

УДК 621.314

Р. А. СТАВИНСКИЙ, А. Н. ЦЫГАНОВ**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАССОСТОИМОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КРУГОВЫМИ И ВОСЬМИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ**

На основании полученных аналитических зависимостей определены оптимальные геометрические соотношения по критериям минимумов массы и стоимости активной части, и выполнен сравнительный анализ массостоймостных показателей однофазных стержневых электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами.

Ключевые слова: трансформатор, магнитопровод, образующие контуры, оптимизация.

Введение. Важными элементами электро-технических систем являются металлоемкие индукционные статические устройства (ИСУ), такие как трансформаторы и реакторы. В настоящее время рост энергопотребления формирует постановку задач энергоресурсосбережения усовершенствованием процессов производства, распределения и преобразования электроэнергии. Важной составляющей таких задач является повышение технического уровня ИСУ на основе разработки нетрадиционных технических решений и структурной оптимизации их электромагнитных систем (ЭМС) [1, 2].

Цель исследований. Сравнительный анализ массостоймостных показателей однофазных стержневых ЭМС ИСУ с традиционными круговыми и нетрадиционными восьмигранными образующими контурами (ОК) элементов ЭМС.

Материал и результаты исследований. В представленных на рис. 1 вариантах поперечного сечения стержня с круговым (рис. 1, а) и восьмигранными (рис. 1, б и в) ОК, основным отличием является наличие практически равномерного (по окружности) и дискретного (по углам восьмигранника) распределения внутренних остаточных механических напряжений кольцевого изгиба витков катушек [3, 4]. Формирование стержней с использованием восьмигранных ОК позволяет повысить электродинамическую устойчивость и снизить материалоемкость ИСУ по сравнению с цилиндрическими ОП ЭМС. Электродинамическая устойчивость повышается в результате исключения внутренних остаточных напряжений на прямолинейных участках витков с восьмигранными ОК. В зонах вершин многогранных ОК витков формируются участки концентрации внутренних деформационных напряжений. Составляющие таких участков относительно общих длин витков незначительны и при условии усиления изоляции и концентрации механических креплений обмотки в зонах углов многогранника происходит увеличение электродинамической устойчивости [4, 5]. Материалоемкость снижается некоторым повышением заполнения ОК пакетами электротехнической стали (ЭТС) при замене круговой формы сечения стержня на восьмигранную (рис. 1).

Размещение в половинах равностороннего восьмигранника со стороной a_b (рис. 1, б и в) трех и четырех ступеней пакетов пластин (листов) ЭТС обеспечивает площади сечения стержня, соответственно $S_{в3}$ и $S_{в4}$, определяющиеся соотношениями [6]:

$$S_{в3} = 4,3287a_b^2; S_{в4} = 4,4954a_b^2.$$

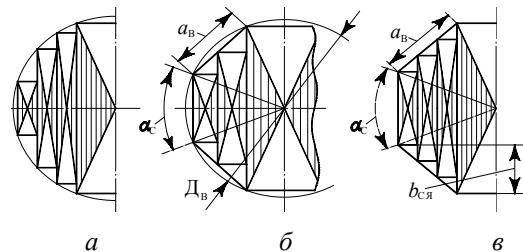


Рис. 1 – Варианты конфигурации сечения стержня:
а – с круговым образующим контуром;
б, в – восьмигранным образующим контуром.

Формированием магнитопровода в соответствии со схемами (рис. 1 б, в) достигаются коэффициенты заполнения K_k восьмигранного ОК ступенчатым сечением стержня:

$$K_{кв3} = S_{в3}/S_{кв} \approx 0,9; K_{кв4} = S_{в4}/S_{кв} \approx 0,931,$$

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

$$S_{кв} = 4,828a_b^2.$$

Аналогичные коэффициенты заполнения кругового ОК (рис. 1, а), $K_{кк} \approx 0,9$ и $K_{кк} \approx 0,931$ достигаются соответственно 7–9 и 14–16 ступенями и размерами пакетов ЭТС в половине окружности [7].

Таким образом, существенным преимуществом ЭМС с восьмигранными ОК является возможность снижения трудоемкости производства магнитопроводов планарных ИСУ в диапазоне мощности до 10000 кВ·А ($K_{кк} \leq 0,931$) [7].

