

УДК 621.314+621.316

**А. А. Ставинский**, д-р техн. наук,  
**Р. А. Ставинский**, канд. техн. наук,  
**Е. А. Авдеева**

### **СРАВНЕНИЕ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНЫХ ПЛАНАРНОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АКСИАЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ СЕЧЕНИЯМИ СТЕРЖНЕЙ**

*Аннотация.* Получены аналитические зависимости для определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также показаны преимущества нетрадиционных конструкций трехфазных планарной и пространственной аксиальной статических электромагнитных систем с комбинированными стыковыми магнитопроводами по сравнению с традиционной конструкцией с прямоугольным внешним контуром и сечениями стержней планарного магнитопровода.

*Ключевые слова:* планарный, пространственный, статическая электромагнитная система, прямоугольный, шестигранный, образующий контур, стыковый магнитопровод, относительный показатель, технический уровень, масса, стоимость, управляемая переменная, оптимизация

**A. A. Stavinskiy**, ScD.,  
**R. A. Stavinskiy**, PhD.,  
**E. A. Avdieieva**

### **THE COMPARISON OF MASS AND PRICE INDICATORS OF THREE-PHASE PLANAR AND SPATIAL AXIAL STATIC ELECTROMAGNETIC SYSTEMS WITH RECTANGULAR AND HEXAGONAL SECTIONS OF RODS**

*Abstract.* Analytical dependences of the optimal geometric relationship determination to the minimum weight and cost criteria's of the active part obtained. The benefits of non-traditional construction of tree-phase planar and spatial axial static electromagnetic systems with combined butt magnetic cores relatively to the traditional construction with rectangular outer contour and section of rod of planar magnetic core are shown.

*Keywords:* planar, spatial, static electromagnetic system, rectangular, hexagonal, forming contour, butt magnetic core, relative indicator, technical level, weight, cost, controlled variable, optimization

**А. А. Ставинський**, д-р техн. наук,  
**Р. А. Ставинський**, канд. техн. наук,  
**О. А. Авдєєва**

### **ПОРІВНЯННЯ МАСОВАРТИСНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРИФАЗНИХ ПЛАНАРНОЇ І ПРОСТОРОВОЇ АКСІАЛЬНОЇ СТАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З ПРЯМОКУТНИМИ І ШЕСТИГРАНИМИ ПЕРЕРІЗАМИ СТРИЖНІВ**

*Анотація.* Отримані аналітичні залежності для визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси та вартості активної частини, а також показані переваги нетрадиційних конструкцій трифазних планарної і просторової аксіальної статичних електромагнітних систем з комбінованими стиковими магнітопроводами відносно традиційної конструкції з прямокутним зовнішнім контуром та перерізами стрижнів планарного магнітопроводу.

*Ключові слова:* планарний, просторовий, статична електромагнітна система, прямокутний, шестигранний, утворюючий контур, стиковий магнітопровід, відносний показник, технічний рівень, маса, вартість, керована змінна, оптимізація

**Введение.** Неотложность решения задач энергоресурсосбережения при непрерывном увеличении потребления электроэнергии требует максимальной экономии в производстве и эксплуатации индукционных статических устройств (ИСУ) различного назначения. Известные недостатки доведенных в течение XX века до практической неизмен-

ности «традиционных» структур статических электромагнитных систем (ЭМС) создают необходимость их конструктивно-структурного преобразования с целью усовершенствования ИСУ [2, 5].

Традиционно вопросы энергоресурсосбережения при разработке трансформаторов и реакторов решаются на основе новых электротехнических материалов [3,4,8]. Кроме того, при неизменных планарных конструк-

© Ставинский А.А., Ставинский Р.А.,  
Авдеева Е.А., 2013

тивных схемах ЭМС в большинстве ИСУ снижались добавочные потери усовершенствованием и усложнением технологических процессов изготовления магнитопроводов и обмоток. В частности, в передовых европейских производствах трансформаторов используется весьма затратная технология «Step-lap» сборки планарных шихтованных магнитопроводов с «косыми» стыками [3, 4]. Ведущие изготовители трансформаторов ФРГ и Японии в сериях Tumetic и OSM отказались от ступенчатых сечений стержней и ярем, что позволило до 35 и 6 % соответственно снизить трудозатраты при изготовлении ЭМС и массу магнитопровода за счет уменьшения межосевого расстояния стержней. Также в трансформаторах серии OSM применяются витые разрезные магнитопроводы с травлением и полировкой зон стыков. Перспективным направлением решения задач новых разработок трехфазных трансформаторов мощностью 25 ... 630 кВА определено создание пространственных разъемных магнитопроводов с витыми элементами, в которых достигается наибольший эффект применения новых высокопроницаемых анизотропных и аморфных ЭТС [3]. Кроме того, существенным резервом энергосбережения считаются разработки трансформаторов с обмотками из высокотемпературных сверхпроводников [9] и рабочими частотами 300- 800 Гц [10]. Конструкции ЭМС в таких изделиях остаются неизменными и соответствуют разработкам [4, 8]. Поэтому имеются возможности усовершенствования ИСУ на основе нетрадиционных и пространственных конфигураций и структур обмоток и магнитопроводов [5, 6].

**Цель работы** – сравнение показателей массы и стоимости двух «нетрадиционных» структур и конструкций трехфазных ЭМС ИСУ и аналогичных показателей [1] традиционной планарной ЭМС.

