

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ВАРИАНТОВ ТРЕХФАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Олег Плахтырь

*Николаевский национальный аграрный университет
54020, г. Николаев, ул. Парижской коммуны, 9. E-mail: rain@yandex.ru*

Oleg Plakhtyr

*Nikolaev National Agrarian University
54020, Nikolaev, st. Paris Commune, 9. E-mail: rain@yandex.ru*

Аннотация. На основе относительных аналитических зависимостей показателей материалоемкости выполнен сравнительный анализ вариантов пространственных электромагнитных систем со стыковыми магнитопроводами, отличающимися типом технологии, конфигурацией и направлением магнитного потока стержней. Показаны преимущества магнитопроводов с параллельными стенками обмоточных окон.

Исследование характеристик АД с двухпакетной конструкцией ротора проведено аналитическим методом, основанным на использовании схем замещения. Расчеты на ЭВМ выполнены с применением методов последовательных приближений и линейно-кусочной аппроксимации 1-фазных намагничивания. Экспериментальные исследования распределения магнитного потока по длине проведены косвенным методом, путем измерения величин ЭДС, наводимых в специальных измерительных обмотках, расположенных в воздушных зазорах над шихтованным и массивным пакетами ротора.

Полученные в работе основные результаты доведены до уровня практического их использования. Они применены при проектировании ряда типоразмеров модификаций серийных АД с улучшенными пусковыми и регулировочными свойствами, предназначенными для электроприводов механизмов с большим моментом инерции, работающих в повторно-кратковременном режиме или требующих регулирования частоты вращения в условиях агрессивной или взрывоопасной окружающей среды.

Ключевые слова: пространственные электромагнитные системы, материалоемкость, обмоточные окна.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Согласно [1], основным направлением развития электромеханики в XXI веке является комплексное энергосбережение и всемирное внедрение ресурсосберегающих технологий. Одним из способов снижения материалоемкости и потерь в стали трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей является использование пространственной электромагнитной системы (ПЭМС) активной части [2, 3].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Однако используемые в ПЭМС средней и большой мощности [3, 4] конструкции и способы изготовления магнитопроводов технологически нерациональны для производства электромагнитных устройств малой мощности. В связи с этим, последние выполняются в плоских штампованном или витом вариантах, причем витые магнитопроводы (ВМ) по сравнению с шихтованными магнитопроводами (ШМ) согласно, например [5], являются более прогрессивными в части технологии и трудоемкости производства.

В [6, 7] предложены конструкции и разработаны массо-стоимостные модели вариантов ПЭМС нетрадиционной конфигурации с параллельными стенками обмоточных окон, отличающихся от трехфазных планарных аналогов меньшими массой и материалоемкостью [8]. Однако отсутствует сопоставление систематизированных в [4] традиционных и описанных в [4, 6, 7] новых ПЭМС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является сравнительный анализ материалоемкости от геометрических соотношений вариантов ПЭМС с шестигранной конфигурацией одного из контуров ярма. При этом указанные системы отличаются как геометрией стержней и катушек (прямоугольная, рис. 1, а и б и секторная, рис. 1, в), так и типом технологии (шихтовка листов и намотка ленты).

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для выполнения сравнительного анализа с соблюдением принципа электромагнитной эквивалентности целесообразно воспользоваться предположениями в [6, 7] геометрическими параметрами ПЭМС: отношением диаметров расчетных контурных окружностей $a = D_u / D_o$, отношением высоты и ширины обмоточного окна $\lambda_o = h_o / b_o$, центральным углом α_c граней стержня, а также коэффициентом k_u исходных данных (мощность S_n , частота сети f ; коэффициенты падения напряжения k_{U1} , k_{U2} ; энергетические показатели η , $\cos\phi_1$) и

электромагнитных нагрузок (средняя индукция стержня B_c и плотности тока первичной и вторичной обмоток Δ_1, Δ_2).