Сравнительный анализ вариантов ЭМС выполняется методом [2] согласно которому целевая функция массы (стоимости) ЭМС ИСУ представляется в виде

$$F_{м(с)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 K_{м(с)} \Pi_{ам(с)}^* \quad (1)$$

где $\Pi_{ид}$ – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок ИСУ;

$\Pi_{ам(с)}^*$ – безразмерный показатель массы (стоимости) ЭМС.

Коэффициенты массы K_m и стоимости K_c соответствуют:

$$K_m = \gamma_c; K_c = C_c \gamma_c,$$

где γ_c и C_c – плотность и удельная стоимость ЭТС.

Входящий в (1) безразмерный показатель является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна

активным материалом обмотки (АМО) K_{30} и универсальных (приемлемых для любого из существующих и возможных вариантов ЭМС [3]) двух основных относительных и третьей дополнительной (используемой в некоторых ЭМС) геометрических управляемых переменных a_m, λ_0, α_c

$$\Pi_{ам(с)}^* = f(K_{30}, a_m, \lambda_0, \alpha_c), \quad (2)$$

где a_m – отношение наружного $D_{нк(в)}$ и внутреннего $D_{вк(в)}$ диаметров расчетных окружностей магнитопровода; λ_0 – отношение высоты $h_{0к(в)}$ и ширины $b_{0к(в)}$ обмоточного окна (рис. 2); α_c – расчетный угол стержня (в рассматриваемых вариантах однофазной планарной ЭМС используются две переменные a_m и λ_0),

$$a_m = D_{нк(в)} / D_{вк(в)}; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_{0к(в)} / b_{0к(в)}. \quad (4)$$

Показатели $\Pi_{ам}^*$ и $\Pi_{ас}^*$ определяются при соблюдении известного принципа электромагнитной эквивалентности ИСУ [3]. 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:

$$K_{квi} = K_{кк} = K_{к}; \quad K_{зовi} = K_{зокi} = K_{зо}; \quad K_{зсвi} = K_{зскi} = K_{зс},$$

где $K_{зовi}, K_{зокi}$, и $K_{зсвi}, K_{зскi}$ – коэффициенты заполнения обмоточного окна и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС [7] в ЭМС соответственно с восьмигранными и круговыми ОК.

При определении целевой функции (1) используются известные уравнения связи [6] площади ЭТС сечения стержня $\Pi_{сск}$ и массы АМО m_o с показателем $\Pi_{ид}$ ИСУ:

$$\Pi_{сск(в)} = \Pi_{ид} / (K_{зо} \lambda_0 b_{ок(в)}^2); \quad (5)$$

$$m_{ок(в)} = 1,5 \gamma_o \Pi_{ид} l_{вк(в)} / \Pi_{сск(в)}, \quad (6)$$

где γ_o и l_w – плотность АМО и средняя длина витка чередующейся обмотки.

Сравнительный анализ и структурная оптимизация вариантов ЭМС выполняются по экстремумам функций (2) $\Pi_{амmin}^*$, $\Pi_{асmin}^*$, а также потерь энергии $\Pi_{алпmin}^*$. Первый множитель (1) может быть использован в поэтапной параметрической оптимизации ИСУ конкретного назначения и исполнения при заданных проектных ограничениях.

В ЭМС с круговыми ОК (рис. 2) ширина обмоточного окна магнитопровода определяется, с учетом (5), выражением

$$b_{ок} = (D_{нк} - D_{вк}) / 2 = D_{вк} (a_m - 1) / 2. \quad (7)$$

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

$$V_{кк} = (2h_{ок} + 2b_{ок} + 4D_{вк}) S_{кк} = 0,7854 D_{вк}^3 [(a_m - 1) \cdot (\lambda_0 + 1) + 4], \quad (8)$$

где $S_{кк}$ – площадь кругового ОК диаметра $D_{вк}$;

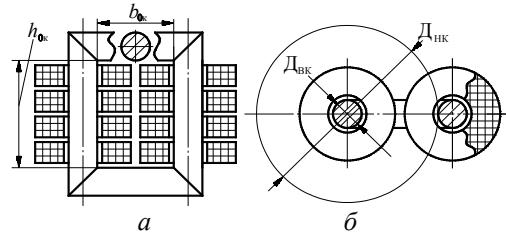


Рис. 2 – Конструктивная схема однофазной стержневой электромагнитной системы с круговыми образующими контурами:
а – продольное сечение; б – поперечное сечение.