На рис. 1, а представлена конструктивная схема планарной ЭМС с прямоугольными сечениями и образующими контурами (ОК) стержней и обмоточных катушек. Магнитопровод (рис. 1, б) содержит симметричные боковые элементы, образованные разрезанием витой заготовки и средний элемент.

(рис. 1, б) сечении каждого стержня средний элемент магнитопровода набирается из идентичных пластин ЭТС и представляет часть витой разрезной заготовки. От известных конструкций шихтованного и витого трехфазных магнитопроводов прямоугольной конфигурации [1,4,8] магнитопровод ЭМС (рис. 1, а) отличается меньшей массой (за счет округлений боковых элементов).

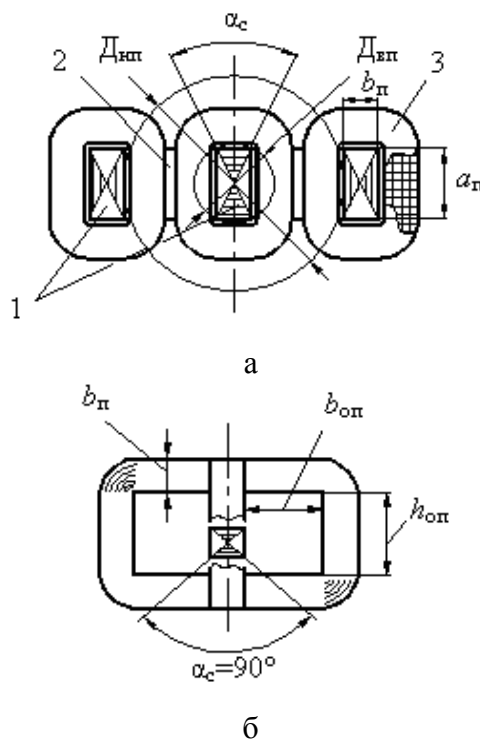


Рис. 1. Поперечная структура (а) и схема магнитопровода (б) планарной электромагнитной системы с комбинированным стыковым магнитопроводом: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки.

Добавочные потери в зоне сопряжения взаимно перпендикулярных слоев ЭТС в стыках магнитопровода (рис. 1, б) устраняются установкой изоляционных прокладок, являющихся необходимыми конструктивными элементами ненасыщенных реакторов (дресселей). В трансформаторах тонкие изоляционные прокладки в стыках разрушаются магнестрикцией. Поэтому проблема их изолировки должна решаться прочными термостойкими покрытиями, используемыми для изоляции проката ЭТС.

В аксиальной пространственной ЭМС (рис. 2) шихтованные из плоских идентичных пластин (листов) ЭТС стержни и обмоточные катушки установлены между двумя

витыми ярами (рис. 2, а) и выполнены с шестигранными конфигурациями соответственно наружного контура и ОК витков (рис. 2, б). Шестигранная конфигурация повышает коэффициент заполнения ОК сечения стержня до  $K_{кш} \approx 1$  [6] и компактность, а также снижает трудоемкость производства ЭМС (рис. 2) относительно пространственной ЭМС со стержнями из эвольвентно изогнутых пластин (листов) или пакетов ЭТС различной ширины [8].

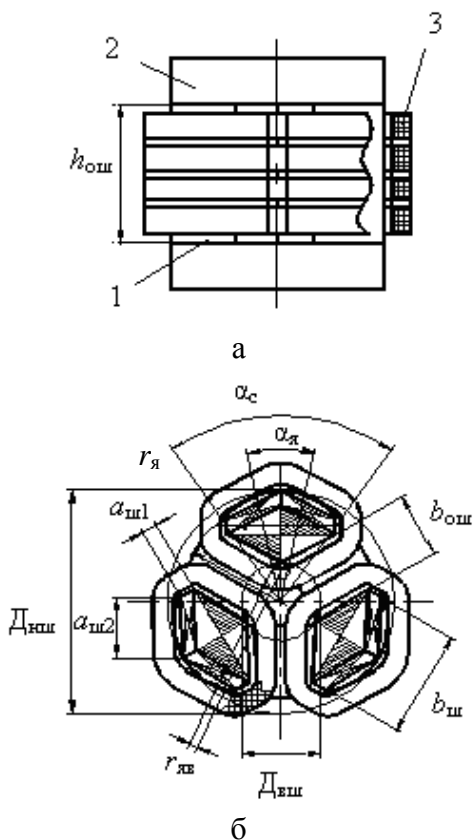


Рис. 2. Вид сбоку (а) и поперечная структура (б) пространственной электромагнитной системы с комбинированным стыковым магнитопроводом: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Сравнительный анализ вариантов ЭМС выполняется в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности на основе определения экстремумов унимодальных целевых функций  $F_{цм(с)}$  массы (стоимости) с относительными показателями массы (стоимости)  $\Pi_{м(с)а}^*$  активной части индукционного преобразователя [1, 7]

$$F_{цм(с)} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{ит(р)}} \right)^3 K_{м(с)} \Pi_{м(с)а}^*, \quad (1)$$

где  $\Pi_{ит(р)}$  – показатель исходных данных (технического задания и электромагнитных нагрузок) трансформатора;  $K_{м(с)}$  – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов.

