

Е.А. Авдеева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАНАРНОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АКСИАЛЬНОЙ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ СТЕРЖНЕЙ И ОБМОТОЧНЫХ ОКОН (МАССОСТОИМОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ)

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімумів маси і вартості активної частини та виконано порівняльний аналіз масовартісних показників планарної і просторової аксіальної трифазних електромагнітних систем з прямокутними і секторними твірними контурами стрижнів, ярем і катушок обмоток.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также выполнен сравнительный анализ массово-стоимостных показателей планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с прямоугольными и секторными образующими контурами стержней, ярем и катушек обмоток.

Проблема совершенствования распределительных и специальных трансформаторов с каждым годом становится все более актуальной во всем мире [1, 2]. В настоящее время в распределительных сетях эксплуатируются, а специализированными заводами Украины производятся трансформаторы и реакторы (дроссели) с "традиционными" структурами электромагнитных систем (ЭМС) характеризующимися классификационными признаками [2] плоских параллельных, а также цилиндрических образующих поверхностей (ОП) обмоточных окон и стержней. Основным видом ЭМС трехфазных трансформаторов (ТТ) мощность которых достигает 250 кВ·А [2, 3] являются планарные ЭМС с плоскими параллельными ОП. Массовость использования подобных ЭМС, особенно в ТТ малой мощности и дросселях, обусловлена относительно низкой трудоёмкостью производства планарных магнитопроводов на основе фактора идентичности ширины слоёв электротехнической стали (ЭТС) в прямоугольном сечении стержня.

Известно конструкторско-технологическое решение трехфазной пространственной ЭМС с плоскими параллельными ОП магнитопровода [2,3]. От известных (по состоянию на 2004 г.) пространственных аналогов указанная ЭМС отличается нетрадиционной "секторной" конфигурацией сечения стержня, а также меньшими материалоемкостью и потерями активной мощности [4]. Известно также, что показатели технического уровня (ПТУ) пространственных ЭМС могут быть потенциально выше планарных ЭМС [5]. Однако отсутствуют аналитические количественные результаты определения соотношений ПТУ планарных и пространственных ЭМС как с традиционными, так и с нетрадиционными ОП. При этом существует необходимость разработки специальных ТТ морского назначения с минимальными массогабаритными показателями [6].

Целью работы является сравнительный анализ трехфазной планарной ЭМС с плоскими параллельными ОП и пространственной ЭМС с секторной конфигурацией стержней соответствующей таким же ОП. В настоящей первой части работы рассматриваются особенности и массово-стоимостные показатели.

Основными при производстве магнитопроводов являются технологии плоской шихтовки и спиральной

навивки ЭТС [5]. Шихтованный "безотходный" магнитопровод (рис. 1, а) собирается из наборов трех вариантов прямоугольных пластин (листов) ЭТС, отличающихся длиной. В каждом слое при сборке образуется семь стыков, при этом шихтовка слоев "впереплет" повышает монолитность магнитопровода (рис. 1,а) и снижает ток холостого хода ТТ. Технология навивки ленты (рулона) ЭТС характеризуется преимуществами относительной простоты комплексной автоматизации и снижения трудоемкости производства, а также возможности использования минимальных толщин слоев ЭТС. В связи с малой шириной режущего инструмента (абразивный диск) стыковые магнитопроводы из витых разрезанных заготовок (рис. 1,б) также считаются весьма малоотходными. Витой магнитопровод традиционной конструкции (рис. 1,б) формируется из трех заготовок двух вариантов геометрии с прямоугольными внутренними образующими контурами. Особенностью конструкции (рис. 1,б) является двухконтурность фазных элементов и отсутствие магнитной связи между витыми секциями – контурами. Подобная двухконтурность является причиной сдвига фаз магнитных потоков в смежных секциях. Поэтому магнитная индукция в сечении каждого контура повышается в $2/\sqrt{3}$ раз с повышением потерь в стали ЭМС с магнитопроводом (рис. 1,б) относительно ЭМС с магнитопроводом (рис. 1,а) [5]. Недостатков двухконтурности лишен магнитопровод (рис. 1,в) для формообразования которого вводятся дополнительные технологические операции опрессовки (сплющивания) витых кольцевых заготовок и шлифовки их стыковых поверхностей. Стержневые и угловые участки магнитопровода формируются из трех идентичных сплюсненных заготовок большего диаметра, а четыре яремных участка выполняются поперечной разрезкой двух сплюсненных заготовок меньшего диаметра [7]. Для обеспечения удовлетворительного уровня намагничивающего тока ТТ с магнитопроводом (рис. 1,в) необходима шлифовка восьми поверхностей, образующих в магнитной цепи восемь стыковых зазоров.

Планарность каждого из конструктивно-технологических решений магнитопроводов (рис. 1)

обуславливает фазную магнитную несимметрию ЭМС более выраженную в варианте (рис. 1,б), а также тепловую несимметрию фазных катушек обмоток. Другим известным недостатком ЭМС с магнитопроводами (рис. 1) является повышенная средняя длина витка обмоточной катушки прямоугольной формы [5].

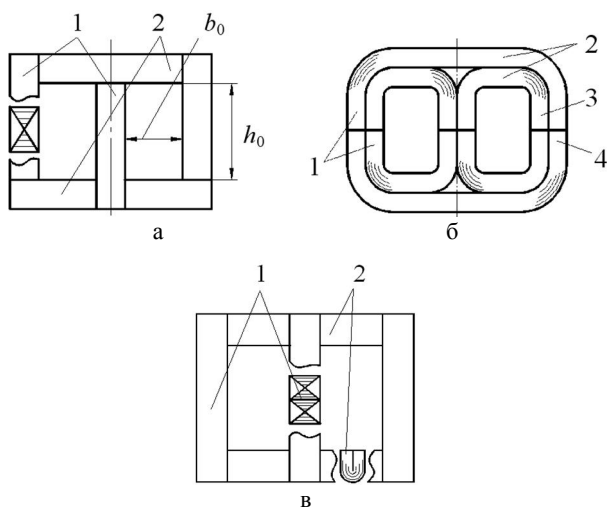


Рис. 1. Варианты планарной конструктивной схемы шихтованного (а) и витого (б и в) трехфазных магнитопроводов с прямоугольными сечениями стержней: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – внутренняя секция; 4 – наружная секция

Секторная конфигурация сечений стержней образующая в ЭМС (рис. 2) обмоточные окна постоянной ширины достигается сборкой стержней из элементов, являющихся частями одной или нескольких витых кольцевых коаксиальных заготовок разрезаемых в плоскостях, отстоящих на 120° . Количество заготовок определяется диаметром режущего абразивного диска и мощностью трансформатора. Стержни устанавливаются между витыми ярами с треугольными образующими внутренних контуров [4]. Пространственная структура создаёт полную пофазную электромагнитную и тепловую симметрию, а нетрадиционная конфигурация стержней и катушек обеспечивает высокое использование геометрического объёма при встраивании ЭМС (рис. 2) в цилиндрическую оболочку. Технология изготовления симметричного магнитопровода такой ЭМС полностью соответствует "традиционной" технологии производства магнитопроводов (рис.1,б) и не требует перестройки или сложного переоснащения. Конструкция составных стержней из симметричных частей кольцевых заготовок упрощает технологию изготовления и повышает предельную мощность ЭМС (рис. 2), относительно ЭМС с магнитопроводом (рис. 1,в) в связи с отсутствием технологической операции "сплющивания". При этом ограничение намагничивающего тока достигается шлифовкой двух стыковых поверхностей ярем и двух параллельных поверхностей сборки концентрических заготовок нарезки стержней.

Аналитический сравнительный анализ активной части трансформаторов отличающихся структурой ЭМС и технологией изготовления магнитопроводов предполагает решение задач структурной оптимизации. Такие задачи требуют разработки математиче-

ских моделей (ММ) на основе универсальных управляемых переменных (УП) вне зависимости от мощности и исполнения ("сухой", "масляный" или "элегазовый") и, соответственно, способа охлаждения и величин электромагнитных нагрузок трансформатора.

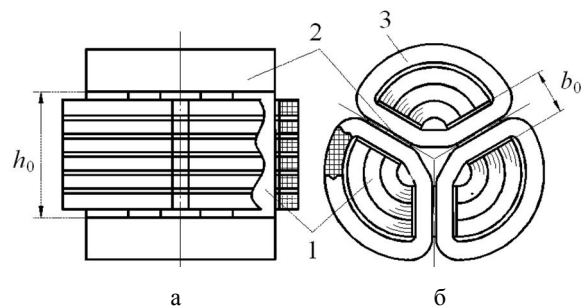


Рис. 2. Вид сбоку (а) и поперечная структура (б) конструктивной схемы пространственной трехфазной электромагнитной системы с витым стыковым магнитопроводом: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Для решения задач сравнительного анализа различных вариантов структур и исполнений ЭМС предложены относительные коэффициенты ПТУ, а также разработан специальный метод структурной оптимизации с относительными геометрическими УП [8]. Указанный метод заключается в представлении полной целевой функции одного из трех ПТУ $F_{цфи}$ ($i = 3$) в виде произведения двух сомножителей

$$F_{цфи} = \left(4\sqrt{P_{ид}}\right)^3 P_i, \quad (1)$$

где $P_{ид}$ – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок ТТ; P_i – целевая функция одного из упомянутых выше трех ПТУ в виде относительных коэффициентов массы $P_{ма}^*$, стоимости $P_{са}^*$ и потерь $P_{па}^*$ активной мощности:

$$P_{ма}^* \equiv P_{ма}^*; P_{са}^* \equiv P_{са}^*; P_{па}^* \equiv P_{па}^*.$$

Показатель $P_{ид}$ определяется номинальной мощностью, средним значением амплитуды индукции в стержне, частотой сети, плотностями токов обмоток, энергетическими коэффициентами нагрузки и трансформатора, изменением напряжения трансформатора под нагрузкой, а также предварительно заданным коэффициентом полезного действия трансформации энергии. Входящий в (1) относительный показатель зависит от коэффициента заполнения обмоточного окна K_{30} (класса напряжения) ТТ и является функцией универсальных двух основных относительных и третьей дополнительной (используемой в части ЭМС) геометрических УП a_m , λ_0 , и α_c [4, 8]

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

где a_m – отношение наружного D_n и внутреннего D_v диаметров расчетных окружностей магнитопровода; λ_0 – отношение высоты h_0 и ширины b_0 (рис. 1,а, рис. 2) обмоточного окна; α_c – центральный угол стержня (рис. 3):

$$a_m = D_n / D_v; \quad (3)$$

$$\lambda_0 = h_0 / b_0. \quad (4)$$

Кроме того, P_i^* зависят от соотношений удельных показателей. $P_{ам}^*$ зависит от соотношения плот-

ностей γ_o/γ_c , а Π_{ac} зависит от соотношений указанных плотностей и стоимостей S_o/S_c активного материала обмотки (АМО) и ЭТС. $\Pi_{ап}^*$ зависит от соотношения плотностей и соотношений удельных потерь АМО и ЭТС, а также электромагнитных нагрузок.

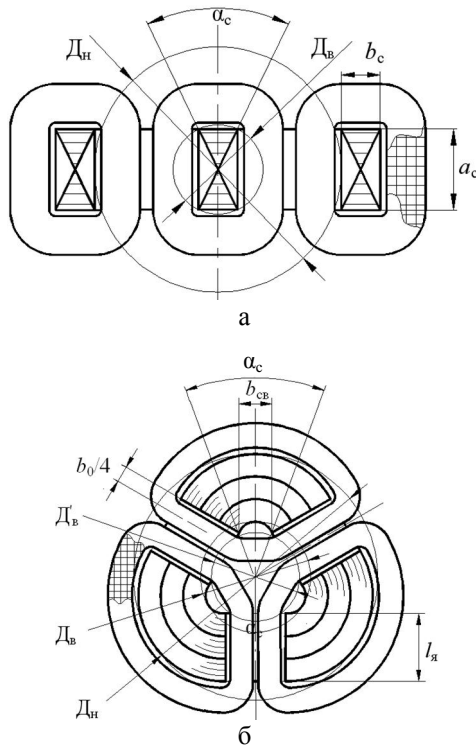


Рис. 3. Поперечные сечения и геометрические параметры планарной (а) и пространственной (б) электромагнитных систем с плоскими параллельными образующими поверхностями обмоточных окон и стержней

При сравнительном анализе планарной (рис. 3,а) и пространственной (рис. 3,б) ЭМС, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности принимается, что средние значения индукции в стержнях и ярмах, а также коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС $K_{зс}$ соответственно идентичны. Средние значения амплитуд индукции в стержнях и ярмах (прямых участков ярма) магнитопроводов каждой из ЭМС (рис. 3) одинаковы. Принимается, что радиус изгиба внутренних витков угловых зон фазных чередующихся катушек равен величине изоляционного промежутка между катушкой и стержнем (рис. 3). В ЭМС (рис. 3,а) УП α_c является центральный угол стержня, а в ЭМС (рис.3, б) угол α_c выполняется минимальным в соответствии с технологическим ограничением $\alpha_c \geq 5-15^\circ$.

При разработке ММ методом [8] дополнительно к (1), (2) и (3), (4) используются общие выражения связи площади обмоточного окна S_o с площадью ЭТС стержня S_c и зависимости массы m_o АМО трехфазной системы чередующихся катушек от средней длины витка l_w и ширины обмоточного окна b_o [4]:

$$S_o = \Pi_{ид}/(S_c K_{зo}); \quad (5)$$

$$m_o = 1,5\gamma_o K_{зo} \lambda_o l_w b_o^2. \quad (6)$$

Разработка ММ масстоимостного анализа планарной ЭМС с шихтованным или витым магнитопро-

водом выполняется с использованием геометрических параметров (рис. 1,а и рис. 3,а).

Стороны a_c и b_c сечения стержня определяются через D_b и α_c выражениями:

$$a_c = D_b \cos(\alpha_c/2); \quad (7)$$

$$b_c = D_b \sin(\alpha_c/2). \quad (8)$$

Площадь прямоугольного сечения ЭТС стержня (рис. 3,а) определяется с использованием (7) и (8)

$$S_{сп} = K_{зс} a_c b_c = K_{зс} (D_b^2/2) \sin \alpha_c. \quad (9)$$

Ширина обмоточного окна определяется в соответствии с рис. 3, а и с учетом (4) и (8)

$$b_o = (D_n/2) - (b_o/2) = D_b [a_m - \sin(\alpha_c/2)]/2. \quad (10)$$

Масса ЭТС магнитопровода (рис. 1,а) определяется с использованием (5) и (8-10) выражением

$$m_{мп} = K_{зс} \gamma_c [3h_o S_{сп} + 2S_{сп} (3b_c + 2b_o)] = \\ = K_{зс} \gamma_c D_b^3 \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o\right) a_m + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o\right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \times \quad (11)$$

$\times \sin \alpha_c.$

На основе (3), (5) и (10) можно получить зависимость между $S_{сп}$ и b_o

$$S_{сп} = \Pi_{ид}/(S_o K_{зo}) = \Pi_{ид}/(K_{зo} \lambda_o b_o^2) = \\ = 4\Pi_{ид} / \left[K_{зo} \lambda_o D_b^2 \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

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

$$K_{зс} (D_b^2/2) \sin \alpha_c = 4\Pi_{ид} / \left[K_{зo} \lambda_o D_b^2 \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \right]; \quad (13)$$

$$D_b = \sqrt[4]{8\Pi_{ид} / \left[K_{зс} K_{зo} \lambda_o \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]}.$$

Подстановка (13) в (11) преобразует выражение массы магнитопровода (рис. 1,а) к виду

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

где $\Pi_{мп}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода (рис. 1,а)

$$\Pi_{мп}^* = K_{зс} \left(\sqrt[4]{8\Pi_{ид} / \left[K_{зс} K_{зo} \lambda_o \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \quad (15)$$

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

Средняя длина витка катушки ЭМС (рис. 3,а) определяется на основе (7), (8) и (10)

$$l_{wп} = 2(a_c + b_c) + 2\pi b_o/4 = \\ = 2D_b \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \quad (16)$$

После подстановки (10) и (16) общее выражение массы АМО (6) для ЭМС (рис. 3,а) принимает вид

$$m_{оп} = 0,75 K_{зo} \gamma_o \lambda_o D_b^3 \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \times \\ \times \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \quad (17)$$

Подстановка (13) преобразует выражение (17) массы АМО ЭМС (рис. 3,а) к виду

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

где $\Pi_{\text{моп}}^*$ – относительный показатель массы АМО (рис. 3,а),

$$\Pi_{\text{моп}}^* = 0,75 K_{30} \lambda_o \left(\sqrt[4]{8 \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \quad (19)$$

Масса $m_{\text{ап}}$ и стоимость $C_{\text{ап}}$ активных материалов ЭМС (рис. 3,а) определяются на основе (14), (15) и (18), (19) выражениями:

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

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

где относительные показатели массы и стоимости $\Pi_{\text{мап}}^*$ и $\Pi_{\text{сап}}^*$ указанной планарной ЭМС определяются выражениями:

$$\Pi_{\text{мап}}^* = \left(\sqrt[4]{8 \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \left\{ K_{3c} \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) a_M + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o \right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_o K_{30} \lambda_o \times \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] / \gamma_c \right\}; \quad (20)$$

$$\Pi_{\text{сап}}^* = \left(\sqrt[4]{8 \left[K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right]} \right)^3 \times \left\{ K_{3c} \left[\left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) a_M + \left(2 - \frac{3}{4} \lambda_o \right) \sin \frac{\alpha_c}{2} \right] \sin \alpha_c + 0,75 \gamma_o C_o K_{30} \times \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] / (\gamma_c C_c) \right\}. \quad (21)$$

Результаты расчета оптимальных значений УП и показателей планарной ЭМС (рис. 3,а) с медным АМО, определенные при соотношениях плотностей (кг/м³) $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,65$ и стоимостей $C_o/C_c = 4$, а также при $K_{3c}=0,91$ приведены в табл. 1 и табл. 2. Примеры функциональных зависимостей (20) и (21) от a_M ЭМС (рис. 3,а) представлены на рис. 4. Указанные зависимости получены при экстремальных значениях соответственно $\alpha_{c3}=50,93^\circ$ и $\alpha_{c3}=51,6^\circ$ при $K_{30}=0,3$.

Таблица 1

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы планарной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{мап}}^*$, о.е.
	a_{M3} , о.е.	λ_{o3} , о.е.	α_{c3} , град.	
0,3	2,063	2,762	50,93	28,138
0,25	2,216	2,757	50,87	29,692
0,2	2,422	2,751	50,76	31,797

Таблица 2

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя стоимости планарной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{\text{сап}}^*$, о.е.
	a_{M3} , о.е.	λ_{o3} , о.е.	α_{c3} , град.	
0,3	1,261	2,801	51,6	56,55
0,25	1,338	2,797	51,5	58,752
0,2	1,44	2,791	51,33	61,73