Масса ЭТС магнитопровода и средняя длина витка катушки обмотки ЭМС схемы (рис. 2) определяются на основе (3), (4) и (7) уравнениями:

$$m_{мк} = \gamma_c K_{зс} K_{к} 0,7854 D_{вк}^3 \times [(a_m - 1) \cdot (\lambda_0 + 1) + 4]; \quad (9)$$

$$l_{вк} = 2\pi(D_{вк}/2 + b_{ок}/4) = \pi D_{вк} [1 + (a_m - 1)/4] \quad (10)$$

Масса АМО ЭМС схемы (рис. 2) определяется, исходя из (5), (6) и (7), (10) уравнением

$$m_{ок} = 1,5 \gamma_o K_{зо} \lambda_0 l_{вк} b_{ок}^2 = 1,178 \gamma_o K_{зо} \lambda_0 D_{вк}^3 (a_m - 1)^2 [1 + (a_m - 1)/4] \quad (11)$$

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

$$\Pi_{сск} = \pi K_{зс} K_{к} D_{вк}^2 / 4. \quad (12)$$

Из условия равенства (5) и (12), с учетом (7), следует

$$D_{в} = \sqrt[4]{5,093 \Pi_{ид} / (K_{зс} K_{к} K_{зо} \lambda_0 (a_m - 1)^2)}. \quad (13)$$

После подстановки (2) уравнения (9) и (10) масс ЭТС и АМО ЭМС схемы (рис. 2) преобразуются:

$$m_{мк} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мк}^*; \quad (14)$$

$$m_{ок} = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ок}^*, \quad (15)$$

где $\Pi_{мк}^*$ и $\Pi_{ок}^*$ – безразмерные показатели массы магнитопровода и обмотки ЭМС схемы (рис. 2):

$$\Pi_{мк}^* = 0,7854 K_{зс} K_{к} \times \left(\sqrt[4]{5,093 / (K_{зс} K_{к} K_{зо} \lambda_0 (a_m - 1)^2)} \right)^3 \times [(a_m - 1)(\lambda_0 + 1) + 4]; \quad (16)$$

$$\Pi_{ок}^* = 1,178 K_{зо} \lambda_0 \times \left(\sqrt[4]{5,093 / (K_{зс} K_{к} K_{зо} \lambda_0 (a_m - 1)^2)} \right)^3 \times (a_m - 1)^2 [1 + (a_m - 1)/4] \quad (17)$$

Масса $m_{ак}$ и стоимость $C_{ак}$ активных материалов ЭТС схемы (рис. 2) определяются, в соответствии с (2) и на основе (14) – (17) уравнениями:

$$m_{ак} = m_{мк} + m_{ок} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мк}^* + \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ок}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мак}^*; \quad (18)$$

$$C_{ак} = C_{мк} + C_{ок} = C_c \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мк}^* + C_o \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ок}^* = C_c \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{сак}^*, \quad (19)$$

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

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{мак}}^* &= \Pi_{\text{МК}}^* + \gamma_o \Pi_{\text{ОК}}^* / \gamma_c = \\ &= \left(\sqrt[4]{5,093 / (K_{3c} K_K K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2)} \right)^3 \times \\ &\times \left[K_{3c} K_K 0,7854 [(a_M - 1)(\lambda_o + 1) + 4] + \right. \\ &\left. + [1,178 \gamma_o K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4]] / \gamma_c \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{сак}}^* &= \Pi_M^* + C_o \gamma_o \Pi_o^* / (C_c \gamma_c) = \\ &= \left(\sqrt[4]{5,093 / (K_{3c} K_K K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2)} \right)^3 \times \end{aligned}$$

$$\times \left[K_{3c} K_K 0,7854 [(a_M - 1)(\lambda_o + 1) + 4] + [1,178 C_o \gamma_o K_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2 [1 + (a_M - 1)/4]] / C_c \gamma_c \right] \quad (21)$$

Примеры функциональных зависимостей (20) и (21) ЭМС схемы (рис. 2) показаны на рис. 3. Зависимости экстремальных значений (минимумов) $\Pi_{\text{мак}}^* \text{ min}$ и $\Pi_{\text{сак}}^* \text{ min}$ от K_{3o} ЭМС (рис. 2) представлены на рис. 4. Указанные зависимости (рис. 3, рис. 4) получены при соотношениях плотностей (кг/м^3) $\gamma_o/\gamma_c = 8,94/7,65$ и стоимостей $C_o/C_c = 3$ электротехнической обмоточной меди и ЭТС, а также значениях $K_{3c} = 0,91$ и $K_{3o} = 0,25$.

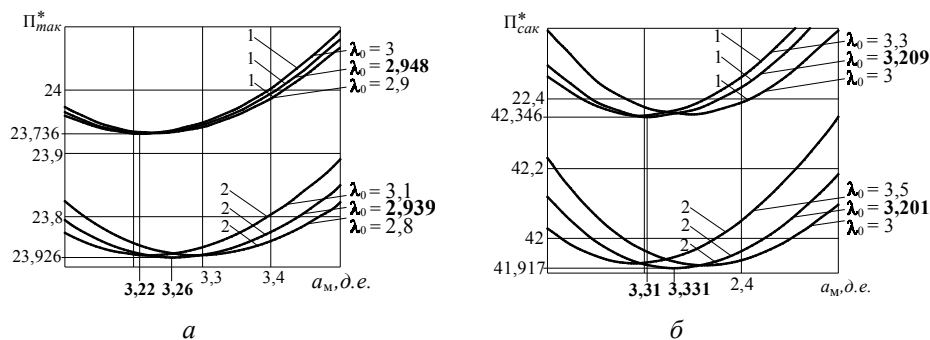


Рис. 3 – Зависимости массостоймостных показателей от геометрических соотношений однофазной стержневой электромагнитной системы с круговыми образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента $K_{\text{Кк}} = 0,9$ (1), $K_{\text{Кк}} = 0,931$ (2):
а – показатель массы; б – показатель стоимости.

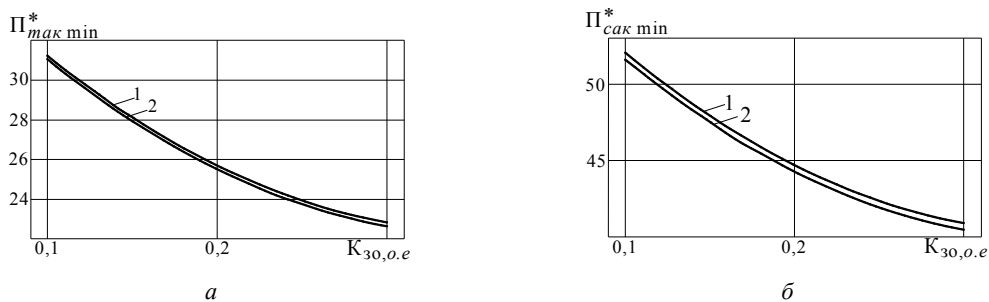


Рис. 4 – Зависимости минимальных значений массостоймостных показателей от класса напряжения однофазной стержневой электромагнитной системы с круговыми образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента $K_{\text{Кк}} = 0,9$ (1), $K_{\text{Кк}} = 0,931$ (2):
а – показатель массы; б – показатель стоимости.

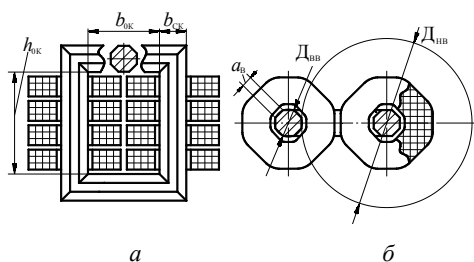


Рис. 5 – Конструктивная схема однофазной стержневой электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами:
а – продольное сечение; б – поперечное сечение.

В ЭМС с многоплоскостными ОП (рис. 5) ширина стержня $b_{\text{ст}}$ (рис. 5, а) и ширина грани ОК стержня (рис. 1, б и в) магнитопровода (рис. 5) определяются через диаметр описанной окружности $D_{\text{об}}$ (рис. 1, б, рис. 5, б) соотношениями:

$$b_c = D_{\text{об}} \cos(\alpha_c/2) = 0,9239 D_{\text{об}}; \quad (22)$$

$$a_b = D_{\text{об}} \sin(\alpha_c/2) = 0,3827 D_{\text{об}}, \quad (23)$$

где $\alpha = 45^\circ$ – центральный угол грани стержня (рис. 1, б и в). Ширина обмоточного окна магнитопровода ЭМС с учетом (3) и (22), выражением:

$$b_{об} = (D_{нв}/2) - (b_{св}/2) = \left((a_m D_{нв})/2 \right) - \left((D_{нв}/2) \cos(\alpha_c/2) \right) = D_{нв} (a_m - 0,9239)/2 \quad (24)$$

Объем ограниченный восьмигранными ОК стержней и ярем магнитопровода ЭМС схемы (рис. 5)

$$V_{кв} = (2h_{об} + 2b_{об} + 4b_{св}) S_{кв} = 0,7055 D_{нв}^3 \times [(a_m - 0,9239) \cdot (1 + \lambda_0) + 3,6956] \quad (25)$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС схемы (рис. 5) определяется, на основе (3), (4), (22) – (25) уравнением

$$m_{мв} = \gamma_c K_{зс} K_{кк} 0,7055 D_{нв}^3 \times [(a_m - 0,9239) \cdot (1 + \lambda_0) + 3,6956] \quad (26)$$

Средняя длина витка катушки обмотки с восьмигранными ОК (рис. 5, б) определяется, с учетом (23) и (25)

$$l_{вб} = 8a_{п} + \pi b_{об} / 4 = 3,06 \times [1 + 0,1283(a_m - 0,9239)] D_{нв} \quad (27)$$

Масса АМО ЭМС схемы (рис. 5) определяется, исходя из (5), (6) и (24), (27) уравнением

$$m_{об} = 1,5 \gamma_0 K_{з0} \lambda_0 l_{вб} b_{об}^2 = 4,59 \gamma_0 K_{з0} \lambda_0 D_{нв}^3 \times [(a_m - 0,9239)/2]^2 [1 + 0,1283(a_m - 0,9239)] \quad (28)$$

Площадь ЭТС стержня с восьмигранным ОК (рис. 1, б и в) определяется, с использованием (23)

$$\Pi_{свв} = 0,70628 K_{зс} K_{кк} D_{нв}^2 \quad (29)$$

Из условия равенства (5) и (29), с учетом (27), следует

$$D_{нв} = \sqrt[4]{5,6635 \Pi_{ид} / (K_{зс} K_{кк} K_{з0} \lambda_0 (a_m - 0,9239)^2)} \quad (30)$$

После подстановки (30) уравнения (26) и (28) масс ЭТС и АМО ЭМС схемы (рис. 5) преобразуются:

$$m_{мв} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мв}^* \quad (31)$$

$$m_{об} = \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{об}^* \quad (32)$$

где $\Pi_{мв}^*$ и $\Pi_{об}^*$ – относительные показатели массы магнитопровода и обмотки ЭМС схемы (рис. 5):

$$\Pi_{мв}^* = 0,7055 K_{зс} K_{кк} \times \left(\sqrt[4]{5,6635 / (K_{зс} K_{кк} K_{з0} \lambda_0 (a_m - 0,9239)^2)} \right)^3 \times [(a_m - 0,9239)(1 + \lambda_0) + 3,6956] \quad (33)$$

$$\Pi_{об}^* = 4,59 K_{з0} \lambda_0 \times \left(\sqrt[4]{5,6635 / (K_{зс} K_{кк} K_{з0} \lambda_0 (a_m - 0,9239)^2)} \right)^3 \times [(a_m - 0,9239)/2]^2 [1 + 0,1283(a_m - 0,9239)] \quad (34)$$

Масса $m_{ав}$ и стоимость $C_{ав}$ активных материалов ЭМС схемы (рис. 5) определяются, в соответствии с (2) и на основе (31) – (34), уравнениями:

$$m_{ав} = m_{мв} + m_{об} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мв}^* + \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{об}^* = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мав}^*$$

$$C_{ав} = C_{мв} + C_{об} = C_c \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мв}^* + C_0 \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{об}^* = C_c \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{сав}^*$$

где $\Pi_{мав}^*$ и $\Pi_{сав}^*$ – относительные показатели массы и стоимости активных материалов однофазной планарной ЭМС с многоплоскостными ОП и восьмигранными ОК (рис. 5),

$$\Pi_{мав}^* = \Pi_{мв}^* + \gamma_0 \Pi_{об}^* / \gamma_c = \left(\sqrt[4]{5,6635 / (K_{зс} K_{кк} K_{з0} \lambda_0 (a_m - 0,9239)^2)} \right)^3 \times [K_{зс} K_{кк} 0,7055 (a_m - 0,9239)(1 + \lambda_0) + 3,6956] + \gamma_0 K_{з0} \lambda_0 4,59 \times [1 + 0,1283(a_m - 0,9239)] (a_m - 0,9239)/2 / \gamma_c \quad (35)$$

$$\Pi_{сав}^* = \Pi_{мв}^* + C_0 \gamma_0 \Pi_{об}^* / (C_c \gamma_c) = \left(\sqrt[4]{5,6635 / (K_{зс} K_{кк} K_{з0} \lambda_0 (a_m - 0,9239)^2)} \right)^3 \times [K_{зс} K_{кк} 0,7055 (a_m - 0,9239) \cdot (1 + \lambda_0) + 3,6956] + C_0 \gamma_0 K_{з0} \lambda_0 4,59 \cdot [1 + 0,1283(a_m - 0,9239)] \times [(a_m - 0,9239)/2]^2 / C_c \lambda_c \quad (36)$$

Функциональные зависимости (35) и (36) ЭМС схемы (рис. 5) при удельных показателях и расчетных коэффициентах аналогичных ЭМС (рис. 2) показаны на рис. 6. Зависимости экстремальных значений (минимумов) $\Pi_{мав}^* \min$ и $\Pi_{сав}^* \min$ от $K_{з0}$ ЭМС (рис. 5) с указанными выше данными представлены на рис. 7.

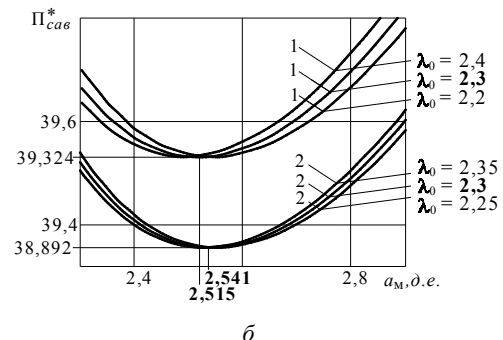
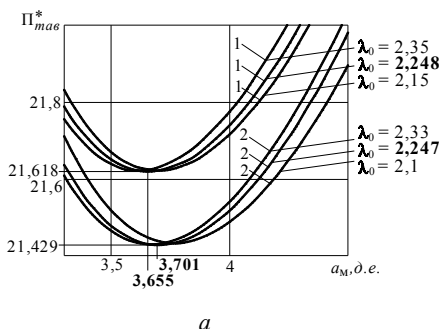


Рис. 6 – Зависимости массостоймых показателей от геометрических соотношений однофазной стержневой электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента $K_{кк} = 0,9$ (1), $K_{кк} = 0,931$ (2): а – показатель массы; б – показатель стоимости.

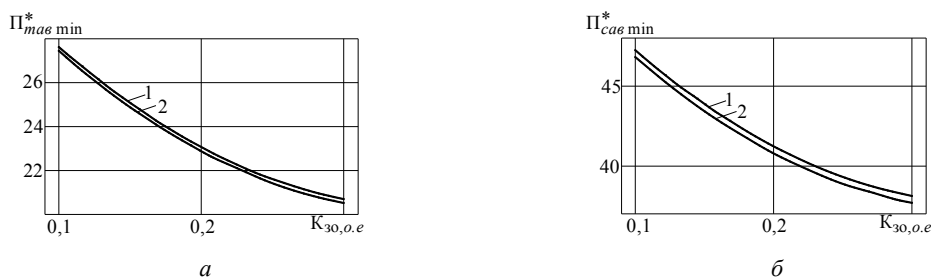


Рис. 7 – Зависимости минимальных значений массоистомостных показателей от класса напряжения однофазной стержневой электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами при двух значениях контурного коэффициента $K_{кк} = 0,9$ (1), $K_{кк} = 0,931$ (2):
 а – показатель массы; б – показатель стоимости.