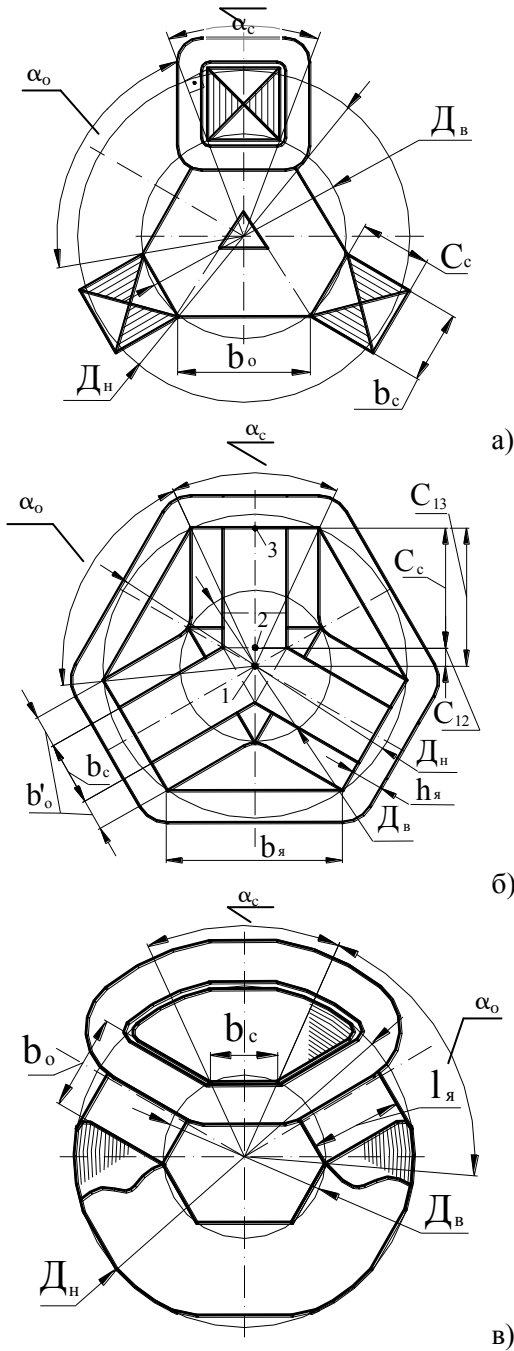


Рис.1. Варианты конфигурации и геометрические параметры пространственных стыковых электромагнитных систем:

- (а) шихтованными аксиальным;
- (б) радиальном; (в) аксиальным магнитопроводами

Fig.1. Configurations and geometrical parameters of the spatial jointed electromagnetic systems:

- (a) laminated axial;
- (b) radial;
- (c) twisted axially magnetic cores

При этом, в связи с необходимостью упрощения выкладок, считается, что средние витки катушек вариантов ПЭМС (рис. 1) при дисковой

конструкции обмоток расположены на расстояниях от стержня равных четверти ширины обмоточного окна, а внутренние радиусы изгиба катушек равны изоляционным промежуткам, учитываемым коэффициентом $k_{зо}$ заполнения обмоточного окна. Также согласно указанному принципу эквивалентности величины $k_u, k_{зо}$ и коэффициента $k_{зм}$ заполнения магнитопровода сталью принимаются соответственно идентичными для всех эквивалентных ПЭМС.

В схемах ПЭМС (рис. 1, а и в) с аксиальным направлением потока в стержнях элементы геометрии стержня b_c и окна b_o определяются выражениями :

$$b_c = D_e k_{\alpha 1}, \tag{1}$$

$$b_o = D_e \sin(\alpha_o/2) = D_e k_{\alpha 2}, \tag{2}$$

где: D_e – диаметр окружности шестигранного контура ярма; $k_{\alpha 1}$ и $k_{\alpha 2}$ – коэффициенты центральных углов α_c и α_o ,

$$k_{\alpha 1} = \sin(\alpha_c/2); k_{\alpha 2} = \sin[(\pi/3) - (\alpha_c/2)].$$

В аксиальном ШМ (рис. 1, а) диаметр D_n расчетной наружной контурной окружности связан со стержнем соотношением, определяющим связь стороны C_c с параметрами a и α_c посредством коэффициента $k_{\alpha 3}$:

$$(D_n - D_e)/2 = c_c \cos(\alpha_c/2);$$

$$k_{\alpha 3} = 1/[2 \cos(\alpha_c/2)];$$

$$C_c = D_e (a - 1) k_{\alpha 3}. \tag{3}$$

Площадь сечения стержня (рис. 1, а) определяется с учетом (1) и (3) выражением :

$$\Pi_c = b_c C_c = D_e^2 (a - 1) k_{\alpha 1} k_{\alpha 3}. \tag{4}$$

Ширина средней части ярма (рис. 1, а) может быть определена с учетом (2) в виде :

$$b_я = b_c \sin(\pi/3) = \sqrt{3} k_{\alpha 1} D_e / 2. \tag{5}$$

$$k_u = \frac{S_u}{6.66 f B_c} \left[\frac{k_{U1}}{\Delta_1 \eta \cos \phi_1} + \frac{k_{U2}}{\Delta_2} \right].$$

В соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности высота ярма определяется исходя из условия равенства площади стыка ярма и стержня площади сечения стержня :

$$h_я = \Pi_c / b_c. \tag{6}$$

При этом величина коэффициента соотношения индукций стержня и ярма :

$$k_e = \Pi_c / (\sqrt{3} h_я b_я).$$

Исходя из (4) и (5) выражение высоты ярма преобразуется к виду :

$$h_я = D_e (a - 1) k_{\alpha 3}. \tag{7}$$

На основе соотношения λ_o и (2), (4), (6) и (7) можно определить массу стали ШМ (рис. 1, а) :

$$m_{МША} = \gamma_c k_{3M} (3\Pi_c h_o + 6b_o b_r h_r + 6\Pi_c h_r) = C_c = C_{13} - C_{12} = 0.5 D_6 (ak_{\alpha 3} - k_{\alpha 1} / \sqrt{3});$$

$$= \gamma_c k_{3M} D_6^3 (a-1) k_{\alpha 1} k_{\alpha 3} \times$$

$$\times [3\lambda_o k_{\alpha 2} + 3(\sqrt{3}k_{\alpha 2} + 2(a-1)k_{\alpha 3})], \quad (8)$$

где: γ_c – плотность электротехнической стали.

Средняя длина витка катушки ПЭМС (рис. 1, а) определяется с учетом (1) - (3)

$$l_{WA} = 2(b_c + C_c + \pi b_o / 4) =$$

$$= 2D_6 [k_{\alpha 1} + 0.785k_{\alpha 2} + k_{\alpha 3}(a-1)]. \quad (9)$$

Согласно [3,4] площадь сечения Π_o обмоточного окна и масса m_o проводящего материала обмотки связаны с коэффициентом k_u выражениями :

$$\Pi_c = k_u / (k_{3o} k_{3M} \Pi_o), \quad (10)$$

$$m_o = 1.5 \gamma_o k_u l_W / \Pi_c, \quad (11)$$

где: γ_o – плотность материала обмотки.

С учетом (2) и соотношения λ_o , выражение (10) для ШМ (рис. 1, а) преобразуется к виду :

$$\Pi_{cША} = k_u / (k_{3o} k_{3M} \lambda_o b_o^2) =$$

$$= k_u / (k_{3o} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 D_6^2). \quad (12)$$

Исходя из (9), (11) и (12), а также соотношения λ_o выражение массы обмотки ПЭМС (рис.1, а) запишется в виде :

$$m_{oША} = 3\gamma_o k_{3o} k_{3M} \lambda_o \times$$

$$\times D_6^3 k_{\alpha 2}^2 [k_{\alpha 1} + 0.785k_{\alpha 2} + k_{\alpha 3}(a-1)]. \quad (13)$$

В ПЭМС (рис.1, б) с ШМ и радиальным направлением потока в стержнях ширина стержня b_c соответствует (1), а расчетная ширина обмоточного окна определяется выражением :

$$b_o = 2b_o' = D_6 (a-1) \sin(\alpha_c / 2) =$$

$$= k_{\alpha 1} D_6 (a-1), \quad (14)$$

где: D_n является диаметром окружности вписанного шестигранника внутреннего контура ярма, а в качестве D_6 принимается диаметр окружности, которая пересекает радиус окружности D_n на стороне боковой поверхности стержня.

Вспомогательные размеры C_{12} и C_{13} ШМ (рис. 1, б) определяются соотношениями :

$$C_{12} = 0.5b_c \operatorname{tg}(\pi/6) = b_c / (2\sqrt{3}); \quad (15)$$

$$C_{13} = 0.5D_n \cos(\alpha_c / 2) = 0.5k_{\alpha 3} a D_6, \quad (16)$$

где: $k_{\alpha 3}$ – дополнительный коэффициент центрального угла :

$$k_{\alpha 3} = \cos(\alpha_c / 2).$$

Высота и площадь сечения стержня определяется исходя из (рис. 1, б) и (1), (14) – (16), а также соотношения λ_o :

$$\Pi_c = b_c h_o = k_{\alpha 1} D_6 \lambda_o b_o = k_{\alpha 1}^2 \lambda_o D_6^2 (a-1). \quad (18)$$

Ширина и высота грани ярма (рис. 1, б) определяются с учетом (2), (14) и соотношений a и λ_o выражениями :

$$b_r = D_6 \sin(\alpha_o / 3) = k_{\alpha 2} a D_6, \quad (19)$$

$$h_r = k_6 \Pi_c / (\sqrt{3}h_o) = k_6 D_6 k_{\alpha 1} / \sqrt{3}. \quad (20)$$

Площадь треугольника внутреннего контура ярма также выражается, с учетом (1), через \ddot{A}_a ,

$$S_{\Delta} = \sqrt{3} b_c^2 / 4 = \sqrt{3} k_{\alpha 1}^2 D_6^2 / 4. \quad (21)$$

Масса радиального ШМ определяется на основе (1), (14), соотношения λ_o и (17) – (21) :

$$m_{МШР} = \gamma_c k_{3M} [3C_c \Pi_c + 3(b_c + b_o + b_r) \times$$

$$\times h_r h_o + \pi h_r^2 h_o + S_{\Delta} h_o] = \gamma_c k_{3M} D_6^3 k_{\alpha 1}^2 \lambda_o (a-1) \times$$

$$\times [1.5(ak_{\alpha 3} - k_{\alpha 1} / \sqrt{3}) + \sqrt{3}ak_6 (k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}) +$$

$$+ 0.433k_{\alpha 1} + 1.047k_6^2 k_{\alpha 1}]. \quad (22)$$

Средняя длина витка катушки ПЭМС (рис. 1, б) определяется с учетом (1) и (14) выражением :

$$l_{WP} = 2b_c + 2h_o + \pi b_o' = 2k_{\alpha 1} D_6 \times$$

$$\times [1 + (\lambda_o + 0.785)(a-1)]. \quad (23)$$

Высота участка окна, занимаемого катушками обмотки определяется с учетом (19) по рис. 1, б :

$$C_o = h_r / [2 \sin(\pi/3)] = k_{\alpha 2} a D_6 / \sqrt{3}. \quad (24)$$

На основе (14) и (23) выражение (10) площади сечения стержня конструкции (рис. 1, б) преобразуется к виду :

$$\Pi_{cШР} = \frac{k_u}{k_{3o} k_{3M} b_o C_o} =$$

$$= \frac{\sqrt{3}k_u}{k_{3o} k_{3M} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} a D_6^2 (a-1)}. \quad (25)$$

Исходя из (11), (23) и (25) масса обмотки ПЭМС (рис. 1, б) определяется в виде функции :

$$m_{oШР} = \sqrt{3} \gamma_o k_{3o} k_{3M} k_{\alpha 1}^2 k_{\alpha 2} D_6^3 a (a-1) \times$$

$$\times [1 + (\lambda_o + 0.785)(a-1)]. \quad (26)$$

Из условия равенств (4) и (12), а также (18) и (25) следуют выражения D_6 :

$$D_6^2 (a-1) k_{\alpha 1} k_{\alpha 3} = k_u / (k_{3o} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 D_6^2);$$

$$D_6 = \sqrt[4]{k_u / (k_{3o} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 k_{\alpha 3} (a-1))}. \quad (27)$$

$$D_6^2 (a-1) k_{\alpha 1}^2 \lambda_o =$$

$$= \sqrt{3} k_u / (k_{3o} k_{3M} k_{\alpha 1} k_{\alpha 2} a (a-1) D_6^2),$$

$$D_6 = \sqrt[4]{\sqrt{3} k_u / (k_{3o} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 1}^3 k_{\alpha 2} a (a-1)^2)}. \quad (28)$$

С учетом (27) и (28) выражения масс (8) и (22), а также масса ВМ (рис. 1, в) [3] определяются выражениями

$$m_{МША} = \gamma_c k_{3M} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{30} k_{3M})} \right)^3 k_{МША}, \quad (29)$$

$$m_{МШР} = \gamma_c k_{3M} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{30} k_{3M})} \right)^3 k_{МШР}, \quad (30)$$

$$m_{МВА} = \gamma_c k_{3M} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{30} k_{3M})} \right)^3 k_{МВА}, \quad (31)$$

где: $k_{МША}$, $k_{МШР}$, $k_{МВА}$ – коэффициенты изменения массы магнитопроводов (рис. 1, а, б и в) :

$$k_{МША} = k_{\alpha 1} k_{\alpha 3} \left(\sqrt[4]{1 / [\lambda_o k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 k_{\alpha 3} (a-1)]} \right)^3 \times \left\{ 3\lambda_o k_{\alpha 2} + 3\sqrt{3}k_{\alpha 2} + 2(a-1)k_{\alpha 3} \right\}; \quad (32)$$

$$k_{МШР} = k_{\alpha 1}^2 \left(\sqrt[4]{\sqrt{3} / [\lambda_o k_{\alpha 1}^3 k_{\alpha 2} a (a-1)^2]} \right)^3 \times \lambda_o (a-1) [1.5(ak_{\alpha 3} - k_{\alpha 1} / \sqrt{3}) + \sqrt{3}a \times (k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2})k_{\alpha 6} + 0.433k_{\alpha 1} + 1.047k_{\alpha 6}^2 k_{\alpha 1}], \quad (33)$$

$$k_{МВА} = 3 \left(\sqrt[4]{2 / \{\lambda_o k_{\alpha 2}^2 (a-1) [k_{\alpha 1} + \pi(a-1)/6]\}} \right)^3 \times (a-1) \left\{ \frac{k_{\alpha 2}}{2} \lambda_o \left[k_{\alpha 1} + \frac{\pi}{6}(a-1) \right] + \frac{k_{\alpha 6}}{\sqrt{3}} \times [k_{\alpha 1} + \frac{\pi}{6}(a-1)] \right\}. \quad (34)$$

Средняя длина витка катушки ПЭМС (рис. 1, в) при принятых допущениях определяется с учетом (1) и (2) выражением :

$$l_{WBA} = 2b_c + 2l_{\gamma} + [2\pi(l_{\gamma} + b_o/4)/3] + (\pi b_o/4) + (\pi b_o/12) = 2D_{\alpha} [k_{\alpha 1} + 1.0236(a-1) + 0.785k_{\alpha 2}]. \quad (35)$$

Согласно [3] площадь (10) сечения стержня (рис. 1, в) связана с параметрами обмотки и D_{α} выражением :

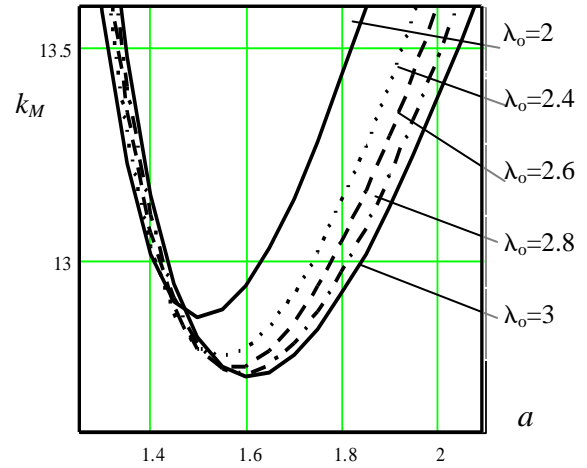
$$P_{сВА} = k_u / (k_{30} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 D_{\alpha}^2). \quad (36)$$

Исходя из (35), (11) и (36) масса обмотки ПЭМС (рис. 1, в) определяется в виде :

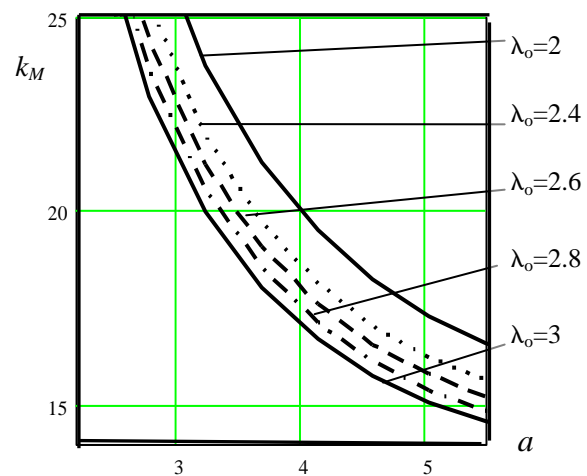
$$m_{o\text{BA}} = 3\gamma_o k_{30} k_{3M} \lambda_o k_{\alpha 2}^2 D_{\alpha}^3 \times [k_{\alpha 1} + 1.0236(a-1) + 0.785k_{\alpha 2}]. \quad (37)$$

Величина диаметра D_{α} ПЭМС (рис. 1, в) определяется выражением [3] :

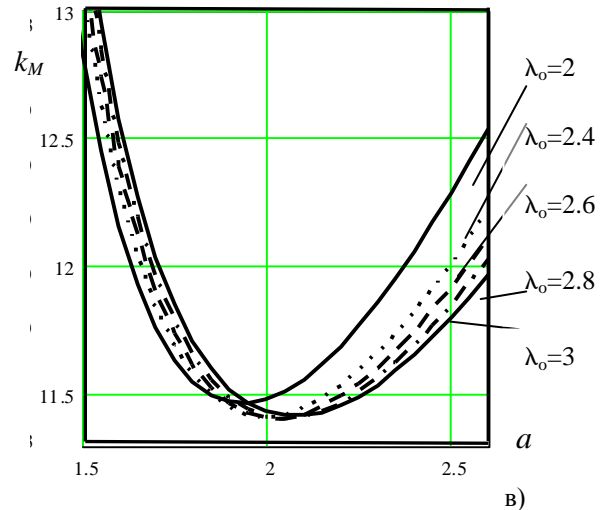
$$D_{\alpha} = \sqrt[4]{\frac{2k_u}{k_{30} k_{3M} \lambda_o (a-1) [k_{\alpha 1} + \pi(a-1)/6] k_{\alpha 2}^2}}. \quad (38)$$



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимости коэффициентов изменения масс активных частей ПЭМС с аксиальным шихтованным:

(а), $\alpha_c=50^\circ$ радиальным; (б) $\alpha_c=60^\circ$ шихтованным; (в) $\alpha_c=20^\circ$ аксиальным витым магнитопроводами

Fig. 2. Dependences of changing the mass factors of active parts PEMS axial a laminated:

(а), $\alpha_c=50^\circ$; a laminated radial; (б) $\alpha_c=60^\circ$ axial twisted; (с) $\alpha_c=20^\circ$ magnetic cores

С учетом (27), (28) и (38) выражения масс (13), (26) и (37) могут быть представлены в виде :

$$m_{o\text{ША}} = \gamma_o k_{zo} k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{o\text{ША}}, \quad (39)$$

$$m_{o\text{ШР}} = \gamma_o k_{zo} k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{o\text{ШР}}, \quad (40)$$

$$m_{o\text{ВА}} = \gamma_o k_{zo} k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{o\text{ВА}}, \quad (41)$$