Показатель  $\Pi_{м(с)а}^*$  является функцией соответствующего класса напряжения, коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом  $K_{зо}$  и зависящих от расчетных параметров  $D_{нп(ш)}$ ,  $D_{вп(ш)}$ ,  $h_{оп(ш)}$ ,  $b_{оп(ш)}$  ЭМС (рис. 1, рис. 2) основных относительных  $a_m$ ,  $\lambda_o$  и дополнительной  $\alpha_c$  геометрических управляемых переменных (УП):

$$\Pi_{м(с)а}^* = f(K_{зо}, a_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (2)$$

$$a_m = D_{нп(ш)} / D_{вп(ш)}; \quad (3)$$

$$\lambda_o = h_{оп(ш)} / b_{оп(ш)}. \quad (4)$$

Определение функций (1), (2) выполняется на основе уравнений связи площади ЭТС поперечного сечения стержня  $S_{сп(ш)}$  с площадью обмоточного окна  $S_{оп(ш)}$ , а также массы обмотки  $m_{оп(ш)}$  планарной (пространственной) ЭМС (рис. 1, а, рис. 2) [1, 7]

$$S_{сп(ш)} = \Pi_{ит(р)} / (K_{зо} S_{оп(ш)}); \quad (5)$$

$$m_{оп(ш)} = 1,5 \gamma_o K_{зо} S_{оп(ш)} l_{вп(ш)}, \quad (6)$$

где  $\gamma_o$  – плотность проводящего материала обмоточного провода;  $l_{вп(ш)}$  – средняя длина витка чередующейся или эквивалентной обмотки трансформатора.

При сравнительном анализе рассматриваемых вариантов планарной и пространственной ЭМС на основе (1) и (2) используются известные допущения [1, 7].

Обоснование вида уравнений (1) и (2) соответствующих ЭМС (рис. 1, а) выполняется с использованием геометрических параметров стержня (рис. 1, а и б):

$$a_{п} = D_{вп} \cos(\alpha_c / 2); \quad (7)$$

$$b_{п} = D_{вп} \sin(\alpha_c / 2). \quad (8)$$

Площадь ЭТС прямоугольного сечения стержня (рис. 1, а) определяется с использованием (7) и (8)

$$S_{сп} = K_{зс} a_{п} b_{п} = K_{зс} \left( D_{вп}^2 / 2 \right) \sin \alpha_c, \quad (9)$$

где  $K_{зс}$  – коэффициент заполнения магнитопровода ЭТС [4, 8].

Ширина обмоточного окна определяется в соответствии с рис. 1, а и (8)

$$b_{оп} = (D_{нп}/2) - (b_{п}/2) = D_{вп} \times [a_m - \sin(\alpha_c/2)]/2. \quad (10)$$

Масса ЭТС магнитопровода (рис. 1, б) определяется на основе (5) и (8) – (10)

$$m_{мп} = \gamma_c [3h_{оп}S_{сп} + 4b_{оп}S_{сп} + \pi b_{п}S_{сп}] = K_{зс} \gamma_c D_{вп}^3 f_{1п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (11)$$

где  $\gamma_c$  – плотность ЭТС магнитопровода, а функция

$$f_{1п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) = \left[ \left( a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \times \left( 1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) + \frac{\pi}{2} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c.$$

На основе (4), (5) и (10) можно получить зависимость

$$S_{сп} = \frac{\Pi_{ит(р)}}{K_{зс} S_{оп}} = \frac{\Pi_{ит(р)}}{K_{зс} \lambda_o b_{оп}^2} = \frac{4\Pi_{ит(р)}}{K_{зс} \lambda_o D_{вп}^2 [a_m - \sin(\alpha_c/2)]^2}. \quad (12)$$

Из равенства левых частей (9) и (12) следует:

$$K_{зс} (D_{вп}^2/2) \sin \alpha_c = 4 \times \Pi_{ит(р)} / \left[ K_{зс} D_{вп}^2 \left( a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \right];$$

$$D_{вп} = \sqrt[4]{8\Pi_{ит(р)} / [K_{зс} K_{зс} f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)]}, \quad (13)$$

где функция

$$f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) = \lambda_o \left[ a_m - \sin \left( \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 \sin \alpha_c.$$

Учёт (13) преобразует уравнение массы (11) к виду

$$m_{мп} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ит(р)}} \right)^3 \Pi_{мп}^*, \quad (14)$$

где относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 1, а),

$$\Pi_{мп}^* = K_{зс} \left( \sqrt[4]{8/[K_{зс} K_{зс} f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)]} \right)^3 \times f_{1п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c). \quad (15)$$

Масса обмоточного провода ЭМС (рис. 1, а) представляется известным, в том числе из [1], выражением

$$m_{оп} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{ит(р)}} \right)^3 \Pi_{моп}^*, \quad (16)$$

где относительный показатель массы обмоточного провода

$$\Pi_{моп}^* = 0,75 K_{зс} \left( \sqrt[4]{8/[K_{зс} K_{зс} f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)]} \right)^3 \times f_{3п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (17)$$

а функция

$$f_{3п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) = \lambda_o \left( a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \left[ \sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left( a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right].$$

Масса  $m_{ап}$  и стоимость  $C_{ап}$  активных материалов ЭМС (рис. 1, а) определяются на основе (14), (15), (16), (17) выражениями:

$$m_{ап} = m_{мп} + m_{оп} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ит(р)}} \right)^3 \Pi_{мап}^*;$$

$$C_{ап} = C_{мп} + C_{оп} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ит(р)}} \right)^3 \Pi_{сап}^*,$$

где  $C_{мп}$  и  $C_{оп}$  – соответственно стоимость ЭТС магнитопровода и проводников системы обмоточных катушек,  $\Pi_{мап}^*$  и  $\Pi_{сап}^*$  – относительные показатели массы и стоимости

$$\Pi_{мап}^* = \left( \sqrt[4]{8/[K_{зс} K_{зс} f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)]} \right)^3 \times [K_{зс} f_{1п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) + 0,75 K_{зс} \times f_{3п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) \gamma_o / \gamma_c]; \quad (18)$$

$$\Pi_{сап}^* = \left( \sqrt[4]{8/[K_{зс} K_{зс} f_{2п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c)]} \right)^3 \times [K_{зс} f_{1п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) + 0,75 K_{зс} \times f_{3п}(a_m, \lambda_o, \alpha_c) \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c)]. \quad (19)$$

При фиксированном значении  $\alpha_c = 90^\circ$  выражения (18), (19) определяют целевые функции массы  $\Pi_{мап}^*$  и стоимости  $\Pi_{сап}^*$  планарной ЭМС с магнитопроводом рис. 1, б.

Результаты расчета экстремальных значений (минимумов)  $\Pi_{мапкэ}^*$ ,  $\Pi_{мапэ}^*$  и  $\Pi_{сапкэ}^*$ ,  $\Pi_{сапэ}^*$  функциональных зависимостей (18) и (19) приведены, в сравнении с аналогичными и полученными при указанных выше допущениях расчетными показателями  $\Pi_{маппэ}^*$  и  $\Pi_{саппэ}^*$  [1] ЭМС с традиционным планарным магнитопроводом прямоугольной формы и с прямоугольным сечением стержней, в таблицах 1 и 2. Показатели  $\Pi_{мапэ}^*$ ,  $\Pi_{сапэ}^*$ ,  $\Pi_{мапкэ}^*$ ,  $\Pi_{сапкэ}^*$  и  $\Pi_{маппэ}^*$ ,  $\Pi_{саппэ}^*$  определены при использовании медного обмоточного провода и соотношений плотностей ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )  $\gamma_o/\gamma_c=8,9/7,65$  и стоимостей  $C_o/C_c=3,5 \dots 5,5$ , а также при  $K_{зс}=0,97$ .

Радиальная длина стержня  $l_{ш}$  и высота обмоточного окна  $h_{ош}$  ЭМС (рис. 2):

$$l_{ш} = (D_{нш} - D_{вш})/2 = D_{вш} (a_m - 1)/2; \quad (20)$$

$$h_{\text{ош}} = \lambda_o b_{\text{ош}} = \sqrt{3} \lambda_o D_{\text{вш}} / 2, \quad (21)$$

где ширина обмоточного окна

$$b_{\text{ош}} = D_{\text{вш}} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{\text{вш}} / 2. \quad (22)$$

Ширина стержня магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяется посредством геометрических параметров  $D_{\text{вш}}$  и  $\alpha_c$ , а также (20)

$$b_{\text{ш}} = 2(0,5D_{\text{вш}} + 0,5l_{\text{ш}}) \text{tg}(\alpha_c/2) = 0,5D_{\text{вш}}(a_m + 1) \text{tg}(\alpha_c/2). \quad (23)$$

Стороны  $a_{\text{ш1}}$  и  $a_{\text{ш2}}$  шестигранного образующего контура сечения стержня определяются на основе (20) и (23):

$$a_{\text{ш1}} = l_{\text{ш}} - b_{\text{ш}} \text{tg}(\pi/6) = 0,5D_{\text{вш}} \times \left[ a_m \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{tg} \frac{\alpha_c}{2} \right) - 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{tg} \frac{\alpha_c}{2} \right]; \quad (24)$$

$$a_{\text{ш2}} = b_{\text{ш}} / \left( 2 \sin \frac{\pi}{3} \right) = D_{\text{вш}}(a_m + 1) \times \text{tg}(\alpha_c/2) / (2\sqrt{3}). \quad (25)$$

Площадь ЭТС сечения стержня ЭМС (рис. 2) определяется с использованием (23), (24) и (25)

$$S_{\text{сш}} = K_{\text{зс}} [a_{\text{ш1}} b_{\text{ш}} + a_{\text{ш2}} b_{\text{ш}} \sin(\pi/6)] = K_{\text{зс}} D_{\text{вш}}^2 f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c) / 4, \quad (26)$$

где функция

$$f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c) = (a_m + 1) \times \left[ a_m - 1 - (a_m + 1) \text{tg}(\alpha_c/2) / (2\sqrt{3}) \right] \text{tg}(\alpha_c/2).$$

Радиус угловой зоны наружного контура ярма  $r_{\text{я}}$  в ЭМС (рис. 2) увеличивается с увеличением радиуса  $r_{\text{яв}}$  и величины угла округления угловой зоны внутреннего контура ярма  $\alpha_{\text{я}} = 1 \dots 8^\circ$  ( $\alpha_{\text{я}}$  уменьшается при повышении мощности ИСУ)

$$r_{\text{я}} = r_{\text{яв}} + l_{\text{ш}}. \quad (27)$$

Радиус  $r_{\text{яв}}$  определяется по рис. 2, б:

$$0,5D_{\text{вш}} = r_{\text{яв}} \sin(\pi/3) \text{ctg}(\alpha_{\text{я}}/2) + r_{\text{яв}} \sin(\pi/6);$$

$$r_{\text{яв}} = K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{вш}}, \quad (28)$$