Выводы. 1. Замена в однофазных ЭМС ИСУ круговых ОК на восьмигранные ОК позволяет, в дополнение к предпосылкам повышения электродинамической устойчивости, улучшить их массоистомостные показатели.

2. Снижение показателей массы и стоимости однофазных стержневых ЭМС с восьмигранными ОК относительно аналогов с традиционными круговыми ОК составляет 9 – 12 % и 9 – 6 %.

Список литературы: 1. 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. – Вып. 1(77) – С. 64–69. 2. Ставинский Р. А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р. А. Ставинский // *Вісник КДУ*. – Кременчук. – 2010. – Вып. 4 (63) ч. 2. – С. 91–94. 3. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов. // *Техн. Електродинаміка* – 2005. – Вып. 1. – С. 53–60. 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. – Вып. 5. – С. 43–47. 5. Пат. 38596 Украина, МПК (2009) H01F27/28, H01F27/30, H01F27/32. Обмотка статического индукционного пристрою / Ставинський А. А., Ставинський Р. А., Циганов О. М. (Україна) – у 200809425; заявл. 18.07.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. №5. 6. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массоистомостных показателей планарных трехфазных электромагнитных систем с

круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Циганов // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2010. – Вып. 6. – С. 106–112. 7. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Переаб. и доп. // – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528с.

Bibliography (transliterated): 1. Stavinskiy, A. A., I. A. Tishchenko and N. I. Zelyoniy "Perspektivy i osobennosti dalneyshego usovershenstvovaniya induktsionnykh elektromekhanicheskikh i staticheskikh preobrazovateley." *Elektromekhanichni ta kompyuterni sistemi*. No. 1 (77). 2010. 64–69. Print. 2. Stavinskiy, R. A. "Netraditsionnye tehnicheckie resheniya, postanovka zadachi i metod strukturnoy optimizatsii induktsionnykh staticheskikh ustroystv." *Visnik KDU*. No. 4 (63) Vol. 2. 2010. 91–94. Print. 3. Lazarev, V. I. "Obobshchenie rezultatov issledovaniy po probleme elektrodinamicheskoy stoykosti silovykh transformatorov." *Tehn. Elektrodinamika*. No 1. 2005. 53–60. Print. 4. Stavinskiy, A. A. "Genezis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov elektromagnitnykh sistem (elektrodinamicheskaya ustoychivost i sistemi so stykovyimi magnitoprovodami)." *Elektrotehnika i elektromekhanika*. No. 5. 2011. 43–47. Print. 5. Stavinskiy, A. A., R. A. Stavinskiy, and O. M. Tsiganov Pat. 38596 Ukrayina, MPK (2009) H01F27/28, H01F27/30, H01F27/32. "Obmotka statichnogo Induktlyonogo pristroyu" (Ukrayina) – u 200809425; Byul. 5. Print. 6. Stavinskiy, A. A., R. A. Stavinskiy and A. N. Tsiganov "Srvnitelnyy analiz masostimostnykh pokazateley planarnykh trehfaznykh elektromagnitnykh sistem s krugovymi i vosmigrannymi obrazuyuschimi konturami sterzhney." *Elektrotehnichni ta kompyuterni sistemi*. No 6. 2010. 106–112. Print. 7. Tihomirov, P. M. "Raschet transformatorov." Moskva: Energoatomizdat, 1986. Print.

Поступила (received) 06.07.2015

«Сведения об авторах /About the Authors»

Ставинский Ростислав Андреевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры электрооборудования судов и информационной безопасности; тел.: +38(066) 128-55-18; e-mail: strostand@mail.ru

Stavinskij Rostislav Andreevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Chair of the Department of the shipboard electrical power systems and information security, phone: +38(066) 128-55-18; e-mail: strostand@mail.ru

Циганов Александр Николаевич – Николаевский национальный аграрный университет, ассистент кафедры энергетики аграрного производства, тел.: +38 (0512) 48-09-52; e-mail: tsyganov.sasha@mail.ru

Ciganov Aleksandr Nikolaevich – Mykolayiv national Agrarian University, Postgraduate Student at the Department of the Energy of agricultural production +38 (0512) 48-09-52; e-mail: tsyganov.sasha@mail.ru