1/[K_{3,c} K_{3,o} \lambda_o (a_m - 1)^3]} \right)^3 \times \\ &\times (a_m - 1) \{ K_{3,c} \lambda_o (a_m - 0,3357) + \\ &+ 0,29534 K_{3,o} (a_m - 1) [2 + (a_m - 1)(\lambda_o + 1,1514)] \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{в4}^* &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1/[K_{3,c} K_{3,o} \lambda_o (a_m - 1)^3]} \right)^3 \times \\ &\times (a_m - 1) \{ K_{3,c} \lambda_o (a_m - 0,3357) + \\ &+ 0,29534 K_{3,o} (a_m - 1) [2 + (a_m - 1)(\lambda_o + 1,1514)] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{м5}^* &= \\ &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1/\{K_{3,c} K_{3,o} \lambda_o (a_m - 1)^2 [(a_m - 1)\lambda_o - 0,57735]\}} \right)^3 \times \\ &\times \{ K_{3,c} (a_m - 0,3355) \lambda_o (a_m - 1) - 0,57735 \} + \\ &+ 0,29533 K_{3,o} (a_m - 1)^2 \times \\ &\times [(a_m - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{в5}^* &= \\ &= 6,5656 \left( \sqrt[4]{1/\{K_{3,c} K_{3,o} \lambda_o (a_m - 1)^2 [(a_m - 1)\lambda_o - 0,57735]\}} \right)^3 \times \\ &\times \{ K_{3,c} (a_m - 0,3355) \lambda_o (a_m - 1) - 0,57735 \} + \\ &+ 0,29533 K_{3,o} (a_m - 1)^2 \times \\ &\times [(a_m - 1)(\lambda_o + 1,1515) + 1,1547] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \}. \end{aligned} \quad (10)$$

Екстремуми (мінімуми)  $\Pi_{м(в)2e}^* \dots \Pi_{м(в)5e}^*$  функціональних залежностей (3)–(10), отриманих за допомогою програмного комплексу MathCAD для трьох значень  $K_{3,o}$ , наведено в табл. 1 і 2 у порівнянні з аналогічними екстремумами  $\Pi_{м(в)п}^*$  [2] традиційної структури планарної ЕМС з прямокутними зовнішнім контуром та перерізами стрижнів, а також екстремумами  $\Pi_{м(в)1e}^*$  ЕМС (див. рис. 2). Показники  $\Pi_{м(в)п.e}^*$  і  $\Pi_{м(в)1e}^* \dots \Pi_{м(в)5e}^*$  визначені при використанні мідного обмоткового проводу та анізотропної ЕТС марки 3407 зі співвідношеннями густини (кг/м<sup>3</sup>)  $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$  і вартості  $C_o/C_c = 3,5 \dots 5,5$  та  $K_{3,c} = 0,97$ . Показники  $\Pi_{м(в)1}^*$  і  $\Pi_{м(в)2}^*$  також визначені відповідно при  $\alpha_r = 10^\circ$  та  $\alpha_r = 5^\circ$ .

У табл. 1 і 2 наведено перспективи підвищення технічного рівня ТТ, дроселів і реакторів на основі нетрадиційних структур просторових ЕМС. Охарактеризовані у вказаних таблицях варіанти просторових ЕМС з мідними обмотками відрізняються між собою показниками маси і вартості активної частини відповідно на 2,7...3,6 та 5...8 %.

Таблиця 1. Оптимальні значення показників маси варіантів електромагнітних систем

Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в. о.	Показник маси, в. о.					
	$\Pi_{м.п.e}^*$	$\Pi_{м1e}^*$ (див. рис. 2)	$\Pi_{м2e}^*$ (див. рис. 3,а)	$\Pi_{м3e}^*$ (див. рис. 3,б)	$\Pi_{м4e}^*$ (див. рис. 4,б)	$\Pi_{м5e}^*$ (див. рис. 4,в)
0,30	27,764	26,451	26,469	25,555	25,774	25,477
0,25	29,318	27,977	27,992	27,006	27,336	27,07
0,20	31,423	30,045	30,056	28,972	29,523	29,228

Таблиця 2. Оптимальні значення показників вартості варіантів електромагнітних систем