где: $k_{o\text{ША}}$, $k_{o\text{ШР}}$, $k_{o\text{ВА}}$ – коэффициенты изменения массы обмоток ПЭМС (рис. 1, а, б и в),

$$k_{o\text{ША}} = 3\lambda_o k_{\alpha 2}^2 \left(\sqrt[4]{1 / [\lambda_o k_{\alpha 1} k_{\alpha 2}^2 k_{\alpha 3} (a-1)]} \right)^3 \times \\ \times [k_{\alpha 1} + 0.785k_{\alpha 2} + k_{\alpha 3}(a-1)], \quad (42)$$

$$k_{o\text{ШР}} = \sqrt{3} \left(\sqrt[4]{\sqrt{3} / [\lambda_o k_{\alpha 1}^3 k_{\alpha 2} a(a-1)^2]} \right)^3 \times \\ \times k_{\alpha 1}^2 k_{\alpha 2} a(a-1) [1 + (\lambda_o + 0.785)(a-1)], \quad (43)$$

$$k_{o\text{ВА}} = 3 \left(\sqrt[4]{2 / \{\lambda_o k_{\alpha 2}^2 (a-1) [k_{\alpha 1} + \pi(a-1)/6]\}} \right)^3 \times \\ \lambda_o k_{\alpha 2}^2 [k_{\alpha 1} + 1.0236(a-1) + 0.785k_{\alpha 2}]. \quad (44)$$

Масса активной части каждой из ПЭМС (рис. 1) исходя из (29) – (31) и (39) – (41) :

$$m_{\text{ША}} = \gamma_c k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{\text{ША}},$$

$$m_{\text{ШР}} = \gamma_c k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{\text{ШР}},$$

$$m_{\text{ВА}} = \gamma_c k_{zm} \left(\sqrt[4]{k_u / (k_{zo} k_{zm})} \right)^3 k_{\text{ВА}},$$

где: $k_{\text{ША}}$, $k_{\text{ШР}}$, $k_{\text{ВА}}$ – коэффициенты изменения масс активных частей вариантов ПЭМС (рис. 1) :

$$k_{\text{ША}} = k_{\text{МША}} + \gamma_o k_{zo} k_{o\text{ША}} / \gamma_c, \quad (45)$$

$$k_{\text{ШР}} = k_{\text{МШР}} + \gamma_o k_{zo} k_{o\text{ШР}} / \gamma_c, \quad (46)$$

$$k_{\text{ВА}} = k_{\text{МВА}} + \gamma_o k_{zo} k_{o\text{ВА}} / \gamma_c. \quad (47)$$

Примеры изменения зависимостей (45) - (47) при $k_o = 1$, $k_{zo} = 0.34$, $\gamma_o = 8900 \text{ кг/м}^3$ и $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ представлены на рис. 2.

ВЫВОДЫ

1. Из полученных аналитических зависимостей (45)–(47) следует, что с увеличением контурного угла $\alpha_c = 20 \dots 60^\circ$ массы ПЭМС (рис. 1, а и б) снижаются, а масса ПЭМС (рис. 1, в) с увеличением угла $\alpha_c = 20 \dots 60^\circ$ возрастает.

2. Наилучшие технико-экономические показатели обеспечивает ПЭМС (рис. 1, в) с минимальной массой, технологической материалоемкостью и габаритными размерами.

3. Полученные аналитические зависимости являются исходными для разработки методик расчетов и могут быть использованы для оптимизации симметричных ПЭМС по частным и обобщенным критериям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Иванов-Смоленский А.В. 2001.** Перспективы развития электромеханики в XXI веке. / А.В.

- Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина и др. // Электропанорама. № 1. 14 – 15.
2. **Орлов Е.Г. 1990.** Главная задача отраслевой науки – эффективность производства и энергосбережение // Электротехника. №1. 4 – 6.
3. **Тихомиров П.М. 1986.** Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 528.
4. **Плахтырь О.О. 2002.** Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов // Электротехника и Электромеханика. № 3. 64-65. (Украина).
5. **Пентегов И.В. 2002.** Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами. / Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. и др.- Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. Харьков: НТУ "ХПИ". № 14. 86- 97. (Украина).
6. **Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. 2002.** Геометрические соотношения и массостоймостные показатели трехфазных пространственных трансформаторов малой мощности // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета: научные труды КГПУ. Кременчуг: КГПУ, Вып. 1 (12). 181 – 183. (Украина).
7. **Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. 2002.** Зависимости массостоймостных показателей трехфазных пространственных трансформаторов с ромбическими катушками обмоток от геометрических соотношений активной части. // Электромашиностроение и электрооборудование: Межвед. научн. - техн. сб. - Вып. 58. 85 – 91. (Украина).
8. **Кондратенко Ю.П., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. 2002.** Выбор технических решений трехфазных трансформаторов для судовых систем автоматического управления. // Автоматизация судовых технических средств: Научно – техн. сб. Вып. № 7, 67- 73.
9. **Плахтырь О.О. 2011.** Усовершенствование регулируемых статических индукционных устройств для электрических систем и преобразовательной техники. Motrol. Lublin. Vol. 10B. 81–86. (Poland).
10. **Плахтырь О.О. 2011.** Определение тока холостого хода измерительных трансформаторов с витыми магнитопроводами // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Перспективная техника и технологии–2011». 206–209. (Украина).
11. **Плахтырь О.О. 2010.** Математическая модель аксиальной пространственной электромагнитной системы трехфазного трансформатора с цилиндрическими образующими поверхностями стержней магнитопровода. Motrol. Lublin. Vol. 12A. 15–24. (Poland).
12. **Плахтырь О.О., Кошкин Д.Л. 2012.** Конструкторско-технологические решения

усовершенствования регулируемых статических индукционных устройств для электронных систем и преобразовательной техники. вестник КНУТД. №1. 39–42

13. **Плахтырь О.О. 2009.** Усовершенствование трехфазных статических индукционных устройств на основе нетрадиционных конструкторско-технологических решений производства пространственных магнитопроводов. Motrol. Lublin. Vol. 10B. 58–63. (Poland).
14. **Плахтырь О.О., Дубовик А. О. 2008.** Влияние геометрических соотношений активной части пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов на уровень основных потерь // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Перспективная техника и технологии 2008». 118–122.
15. **Plakhtyr O.O. 2014.** Increase of limited power and structural optimization of static induction devices with spatial magnetic cores MOTROL. Lublin. Vol. 16A. 285–289. (Poland).
16. **Андреев Э.В., Алешин А.В., Игнатов В.А., Королева Т.Д., Проворова И.П. 1977.** Функциональная аппроксимация нормального закона погрешности изготовления печатной обмотки многополюсных датчиков перемещения. //Межвуз. сборник научных трудов. М.: МИРЭА. 182 – 192.
17. **Андреев Э.В., Королева Т.Д., Петропольский Н.В., Проворова И.П. 1979.** Метод расчета погрешности измерительного преобразователя перемещений. // Межвуз. сб. научн. трудов «Теория автоматического управления». М.: МИРЭА. 44 – 51.
18. **Домбровский В.В. 1983.** Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. М.: Энергоатом-издат. 286.
19. **Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. 1987.** Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 185.
20. **Корицкий А.В., Королева Т.Д., Проворова И.П. 1981.** Исследование критериальной зависимости выходной ЭДС измерительного преобразователя перемещений // Межвуз сб. научн. трудов. М.: МИРЭА. 25 – 31.

THE COMPARING ANALYSIS OF MATERIAL CONSUMPTION OF THREE – PHASED SPATIAL ELECTROMAGNETIC SYSTEMS VARIANTS

Summary. The comparing analysis of spatial electromagnetic systems` variants with jointed magnetic cores, which are different the type of technology, configuration and magnetic flux direction in rods are made on the base of the analytical dependences of material consuming exponents. The advantages of magnetic cores with parallel sides of are shown.

Investigation of the characteristics of AD dvuhpaketnoy rotor design with an analytical method

based on the use of equivalent circuits. Calculations performed on computers using the method of successive approximations and linear piecewise approximation 1fivyh magnetization. Experimental studies of the magnetic flux distribution along the length conducted by an indirect method, by measuring the emf induced in special measuring windings arranged in the air gap of a laminated package and massive rotor.

The results obtained in the main results brought to the level of practical use. They are applied in the design of a number of modifications of the serial AD sizes to improve the starting and adjusting properties designed for electric machines with high inertia, working in intermittent mode or speed regulation in aggressive or explosive environments.

Key words: spatial electromagnetic systems, material consuming, winding windows.