где коэффициент

$$K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) = 1 / [1 + \sqrt{3} \text{ctg}(\alpha_{\text{я}}/2)].$$

После подстановки (20) и (28), выражение (27) преобразуется к виду

$$r_{\text{я}} = K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) D_{\text{вш}} + D_{\text{вш}}(a_m - 1) / 2 = D_{\text{вш}} [K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + (a_m - 1) / 2]. \quad (29)$$

Площадь ЭТС сечения  $\Pi_{\text{я}}$  и высота  $h_{\text{я}}$  ярма магнитопровода ЭМС (рис. 2) при условии равенства средних значений амплитуды

индукции стержня и ярма определяются с использованием (20) и (26):

$$h_{\text{я}} = \Pi_{\text{я}} / l_{\text{ш}} = S_{\text{сш}} / (\sqrt{3} l_{\text{ш}}) = K_{\text{зс}} D_{\text{вш}} f(a_m, \alpha_c) / [2\sqrt{3}(a_m - 1)]. \quad (30)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяется на основе (4), (20 – 22), (26) и (28 – 30)

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c [3S_{\text{сш}} h_{\text{ош}} + 6l_{\text{ш}} b_{\text{ош}} h_{\text{я}} + 2\pi(r_{\text{я}}^2 - r_{\text{яв}}^2) h_{\text{я}}] = 0,75\gamma_c K_{\text{зс}} D_{\text{вш}}^3 f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c) + f_{\text{ш}}(a_m, \alpha_{\text{я}}), \quad (31)$$

где функция

$$f_{\text{ш}}(a_m, \alpha_{\text{я}}) = 2,4184 \times \left\{ [K_{\text{ш}}(\alpha_{\text{я}}) + (a_m - 1) / 2]^2 / (a_m - 1) \right\}.$$

Зависимость (5) для ЭМС (рис. 2) на основе (4) и (22) преобразуется к такому виду:

$$S_{\text{сш}} = \Pi_{\text{ит(р)}} / (K_{\text{зо}} \lambda_o b_{\text{ош}}^2) = 4\Pi_{\text{ит(р)}} / (3K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{вш}}^2). \quad (32)$$

Из равенства (26) и (33) следует:

$$4\Pi_{\text{ит(р)}} / (3K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{вш}}^2) = K_{\text{зс}} D_{\text{вш}}^2 f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c) / 4;$$

$$D_{\text{вш}} = 2\sqrt[4]{\Pi_{\text{ит(р)}} / [3K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c)]}. \quad (33)$$

Подстановкой (33), (31) преобразуется

$$m_{\text{мш}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ит(р)}}} \right)^3 \Pi_{\text{мш}}^*, \quad (34)$$

где относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 2)

$$\Pi_{\text{мш}}^* = 6K_{\text{зс}} \left( \sqrt[4]{1 / [3K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_o f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times f_{\text{ш1}}(a_m, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + f_{\text{ш}}(a_m, \alpha_{\text{я}})]. \quad (35)$$

Средняя длина витка каждой из фазных катушек ЭМС (рис. 2) определяется на основе (22), (24) и (25)

$$l_{\text{вш}} = 2a_{\text{ш1}} + 4a_{\text{ш2}} + \pi b_{\text{ош}} / 2 = D_{\text{вш}} \times \left[ \sqrt{3} a_m + (a_m + 1) \text{tg}(\alpha_c/2) + 0,6242 \right] / \sqrt{3}. \quad (36)$$

С использованием (4) и (22), а также подстановки (36) уравнение (6) представляется в виде

$$m_{\text{ош}} = 1,5\gamma_o K_{\text{зо}} \lambda_o b_{\text{ош}}^2 l_{\text{вш}} = 0,6495\gamma_o K_{\text{зо}} \lambda_o D_{\text{вш}}^3 f_{\text{ш2}}(a_m, \alpha_c), \quad (37)$$

где функция

$$f_{\text{ш2}}(a_m, \alpha_c) = \left[ \sqrt{3} a_m + (a_m + 1) \text{tg}(\alpha_c/2) + 0,62414 \right].$$

Подстановка (33) преобразует (37)

$$m_{\text{ош}} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ит(р)}}} \right)^3 \Pi_{\text{мош}}^*, \quad (38)$$

где относительный показатель массы обмоточного провода ЭМС (рис. 2)

$$\Pi_{\text{мош}}^* = 5,196K_{30}\lambda_o \times \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{30}\lambda_o f_{ш1}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 f_{ш2}(a_m, \alpha_c). \quad (39)$$

Масса  $m_{\text{аш}}$  и стоимость  $C_{\text{аш}}$  активных материалов ЭМС (рис. 2) представляются на основе (34), (35), (38), (39) выражениями:

$$m_{\text{аш}} = m_{\text{мш}} + m_{\text{ош}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ит(р)}}^*} \right)^3 \Pi_{\text{маш}}^* ;$$

$$C_{\text{аш}} = C_{\text{мш}} + C_{\text{ош}} = \gamma_c C_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ит(р)}}^*} \right)^3 \Pi_{\text{саш}}^* ,$$

где относительные показатели массы и стоимости

$$\Pi_{\text{маш}}^* = 6 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{30}\lambda_o f_{ш1}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \{ K_{3c} f_{ш1}(a_m, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + f_{ш}(a_m, \alpha_y)] + 0,866K_{30}\lambda_o f_{ш2}(a_m, \alpha_c) \gamma_o / \gamma_c \}; \quad (40)$$

$$\Pi_{\text{саш}}^* = 6 \left( \sqrt[4]{1/[3K_{3c}K_{30}\lambda_o f_{ш1}(a_m, \alpha_c)]} \right)^3 \times \{ K_{3c} f_{ш1}(a_m, \alpha_c) [1 + 0,866\lambda_o + f_{ш}(a_m, \alpha_y)] +$$

$$+ 0,866K_{30}\lambda_o f_{ш2}(a_m, \alpha_c) \frac{\gamma_o C_o}{\gamma_c C_c} \}. \quad (41)$$

Результаты расчета экстремальных значений (минимумов)  $\Pi_{\text{машэ}}$  функциональной зависимости (40) полученной для трех значений  $\alpha_y=1^\circ, \alpha_y=3^\circ, \alpha_y=5^\circ$  в сравнении с показателями минимумов массы вариантов планарных ЭМС приведены в табл.1.

В табл. 2 представлены зависимости показателей стоимости традиционного [1] и преобразованных (рис. 1) вариантов планарной ЭМС, а также пространственной ЭМС (рис. 2) с  $\alpha_y=5^\circ$  от соотношения  $C_o/C_c$ .

Из выражений (40) и (41) следует, что в дополнение к УП  $a_m, \lambda_o$  и  $\alpha_c$  массостоймостные показатели ЭМС (рис.2) зависят также от значения угла  $\alpha_y$ . Величина  $\alpha_y$  определяется минимально допустимым радиусом округления вершин внутреннего контура ярма исходя из возможностей кольцевого перегиба под углом  $60^\circ$  ленты (рулона) ЭТС и уменьшается с повышением мощности ИСУ.

### 1. Оптимальные значения показателей массы вариантов электромагнитных систем

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о. е.	Показатель массы, о. е.					
	$\Pi_{\text{маппэ}}^*$	$\Pi_{\text{мапкэ}}^*$ , (рис. 1, б)	$\Pi_{\text{мапэ}}^*$ , (рис. 1, а)	$\Pi_{\text{машэ}}^*$ , (рис. 2)		
				$\alpha_y=1^\circ$	$\alpha_y=3^\circ$	$\alpha_y=5^\circ$
0,3	28,138	26,461	26,442	26,305	26,388	26,469
0,25	29,692	28,015	27,999	27,812	27,904	27,992
0,2	31,797	30,119	30,107	29,853	29,956	30,056

### 2. Оптимальные значения показателей стоимости вариантов электромагнитных систем

Показатель стоимости, о.е.	Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Соотношение стоимостей обмоточной меди и электротехнической стали, о.е.				
		3,5	4	4,5	5	5,5
$\Pi_{\text{саппэ}}^*$	0,3	51,652	55,503	59,19	62,739	66,171
	0,25	53,778	57,701	61,454	65,064	68,551
	0,2	56,658	60,678	64,52	68,212	71,776
$\Pi_{\text{сапкэ}}^*$ , (рис. 1, б)	0,3	48,334	51,835	55,185	58,405	61,516
	0,25	50,459	54,033	57,447	60,729	63,896
	0,2	53,338	57,009	60,513	63,876	67,119
$\Pi_{\text{сапэ}}^*$ , (рис. 1, а)	0,3	47,416	50,815	54,063	57,186	60,201
	0,25	49,549	53,021	56,336	59,52	62,591
	0,2	52,438	56,008	59,413	62,68	65,828
$\Pi_{\text{сашэ}}^*$ , $\alpha_y=5^\circ$ , (рис. 2)	0,3	48,706	52,275	55,69	58,976	62,151
	0,25	50,792	54,433	57,913	61,259	64,488
	0,2	53,619	57,356	60,923	64,349	67,654

Из таблиц 1 и 2 следует, что ЭМС (рис. 1, а и рис. 2) отличаются от планарной ЭМС с прямоугольными образующими контурами [4, 8] лучшими показателями по массе и стоимости. Из них также следует, что величина  $\alpha_c = 90^\circ$  незначительно ухудшает эти показатели ЭМС с магнитопроводом рис. 1, б относительно ЭМС рис. 1, а, а ЭМС рис. 2 с  $\alpha_{я} < 5^\circ$  характеризуется незначительно улучшенными массостойкими показателями относительно ЭМС рис. 1. При этом зависимости (18) и (19) получены при пренебрежении радиусом изгиба на  $90^\circ$  первого витка ЭТС на внутреннем контуре боковых элементов, который составляет  $r_b \geq 0,5$  мм. Указанный изгиб несколько увеличивает минимальные значения искомых показателей ЭМС (рис. 1, а) по сравнению с приведенными в таблицах 1 и 2. Поэтому оптимальные значения массы и стоимости электромагнитно – эквивалентных ЭМС рис. 1, а и ЭМС рис. 2 с  $\alpha_{я} = 5^\circ$  практически совпадают. Формирование первых внутренних витков ЭТС ярем ИСУ малой мощности на основе ЭМС рис. 2 с  $\alpha_{я} < 5^\circ$  и толщиной ЭТС  $\delta \geq 0,35$  мм достаточно сложно, а использование магнитопроводов с витыми стыковыми элементами рис. 1, б ограничено размерами сечений стержней и режущего инструмента.

На основе изложенного можно утверждать, что ЭМС рис. 1, а является более предпочтительной для производства ИСУ малой мощности, в частности трехфазных дросселей, а применение ЭМС рис. 2 обеспечит повышение технического уровня трехфазных специальных компактных и распределительных трансформаторов в диапазоне мощностей до 630 кВА, а также реакторов.

#### Выводы

1. Показана возможность объективного, при соблюдении принципов электромагнитной эквивалентности и идентичности УП, сравнительного анализа различных вариантов технических решений статических ЭМС на основе метода относительных показателей и обобщенных геометрических УП.

2. Трехфазные планарная и пространственная аксиальная электромагнитная системы с вариантами стыковых магнитопроводов и медными обмотками отличаются от электромагнитно-эквивалентного планарного аналога

традиционной конструкции с прямоугольным внешним контуром и сечениями стержней улучшенными показателями массы и стоимости соответственно на 6,5 и 7 %.

#### Список использованной литературы

1. Авдеева Е. А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массостойкие показатели) [Текст] // *Электротехника і електромеханіка.* – 2012. – № 4. – С.15 – 20.
2. Коновалов О. А. Основные технические требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях [Текст] / О. А. Коновалов, В. Н. Подъячев // *Энергетик.* – 2010. – № 8. – С. 29 – 31.
3. Бормосов В. А. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В. А. Бормосов, М. Н. Костусова, А. Ф. Петренко, Н. Е. Смольская // Режим доступа: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article>. (13.09.2004).
4. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
5. Ставинский А. А. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромагнитных и статических преобразователей [Текст] / А. А. Ставинский, И. А. Тищенко, Н. И. Зеленый // *Электротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2010. – № 1(77). – С. 64 – 69.
6. Ставинский А. А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров [Текст] / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева // *Электротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2013. – № 11(87). – С. 74 – 81.
7. Ставинский А. А. Показатели качества и структурной оптимизации электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Плахтырь, Р. А. Ставинский // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2003. – № 4. – С.79 – 82.

8. Flanagan W. M. Handbook of Transformers Design and Applications [Текст] / W. M. Flanagan. – Boston: Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.

9. Hata H. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock [Текст] / Hata H., Kamijo H., Fujimoto H., Nagashima K. // Electrical Engineering Research Report. – 2005. – № 20. – Pp. 52 – 56.

10. Pefkov R. Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer [Текст] / R. Pefkov // Transactions on Power Electronics, IEEE. – 1996. – No. 11(1). – P. 33 – 42.

11. Vincenzini P., and Rigamonti A. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock, (2006), *Railway Technical Research Institut*, (In Japan), Vol. 47, Issue 1, pp. 24 – 27, doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.47.204.

12. Petkov R. Optimum Design of a High-power, High-frequency Transformer, (1996), *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol.11, Iss. 1, url: <http://95.25.47.1/scimag4/10.1109/63.484414.pdf>.

13. Zhang Z., Gao C., and Wang Y. Research on Calculation of Transformer's Parameters with Modern Information Technology (Conference Paper), (2011), *International Conference on Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education, CSEE 2011*, Vol. 217, CCIS, Iss. PART 4, pp. 148 – 153. ISSN: 18650929. ISBN: 978-364223338-8 Source Type: Book series Original language: English, doi: 10.1007/978-3-642-23339-5\_27 Document Type: Conference Paper. URL: <http://sci-hub.org/pdfcache/3f78dc5a77252a37050bed09916ff09d.pdf>

14. Amoiralis E.I.a , Georgilakis P.S.a , Tsili M.A.b , Kladas A.G.b , and Souflaris A.T.c. A Complete Software Package for Transformer Design Optimization and Economic Evaluation Analysis, *Conference Paper*, (2011), Vol. 670, pp. 535 – 546. ISSN: 02555476. ISBN: 978-087849215-2. CODEN: MSFOE Source. Type: Book series Original language: English, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.670.535 Document Type: Conference Paper. URL: <http://users.ntua.gr/pgeorgil/Files/J53.pdf>.

15. El Hayek, J. Transformer Design as a key for Efficiency Optimization, (2010), Conference Paper, *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010; Rome; Italy; 6 September 2010 Through 8 September 2010;*

*Category number CFP1090B; Code 82728.* ISBN: 978-142444175-4 Source Type: Conference Proceeding Original language: English, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607734 Document Type: Conference Paper. URL: <http://sci-hub.org/pdfcache/94f4488e2e73345a49cfab359a9b35.pdf>.

Получено 03.09.2013

#### References

1. Avdieieva E.A. Sravnitelnyi analiz planarnoi i pronstranstvennoi aksialnoi trehfaznih elektromagnitnih sistem s parallelnimi obrazuyuschimi poverhnostjami stergnei i obmotochnih okon (massostoimostnie 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)], (2012), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ*, Vol. 4, pp. 15 – 20 (In Russian).