Показник вартості, в. о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в. о.	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі				
		3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
$\Pi_{в.п.e}^*$	0,30	51,652	55,503	59,19	62,739	66,171
	0,25	53,778	57,701	61,454	65,064	68,551
	0,20	56,658	60,678	64,52	68,212	71,776
$\Pi_{в1e}^*$ (див. рис. 2)	0,30	48,667	52,236	55,651	58,937	62,113
	0,25	50,749	54,389	57,868	61,213	64,443
	0,20	53,571	57,306	60,872	64,297	67,601
$\Pi_{в2e}^*$ (див. рис. 3,а)	0,30	48,706	52,275	55,69	58,976	62,151
	0,25	50,792	54,433	57,913	61,259	64,488
	0,20	53,619	57,356	60,923	64,349	67,654
$\Pi_{в3e}^*$ (див. рис. 3,б)	0,30	47,256	50,745	54,084	60,401	60,413
	0,25	49,247	52,804	56,204	62,632	62,664
	0,20	51,942	55,591	59,079	65,653	65,665
$\Pi_{в4e}^*$ (див. рис. 4,б)	0,30	46,079	49,303	52,382	55,339	58,193
	0,25	48,275	51,555	54,702	57,721	60,532
	0,20	51,208	54,606	57,844	60,947	63,936

Продовж. табл. 2

Показник вартості, в. о.	Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, в. о.	Співвідношення вартості обмоткової міді та електротехнічної сталі				
		3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
P <sub>всc</sub> <sup>*</sup> (див. рис. 4, в)	0,30	45,309	48,45	51,449	54,329	57,106
	0,25	47,489	50,705	53,771	56,713	59,547
	0,20	50,442	53,758	56,916	59,942	62,855

З табл. 1 і 2 також впливає, що максимальної відповідності критерію мінімуму маси можна досягти використанням ЕМС (див. рис. 3, в), а мінімальну вартість забезпечує ЕМС (див. рис. 4, а) з магнітопроводом (див. рис. 4, в). Перевагою радіальної ЕМС (див. рис. 4, а) відносно аксіальних аналогів (див. рис. 2, 3) є більш прості та технологічні різновиди конструкції витого магнітопроводу (див. рис. 4, в і в). Однак симетричні аксіальні просторові ЕМС відрізняються від планарних та радіальних ЕМС симетрією топології «векторного магнітного моменту», а їх варіанти (див. рис. 2, 3) надають можливість створення, без додаткових пристроїв магнітної компенсації, умов мінімуму

зовнішнього магнітного поля (електромагнітної суцільності) ТТ [1, 9].

### ВИСНОВОК

Виконані оптимізаційні розрахунки показують, що при застосуванні варіантів просторових трифазних ЕМС з шестигранными перерізами стрижнів стикових магнітопроводів з витими елементами додатково до суттєвого підвищення компактності можна досягнути 7,0...8,2 і 11,0...13,6 % зниження відповідно маси та вартості активної частини ТТ або реактора з мідними обмотками відносно планарного аналога з прямокутними зовнішнім контуром та перерізами стрижнів магнітопроводу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Авдеева, Е. А. Способы обеспечения электромагнитной совместимости трехфазных трансформаторов [Текст] / Е. А. Авдеева // Підводна техніка і технологія : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв : НУК, 2013. – С. 39–45.
- [2] Авдеева, Е. А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими стержней и обмоточных окон (массо-стоимостные показатели) [Текст] / Е. А. Авдеева // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 4. – С. 15–20.
- [3] Белопольский, И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности [Текст] / И. И. Белопольский, Е. И. Каретникова, Л. Г. Пикалова. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
- [4] Веселовский, О. Н. У истоков электромеханики. Столетие трансформатора [Текст] / О. Н. Веселовский, И. П. Копылов // Електротехніка. – 1984. – № 11. – С. 62–63.
- [5] Кравченко, А. Масляные энергосберегающие трансформаторы [Текст] / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик : междунар. электротехн. журнал. – К. : Радиоаматор, 2013. – № 5. – С. 14–17.
- [6] Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В. А. Бормосов, М. Н. Костоусова, А. Ф. Петренко, Н. Е. Смольская. – Режим доступа: www.transform.ru.
- [7] Ставинский, А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнітопроводами) [Текст] / А. А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 43–47.
- [8] Ставинский, А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнітопроводами) [Текст] / А. А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 6. – С. 33–38.
- [9] Ставинский, А. А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин [Текст] / А. А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 44–48.
- [10] Ставинский, А. А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Плхтырь, Р. А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 79–82.
- [11] Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

© О. А. Авдеева

Надійшла до редколегії 25.03.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський