

УДК 621.314

**А.А. Ставинский**, д-р техн. наук,  
**Р.А. Ставинский**, канд. техн. наук,  
**А.Н. Цыганов**

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАНАРНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КРУГОВЫМИ И ВОСЬМИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ**

*Получены аналитические зависимости для определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости активной части. Выполнен сравнительный анализ массостоймостных показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней, ярем и катушек обмоток.*

**Ключевые слова:** трансформатор, магнитопровод, круговые и восьмигранные контуры, оптимизация.

**A.A. Stavinskiy**, ScD,  
**R.A. Stavinskiy**, Ph.D,  
**A.N. Ciganov**

### **THE COMPARATIVE ANALYSIS OF MASS-AND-PRICE INDEXES OF PLANAR THREE PHASE ELECTROMAGNETIC SYSTEMS WITH CIRCULAR AND OCTAHEDRAL FORMING CONTOURS OF CORES**

*Analytical dependences of determination of optimum geometrical parities by criteria of minimal weight and price of an active part are received. Comparative analysis of mass-and-price indexes of planar three phase electromagnetic systems with circular and octahedral forming contours of cores, yokes and coils of windings is made.*

**Key words:** transformer, magnetic core, circular and octahedral contours, optimization.

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

### **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАСОВАРТІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЛАНАРНИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ З КРУГОВИМИ І ВОСЬМИГРАННИМИ ТВІРНИМИ КОНТУРАМИ СТРИЖНІВ**

*Отримано аналітичні залежності для визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси і вартості активної частини. Виконано порівняльний аналіз масовартісних показників планарних трифазних електромагнітних систем з круговими і восьмигранними твірними контурами стрижнів, ярем і катушок обмоток.*

**Ключові слова:** трансформатор, магнітопровід, кругові та восьмигранні контури, оптимізація.

**Введение.** В настоящее время в Украине эксплуатируются, а специализированными заводами производятся электромеханические устройства, в частности трансформаторы, с традиционными техническими решениями электромагнитных систем (ЭМС) [7]. При этом интенсивное и возрастающее энергопотребление требует решения комплексной задачи энерго- и ресурсосбережения и усовершенствования процессов производства, распределения и преобразования электроэнергии. Важной составляющей указанной задачи является повышение технического уровня силовых трансформаторов и реакторов [2].

© Ставинский А.А., Ставинский Р.А.,  
Цыганов А.Н., 2012

Однако дальнейшее повышение надежности, существенное снижение материалоемкости и потерь энергии индукционных статических устройств (ИСУ) традиционными способами использования улучшенных материалов, форсированного охлаждения и автоматизированного проектного оптимизационного синтеза в рамках традиционных структур ЭМС не представляется возможным. Необходимость решения задач дальнейшего усовершенствования требует поиска и разработки новых нетрадиционных решений активной и конструктивной части всех электрических машин на основе системного подхода, структурного преобразования и структурной оптимизации их ЭМС [3].

Из [1,4] известны статические ЭМС с многоплоскостными образующими поверхностями

(ОП) и, соответственно,  $n \geq 6$  – гранными образующими контурами (ОК) стержней и катушек обмоток. В планарных ЭМС с шихтованными "впереплет" магнитопроводами многоплоскостные ОП создают восьмигранные ОК сечений стержней и катушек обмоток.

**Целью работы** является сравнительный анализ массостоймых показателей планарных ЭМС с традиционными круговыми и нетрадиционными восьмигранными ОК элементов ЭМС.

**Материал и результаты исследований.**

Варианты планарной ЭМС с круговым (рис. 1, а) и восьмигранным (рис. 1, б, в) ОК стержней отличаются практически равномерным (по окружности) и дискретным (по углам восьмигранника) распределением внутренних остаточных механических напряжений кольцевого изгиба витков катушек. От используемых в ИСУ малой мощности ЭМС с плоскими параллельными ОП указанные варианты отличаются неравномерным заполнением обмоточных окон проводящим, изоляционным и конструкционным материалами.

Поскольку минимальную ширину обмоточного окна определяет расстояние между стержнями, соответствующее заданному заполнению окна (классу напряжения), использование круговых или эллиптических ОК, снижая материалоемкость обмоток, повышает металлоемкость магнитопроводов.

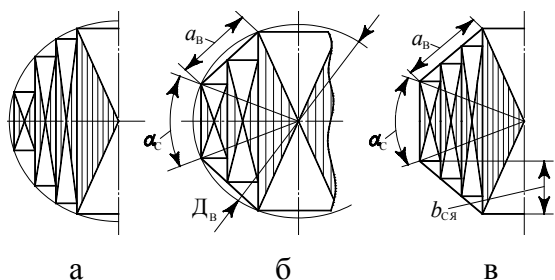


Рис. 1. Варианты конфигурации сечения стержня с круговым (а) и восьмигранными (б, в) образующими контурами

Многоплоскостные ОП создают предпосылки повышения электродинамической устойчивости и некоторого снижения материалоемкости ИСУ относительно аналога с цилиндрическими ОП ЭМС. Электродинамическая устойчивость может быть повышена исключением внутренних остаточных напряжений изгиба на прямых участках витков при условии

усиления изоляции и концентрации механических креплений обмотки в зонах углов многогранника [1, 4]. Материалоемкость снижается некоторым повышением заполнения объема обмоточного окна при замене круговых ОК на граненные (рис. 1).

Размещение в половинах равностороннего восьмигранника со стороной  $a_b$  (рис. 1, б, в) трех и четырех ступеней пакетов пластин (листов) электротехнической стали (ЭТС) обеспечивает площади сечения стержней, определяющиеся соотношениями

$$S_{B3} = 4,3287a_b^2; S_{B4} = 4,4954a_b^2.$$

Преобразование структуры ЭМС в соответствии с рис. 1, б, в повышает использование контурной площади, характеризующееся коэффициентом заполнения восьмигранного ОК ступенчатым сечением стержня (контурным коэффициентом),

$$K_{KB3} = S_{B3}/S_{KB} \approx 0,9; K_{KB4} = S_{B4}/S_{KB} \approx 0,931,$$

где  $S_{KB}$  – площадь равностороннего контурного восьмигранника (рис. 1, б, в),

$$S_{KB} = 4,8224a_b^2. \quad (1)$$

Аналогичные приведенным выше значения контурного коэффициента для кругового ОК  $K_{K08}=0,9$  и  $K_{K015}=0,93$  достигаются использованием, в зависимости от диаметра ОК, соответственно 7–9 и 14–16 ступеней и размеров пакетов ЭТС в половине окружности [6,7]. Поэтому существенным преимуществом использования восьмигранных ОК является снижение трудоемкости производства магнитопроводов планарных ЭМС в диапазоне мощности с I-II габаритов.

Сравнительный анализ вариантов ЭМС выполняется методом [5], согласно которому полная целевая функция массы (стоимости) ЭМС ИСУ представляется

$$F_{M(c)} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{AM(c)}, \quad (2)$$

где  $\Pi_{ид}$  – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок ИСУ;  $\Pi_{AM(c)}$  – целевая функция относительного показателя массы (стоимости) ЭМС.

Указанные целевая функция и относительный показатель связаны соотношениями

$$\Pi_{AM} = \gamma_c \Pi_{AM}^*;$$

$$\Pi_{ac} = C_c \gamma_c \Pi_{ac}^*,$$

где  $\gamma_c$  и  $C_c$  – плотность и удельная стоимость ЭТС.

Второй сомножитель (2) является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна активным материалом обмотки (АМО)  $K_{зо}$  и универсальных (приемлемых для любого из существующих и возможных вариантов ЭМС [5]) двух основных относительных и третьей дополнительной (используемой в части ЭМС) геометрических управляемых переменных  $\alpha_m, \lambda_o, \alpha_c$ :

$$\Pi_{ам(с)}^* = f(K_{зо}, \alpha_m, \lambda_o, \alpha_c), \quad (3)$$

где  $\alpha_m$  – отношение наружного  $D_n$  к внутреннему  $D_b$  диаметру расчетных окружностей магнитопровода;  $\lambda_o$  – отношение высоты  $h_o$  и ширины  $b_o$  обмоточного окна (рис. 2);  $\alpha_c$  – расчетный угол стержня (в рассматриваемых вариантах трехфазной планарной ЭМС используются две переменные  $\alpha_m$  и  $\lambda_o$ ),

$$\alpha_m = D_n / D_b; \quad (4)$$

$$\lambda_o = h_o / b_o. \quad (5)$$

Показатели  $\Pi_{ам}$  и  $\Pi_{ac}$  определяются при соблюдении известного принципа электромагнитной эквивалентности ИСУ [5]. Этому принципу соответствует идентичность  $\Pi_{ид}$ , идентичности назначения и исполнения ИСУ, а также соответственно идентичности заполнения ОК  $i$  – ступенчатым сечением стержня, заполнения обмоточного окна и заполнения магнитопровода ЭТС с коэффициентами

$$K_{квi} = K_{коi} = K_k; K_{зобvi} = K_{зоoi} = K_{зо};$$

$$K_{зсви} = K_{зсоi} = K_{зс},$$

где  $K_{коi}$  – коэффициент заполнения кругового ОК;  $K_{зобvi}$ ,  $K_{зоoi}$ , и  $K_{зсви}$ ,  $K_{зсоi}$  – коэффициенты заполнения обмоточного окна и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС [6,7] ЭМС соответственно с восьмигранными и круговыми ОК.

При определении целевой функции (3) используются известные уравнения связи [6] площади ЭТС сечения стержня  $\Pi_{сс}$  и массы АМО  $m_o$  с показателем  $\Pi_{ид}$  трехфазного трансформатора:

$$\Pi_{сс} = \Pi_{ид} / (K_{зо} \lambda_o b_o^2); \quad (6)$$

$$m_o = 1,5 \gamma_o \Pi_{ид} l_w / \Pi_{сс}, \quad (7)$$

где  $\gamma_o$  и  $l_w$  – плотность АМО и средняя длина витка чередующейся обмотки.

Сравнительный анализ и структурная оптимизация вариантов ЭМС выполняются по экстремумам функций относительных показателей (3)  $\Pi_{амmin}^*$ ,  $\Pi_{acmin}^*$ , а также потерь энергии  $\Pi_{анmin}^*$ . Первый сомножитель (2) может быть использован в поэтапной параметрической оптимизации ИСУ конкретного назначения и исполнения при заданных проектных ограничениях.

В ЭМС с цилиндрическими ОП (рис. 2) ширина обмоточного окна магнитопровода определяется, с учетом (4), выражением

$$b_o = (D_n - D_b) / 2 = D_b (\alpha_m - 1) / 2. \quad (8)$$

Объем, ограниченный круговыми ОК стержней и ярем магнитопровода ЭМС схемы (рис. 2),

$$V_{ко} = 3h_o S_{ко} + (4b_o + 6D_b) S_{ко} + \Delta V_{сyo}, \quad (9)$$

где  $S_{ко}$  – площадь кругового ОК диаметра  $D_b$ ;  $\Delta V_{сyo}$  – объем, ограниченный участками ОП среднего стержня в зонах его сопряжения с цилиндрическими ОП ярем.

Объем  $\Delta V_{сyo}$  находится на основе использования эквивалентного объема параллелепипеда с прямоугольным основанием площадью  $S_{ко}$  и большей стороной  $D_b$ .

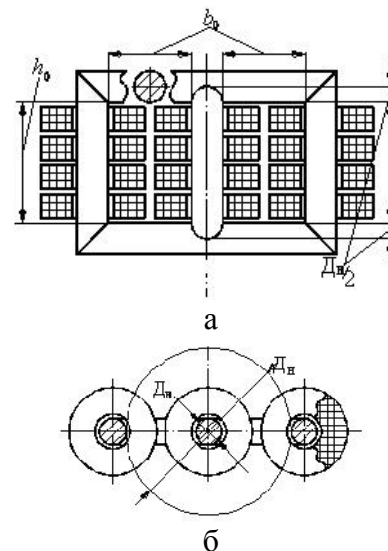


Рис. 2. Продольное (а) и поперечное (б) сечения конструктивной схемы трехфазной планарной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами

Площадь  $S_{эпо}$  и меньшая сторона  $b_{эпо}$  указанного прямоугольного основания определяются соотношениями

$$\begin{aligned} S_{эпо} &= b_{эпо} D_b = \pi D_b^2 / 4; \\ b_{эпо} &= \pi D_b / 4. \end{aligned} \quad (10)$$

Объем  $\Delta V_{\text{съяо}}$  соответствует участкам стержня на отрезках  $D_B/2$  центральной оси (рис. 2,а) и рассчитывается, с учетом (9), по соотношению

$$\Delta V_{\text{съяо}} = S_{\text{эпо}} D_B - S_{\text{ко}} b_{\text{эпо}} = \pi D_B^3/4 - \pi^2 D_B^3/16 = 0,16855 D_B^3. \quad (11)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС схемы (рис. 2) определяется, на основе (4), (5) и (9), (11), уравнением

$$m_{\text{мо}} = \gamma_c K_{\text{зс}} K_{\text{к}} \left[ \frac{\pi D_B^2}{4} (3\lambda_o b_o + 4b_o + 6D_B) + 0,16855 D_B^3 \right] = 0,7854 \gamma_c K_{\text{зс}} K_{\text{к}} D_B^3 \times [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_o) + 6,2146]. \quad (12)$$

Средняя длина витка катушки обмотки с круговыми ОК (рис. 2, б) определяется, на основе (8)

$$l_{\text{во}} = 2\pi \left( \frac{D_B}{2} + \frac{b_o}{4} \right) = \pi D_B \left( 1 + \frac{a_M - 1}{4} \right). \quad (13)$$

Масса АМО ЭМС схемы (рис. 2) определяется, исходя из (6), (7) и (8), (13) уравнением

$$m_{\text{оо}} = 1,5 \gamma_o K_{\text{зо}} \lambda_o l_{\text{во}} b_o^2 = 1,178 \gamma_o K_{\text{зо}} \lambda_o D_B^3 (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4]. \quad (14)$$

Площадь ЭТС стержня с круговым ОК (рис. 1, а)

$$S_{\text{ссо}} = \pi K_{\text{зс}} K_{\text{к}} D_B^2/4. \quad (15)$$

Из условия равенства (6) и (15), с учетом (8), следует

$$D_B = \sqrt[4]{\frac{5,093 \Pi_{\text{ид}}}{K_{\text{зс}} K_{\text{к}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^2}}. \quad (16)$$

После подстановки  $D_B$  из (16) в уравнения (12) и (14) выражения для масс ЭТС и АМО ЭМС схемы (рис. 2) преобразуются:

$$m_{\text{мо}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мо}}^*; \quad (17)$$

$$m_{\text{оо}} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{оо}}^*, \quad (18)$$

где  $\Pi_{\text{мо}}^*$  и  $\Pi_{\text{оо}}^*$  – относительные показатели массы магнитопровода и обмотки ЭМС схемы (рис. 2):

$$\Pi_{\text{мо}}^* = 0,7854 K_{\text{зс}} K_{\text{к}} \left( \sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{\text{зс}} K_{\text{к}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times [(a_M - 1)(2 + 1,5\lambda_o) + 6,2146]; \quad (19)$$

$$\Pi_{\text{оо}}^* = 1,1781 K_{\text{зо}} \lambda_o \left( \sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{\text{зс}} K_{\text{к}} K_{\text{зо}} \lambda_o (a_M - 1)^2}} \right)^3 \times (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4]. \quad (20)$$

Масса и стоимость активных материалов ЭТС схемы (рис. 2) определяются, в соответствии с (2) и на основе (17)–(20), уравнениями

$$m_{\text{ао}} = m_{\text{мо}} + m_{\text{оо}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мо}}^* + \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{оо}}^* = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мао}}^*; \quad (21)$$

$$C_{\text{ао}} = C_{\text{мо}} + C_{\text{оо}} = C_c \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{мо}}^* + C_o \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{оо}}^* = C_c \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{сао}}^*, \quad (22)$$

где  $C_o$  – удельная стоимость АМО;  $\Pi_{\text{мао}}^*$  и  $\Pi_{\text{сао}}^*$  – относительные показатели массы и стоимости активных материалов трехфазной планарной ЭМС с цилиндрическими ОП и круговыми ОК (рис. 2),

$$\Pi_{\text{мао}}^* = \Pi_{\text{мо}}^* + \gamma_o \Pi_{\text{оо}}^* / \gamma_c; \quad (23)$$

$$\Pi_{\text{сао}}^* = \Pi_{\text{мо}}^* + C_o \gamma_o \Pi_{\text{оо}}^* / (C_c \gamma_c). \quad (24)$$

Примеры функциональных зависимостей (23) и (24) ЭМС схемы (рис. 2) полученные при соотношениях плотностей (кг/м<sup>3</sup>)  $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$  и стоимостей  $C_o/C_c = 3$  электротехнической обмоточной меди и ЭТС, а также значениях  $K_{\text{зс}} = 0,91$  и  $K_{\text{зо}} = 0,25$ , показаны на рис.3.

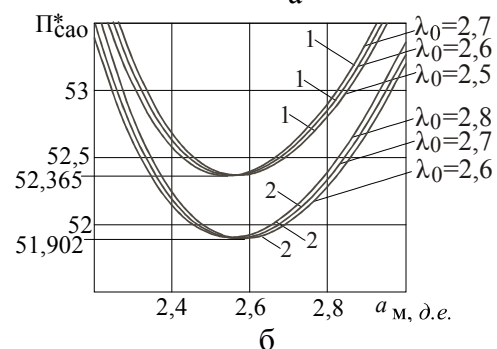
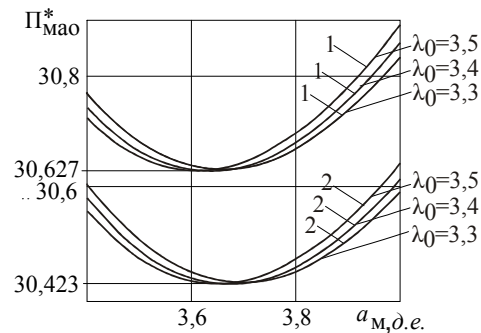


Рис. 3. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) от геометрических соотношений трехфазной планарной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента: 1 –  $K_k = 0,9$ ; 2 –  $K_k = 0,93$

В ЭМС с многоплоскостными ОП ширина стержня  $b_c$  (рис. 4, а) и ширина грани ОК стержня (рис. 1, б, в) магнитопровода (рис. 4) определяются через диаметр описанной окружности  $D_B$  (рис. 1, б, рис. 5, б) по соотношениям

$$b_c = D_B \cos(\alpha_c/2) = 0,9239 D_B; \quad (25)$$

$$a_B = D_B \sin(\alpha_c/2) = 0,3827 D_B, \quad (26)$$

где  $\alpha_c = 45^\circ$  – центральный угол грани стержня (рис. 1, б, в).

Ширина обмоточного окна (рис. 4, а) указанного магнитопровода определяется, с учетом (4) и (25), выражением

$$b_o = \frac{D_H}{2} - \frac{b_c}{2} = \frac{a_M D_B}{2} - \frac{D_B}{2} \cos(\alpha_c/2) = D_B (a_M - 0,9239) / 2. \quad (27)$$

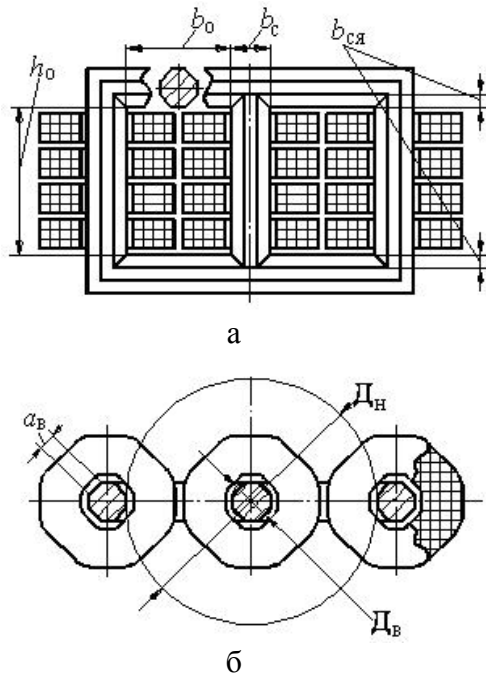


Рис. 4. Продольное (а) и поперечное (б) сечения конструктивной схемы трехфазной планарной электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами

Объем, ограниченный восьмигранными ОК стержней и ярем магнитопровода ЭМС схемы (рис. 4),

$$V_{KB} = 3h_o S_{KB} + (4b_o + 6b_c) S_{KB} + \Delta V_{с_яв}, \quad (28)$$

где  $\Delta V_{с_яв}$  – объем ограниченный участками ОП среднего стержня в зонах его сопряжения с восьмигранными поверхностями ярем.

Объем  $\Delta V_{с_яв}$  находится на основе использования эквивалентного объема параллелепи-

педа с прямоугольным основанием площадью  $S_{KB}$  и большей стороной  $b_c$ . Площадь  $S_{эпв}$  и меньшая сторона  $b_{эпв}$  такого прямоугольного основания определяются, с учетом (1), (25) и (26), соотношениями

$$S_{эпв} = b_{эпв} b_c = S_{KB} = 4,8224 \sin^2(\alpha_c/2) D_B^2 = 0,7026 D_B^2; \\ b_{эпв} = S_{KB} / b_c = 0,7644 D_B. \quad (29)$$

Объем  $\Delta V_{с_яв}$  соответствует участкам стержня на отрезках  $b_{с_я}$  центральной оси (рис. 4, а) и определяется, с учетом (1), (25) и (26), (29),

$$\Delta V_{с_яв} = b_{эпв} b_c^2 - S_{KB} b_{эпв} = 0,1126 D_B^3. \quad (30)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС схемы (рис. 4) определяется, на основе (1), (5), (25) – (28) и (30), уравнением

$$m_{MB} = \gamma_c K_{зс} K_K \{ 4,4672 \lambda_o b_o a_B^2 + [2 D_B \times (a_M - 0,9239) + 5,5434 D_B] 4,8224 a_B^2 + 0,1126 D_B^3 \} = \gamma_c K_{зс} K_K D_B^3 [(a_M - 0,9239) \times (1,4126 + 1,05943 \lambda_o) + 4,0278]. \quad (31)$$

Средняя длина витка катушки обмотки с восьмигранными ОК (рис. 4, б), с учетом (26) и (27)

$$l_{WB} = 8a_B + \pi b_o / 4 = 3,0616 \times [1 + 0,12827(a_M - 0,9239)] D_B. \quad (32)$$

Масса АМО ЭМС схемы (рис. 4) определяется, исходя из (6), (7) и (27), (32) уравнением

$$m_{OB} = 1,5 \gamma_o K_{зо} \lambda_o l_{WB} b_o^2 = 1,1481 \gamma_o K_{зо} \lambda_o D_B^3 (a_M - 0,9239)^2 \times [1 + 0,12827(a_M - 0,9239)]. \quad (33)$$

Площадь ЭТС стержня с восьмигранным ОК (рис. 1, б, в) на основе (1) и (26)

$$P_{с_св} = 0,70628 K_{зс} K_K D_B^2. \quad (34)$$

Из условия равенства (6) и (34), с учетом (27), следует

$$D_B = \sqrt[4]{\frac{5,6635 P_{ид}}{K_{зс} K_K K_{зо} \lambda_o (a_M - 0,9239)^2}}. \quad (35)$$

После подстановки из (35) в уравнения (31) и (33) массы ЭТС и АМО ЭМС по схеме рис. 4 определяются

$$m_{MB} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{P_{ид}} \right)^3 P_{MB}^*, \quad (36)$$

$$m_{OB} = \gamma_o \left( \sqrt[4]{P_{ид}} \right)^3 P_{OB}^*, \quad (37)$$

где  $\Pi_{\text{МВ}}^*$  и  $\Pi_{\text{ОВ}}^*$  – относительные показатели массы магнитопровода и обмотки ЭМС схемы (рис. 4):

$$\Pi_{\text{МВ}}^* = K_{3c} K_K \left( \sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{3c} K_K K_{30} \lambda_o (a_M - 0,9239)^2}} \right)^3 \times [(a_M - 0,9239)(1,4126 + 1,05943\lambda_o) + 4,0278]; \quad (38)$$

$$\Pi_{\text{ОВ}}^* = 1,1481 K_{30} \lambda_o \left( \sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{3c} K_K K_{30} \lambda_o (a_M - 0,9239)^2}} \right)^3 \times (a_M - 0,9239)^2 [1 + 0,12827(a_M - 0,9239)]. \quad (39)$$

Масса  $m_{\text{ав}}$  и стоимость  $C_{\text{ав}}$  активных материалов ЭМС схемы (рис. 4) определяются, в соответствии с (2) и на основе (36)–(39), уравнениями:

$$m_{\text{ав}} = m_{\text{МВ}} + m_{\text{ОВ}} = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВ}}^* + \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОВ}}^* = \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВ}}^* + \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОВ}}^*; \quad (40)$$

$$C_{\text{ав}} = C_{\text{МВ}} + C_{\text{ОВ}} = C_c \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{МВ}}^* + C_o \gamma_o \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{ОВ}}^* = C_c \gamma_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{\text{ИД}}} \right)^3 \Pi_{\text{сав}}^*, \quad (41)$$

где  $\Pi_{\text{МВ}}^*$  и  $\Pi_{\text{сав}}^*$  – относительные показатели массы и стоимости активных материалов трехфазной планарной ЭМС с многоплоскостными ОП и восьмигранными ОК (рис. 4),

$$\Pi_{\text{МВ}}^* = \Pi_{\text{МВ}}^* + \gamma_o \Pi_{\text{ОВ}}^* / \gamma_c; \quad (42)$$

$$\Pi_{\text{сав}}^* = \Pi_{\text{МВ}}^* + C_o \gamma_o \Pi_{\text{ОВ}}^* / (C_c \gamma_c). \quad (43)$$

Функциональные зависимости (42) и (43) ЭМС схемы рис. 4 при удельных показателях и расчетных коэффициентах аналогичных ЭМС (рис. 2) показаны на рис. 5.

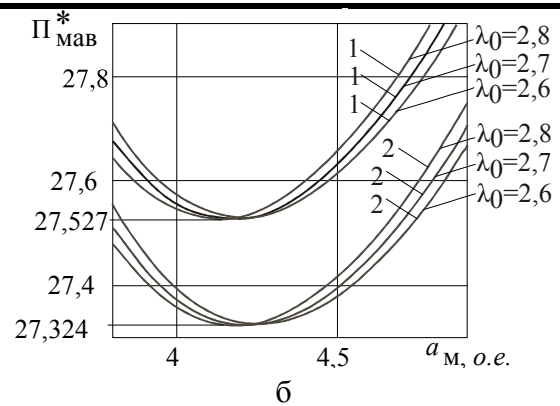
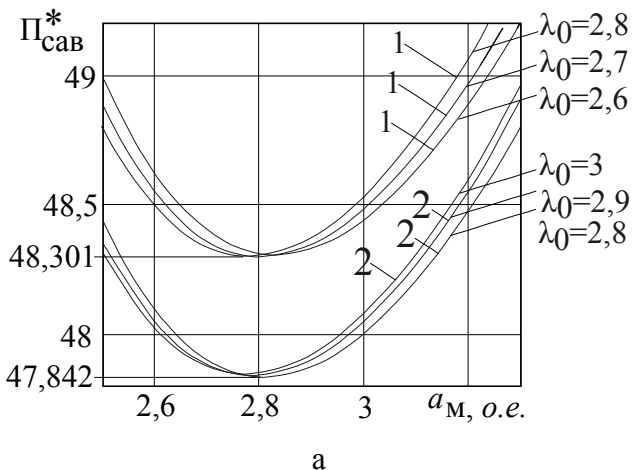


Рис. 5. Зависимости показателя массы (а) и стоимости (б) от геометрических соотношений трехфазной планарной электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента: 1 –  $K_K = 0,9$ ; 2 –  $K_K = 0,93$

### Выводы

1. Варианты трехфазной планарной электромагнитной системы индукционных статических устройств с медными обмотками и восьмигранными образующими контурами отличаются от электромагнитных–эквивалентных аналогов с 14–32 пакетными стержнями и круговыми образующими контурами пониженными показателями массы и стоимости активной части на 9–11 % и 8–6 %.

2. Зависимости массы и стоимости планарных ЭМС от  $a_M$  и  $\lambda_o$  являются унимодальными функциями с явно выраженными экстремумами.

3. Основной геометрической УП определяющей массостоймость показатели планарных аксиальных электромагнитных систем индукционных статических устройств является отношение  $a_M$  диаметров расчетных окружностей магнитопровода.

4. Многоплоскостные образующиеся поверхности в планарных электромагнитных системах позволяют, в дополнение к снижению трудоемкости производства магнитопроводов, улучшить массостоймость показатели трансформаторов и реакторов.

### Список использованной литературы

1. Пат. 38596 Украина, МПК (2009) Н01F27/28, Н01F27/30, Н01F27/32. Обмотка статического индукционного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. – и 200809425; заявл. 18.07.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.

2. Пуйло Г.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов / Г.В. Пуйло, И.С. Кузьменко, В.В. Тонгалук // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 2. – С. 48–52.

3. Ставинский А.А. Перспективы и особенности дальнейшего совершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей / А.А. Ставинский, И.А. Тищенко, Н.И. Зелёный // *Електромеханічні та комп'ютерні системи*. – 2010. – № 1(77). – С. 64 – 69.

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

5. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р.А. Ставинский // *Вісник КДУ*. – Кременчук: КДУ. – 2010. – №. 4(63). – Ч. 2. – С. 91–94.

6. Ставинський А.А. Розрахунок трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом: [Навч. посібник] / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтир. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.

7. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.

Получено 10.01.2012

#### References

1. Patent 38596 Ukraine, IPC (2009) H01F27/28, H01F27/30, H01F27/32. The winding of static induction device / А.А. Stavinskiy, R.A. Stavinskiy, O.M. Tsiganov. – U 200809425; appl. 18/07/2008, publ. 10.03. – 2009, Bull. № 5 [in Ukrainian].

2. Puilo G.V., Kuzmenko I.S., Tongaluk V.V. State – of – the trends in distribution transformers perfection / *Elektrical engineering & elektromechanics*. – 2008. – № 2. – P.48–52 [in Russian].

3. Stavinskiy A.A., Tischenko I.A., Zelenyi N.I. Prospects and features improvement of induction electromechanical and static transform-

ers / *Electrotechnic and computer systems*. – 2010. – №1(77). – P. 64–69 [in Russian].

4. Stavinskiy A.A. Evolution of structures and preconditions for transformers and reactors improvement via electromagnetic system circuits transformation (electrodynamic stability and systems with combined butt magnetic cores) / *Electrical Engineering & elektromechanics*. – 2011. – № 5. – P. 43–47 [in Russian].

5. Stavinskiy R.A. Untraditional technical decisions, rising of task and method of structural optimization of induction static devices / *Transactions of KSU*. – Kremenchuk: KSU. – 2010. – № 4/(63). – Part 2. – P. 91–94 [in Russian].

6. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A., Plahtyr O.O. Calculation of three-phase transformers with spatial magnetic core: [manual]. – Mykolaiv: NUS, 2004. – 106 p. [in Russian].

7. Power transformers. Handbook / Edited by S.D. Lizunov, A.K. Lohanin. – Moscow: Energoatomizdat, 2004. – 616 p. [in Russian].



Ставинский  
Андрей Андреевич,  
д-р техн. наук, проф, зав.  
каф. судових електроенергет.  
систем Нац.ун-та корабле-  
строения им. адм. Макарова,  
т. (0512) 36-02-27



Ставинский  
Ростислав Андреевич,  
канд. техн. наук, доц, зав.  
каф. енергетики аграрного  
производства Николаевского  
гос. аграрного ун-та,  
т. (0512)39-93-01,  
e-mail: strostand@ mail.ru



Цыганов  
Александр Николаевич,  
ассистент каф. енергетики  
аграрного производства Ни-  
колаевского гос. аграрного  
ун-та,  
т.(0512) 48-09-52