2. Konovalov O., and Podyachev V.N. Osnovnie tehicheskie trebovaniya k transformatorno-reaktornomu oborudovaniju v sovremennih usloviyah [The Main Technical Requirements for the Transformer and Reactor Equipment in Modern Conditions], (2010), *Energetic Publ.*, Vol. 8, pp. 29 – 31 (In Russian).

3. Bormosov V.A., Kostousov M.N, Petrenko A.F., and Smolskaya N.E. Perapektivi I sostojanie razrabotok raspredelitelnih transformatorov massovih serij [Prospects and Status of Development of Mass Series Distribution Transformers], (In Russian), available at: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (accessed: 13 September 2004).

4. Lizunova S.D., and Lohanina A.K. Silovie transformatori. Spravochnaja kniga [Power Transformers. Handbook], (2004), *Energoatomizdat Publ.*, Moscow, Russian Federation (In Russian).

5. Stavinskiy A.A., Tischenco I.A., and Zelenyi N.I. Perspektivy i osobennosti dal'neishogo usovershenstvovaniya induktsionnykh elektromekhanicheskikh i staticheskikh preobrazovatelei [Prospects and Features Improvement of Induction Electromechanical and Static Transformers], (2010), *Electromechanic and Computer Systems Publ.*, No. 1(77), pp. 64 – 69 [In Russian].

6. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A. and Avdieieva E.A. Formirovanie struktur staticheskikh elektromagnitnih sistem na osnove netraditsionnih



obrazujuschih konturov [The Structural Conversion of Static Electromagnetic Systems (Variants and Possibilities of Improvement)], (2013), *Electromechanic and Computer Systems Publ.*, Vol. 11(87), pp. 74 – 81 (In Russian).

7. Stavinskiy A.A., Plahtir O.O., and Stavinskiy R.A. Pokazateli kachestva I strukturnoi optimizatsii elektromagnitnih sistem trehfaznih transformatorov, reaktorov I drosselej [The Quality and Structural Optimization Indicators of Electromagnetic Systems of Three-phase Transformers, Reactors and Chokes], (2003), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ.*, Vol. 4, pp. 79 – 82 (In Russian).

8. Flanagan W.M. *Handbook of Transformers Design and Applications*, (1993), Boston, *Mc Graw Hil* (In English).

9. Hata H., Kamijo H., Fujimoto H., and Nagashima K. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock., (2005). *Electrical Engineering Research Report Publ.*, Vol. 20, pp. 52 – 56 (In English).

10. Pefkov R. Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer, (1996), *Transactions on Power Electronics Publ., IEEE*, Vol. 11, No. 1, pp. 33 – 42 (In English).

11. Vincenzini P., and Rigamonti A. Development of a Superconducting Transformer for Rolling Stock, (2006), *Railway Technical Research Institut* (In Japan), Vol. 47, Issue 1, pp. 24 – 27, doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.47.204.

12. Petkov R. Optimum design of a high-power, high-frequency transformer, (1996), *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 11, Iss. 1, url: <http://95.25.47.1/scimag4/10.1109/63.484414.df>.

13. Zhang Z., Gao C., and Wang Y. Research on Calculation of Transformer's Parameters with Modern Information Technology (Conference Paper) (2011) *International Conference on Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education, CSEE 2011*, Vol. 217, CCIS, Iss. Part 4, pp. 148 – 153. ISSN: 18650929. ISBN: 978-364223338-8 Source Type: Book series Original language: English, doi: 10.1007/978-3-642-23339-5\_27 Document Type: Conference Paper.

URL: <http://sci-hub.org/pdfcache/3f78dc5a77252a37050bed09916ff09d.pdf>

14. Amoiralis E.I.a , Georgilakis P.S.a , Tsili M.A.b , Kladas A.G.b , and Souflaris A.T.c. A Complete Software Package for Transformer Design Optimization and Economic Evaluation Analysis, *Conference Paper*, (2011), Vol. 670, pp 535–546. ISSN: 02555476. ISBN: 978-087849215-2. CODEN: MSFOESource. Type: *Book series Original language: English*, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.670.535

*Document Type: Conference Paper.*

URL:<http://users.ntua.gr/pgeorgil/Files/J53.pdf>.

15. El Hayek, J. Transformer Design as a Key for Efficiency Optimization (2010), *Conference Paper, 19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010; Rome; Italy; 6 September 2010 through 8 September 2010; Category number CFP1090B; Code 82728*. ISBN: 978-142444175-4 Source Type: Conference Proceeding Original language: English, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607734 Document Type: Conference Paper.

URL: <http://sci-hub.org/pdfcache/94f4488e2e573485a49cfab359a9b35.pdf>.



Ставинский  
Андрей Андреевич,  
д-р техн. наук, проф, зав. каф.  
Нац. ун-та кораблестроения  
(НУК) им. адм. Макарова,  
54025 г. Николаев, пр. Героев  
Сталинграда 9,  
т. (0512) 36-02-27



Ставинский  
Ростислав Андреевич,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
электрооборудования судов и  
информационной безопасно-  
сти НУК им. адм. Макарова,  
т. (0512) 39-94-54



Авдеева  
Елена Андреевна,  
аспирант каф. электрообору-  
дования судов и информаци-  
онной безопасности НУК им.  
адм. Макарова,  
т. (0512) 39-94-54,  
e-mail: e.avdeeva@ukr.net