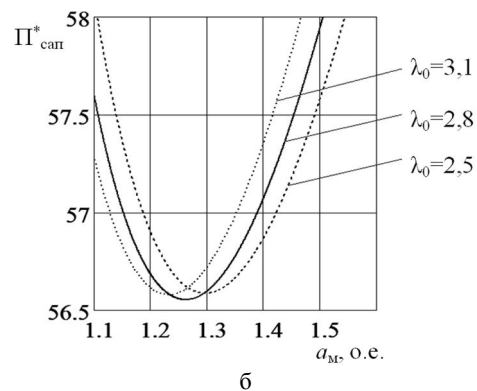
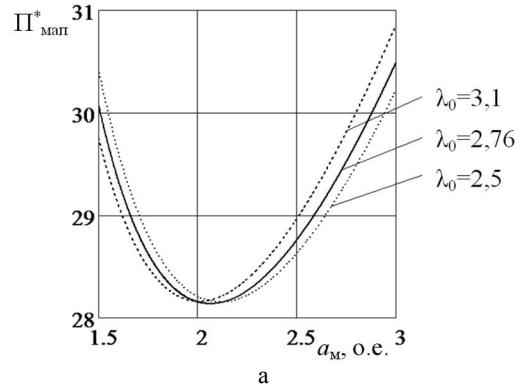


Рис. 4. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) от геометрических соотношений трехфазной планарной электромагнитной системы с прямоугольным сечением стержней класса напряжения до 1000 В

Выражения диаметра внутренней расчетной окружности и массы ЭТС магнитопровода пространственной ЭМС (рис. 2) [4]:

$$D_{\text{в}} = \sqrt[4]{3 \Pi_{\text{ид}} / \left[\pi K_{3c} K_{30} \lambda_o \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]}; \quad (22)$$

$$m_{\text{мс}} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{ид}}} \right)^3 \Pi_{\text{ммс}}^* , \quad (23)$$

где $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ – коэффициенты угла α_c (рис. 3,б); $\Pi_{\text{ммс}}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 2):

$$K_{\alpha 1} = \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right]; \quad (24)$$

$$K_{\alpha 2} = \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right]; \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{ммс}}^* &= \pi K_{3c} \left(4 \sqrt[3]{\left[\pi K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]} \right)^3 \times \\ &\times (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \times \\ &\times \left[K_{\alpha 2} (\lambda_0 + 1,1547) + 2,4184 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Диаметр вспомогательной окружности D_B' вписанного шестигранника с гранями b_o и b_{cb} , а также, с учетом (3), радиальная длина яра (стержня) $l_{я}$ (рис. 3,б) связаны с диаметром D_B выражениями [4]:

$$D_B' = D_B / \left[\cos\left(\frac{\alpha_c}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha_c}{2}\right) / \sqrt{3} \right]; \quad (27)$$

$$l_{я} = (D_H - D_B) / 2 = D_B (a_M - 1) / 2. \quad (28)$$

Величина отрезка между вершинами внутренних углов стержня b_{cb} и ширина обмоточного окна b_o определяются, с использованием (24), (25), и (27) соотношениями [4]:

$$b_{cb} = D_B' \sin \frac{\alpha_c}{2} = \frac{D_B \sin(\alpha_c / 2)}{\left[\cos(\alpha_c / 2) + \sin(\alpha_c / 2) / \sqrt{3} \right]} = K_{\alpha 1} D_B; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} b_o &= D_B' \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) = \\ &= \frac{D_B \sin \left[(\pi / 3) - (\alpha_c / 2) \right]}{\left[\cos(\alpha_c / 2) + \sin(\alpha_c / 2) / \sqrt{3} \right]} = K_{\alpha 2} D_B. \end{aligned} \quad (30)$$

Средняя длина витка катушки секторной формы ЭМС (рис. 2) при принятом допущении радиуса изгиба внутренних витков катушек определяется выражением

$$l_{wc} = 2l_{я} + 2b_{cb} + \frac{\pi}{4} b_o + \frac{\pi}{12} b_o + \frac{2\pi}{3} \left(\frac{b_{cb}}{\sqrt{3}} + l_{я} + \frac{b_o}{4} \right). \quad (31)$$

После подстановки (28), (29), (30), выражение (31) преобразуется к виду

$$l_{wc} = D_B [2,0472(a_M - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}]. \quad (32)$$

На основе (6), (30) и (32) определяется выражение массы АМО ЭМС (рис. 2)

$$\begin{aligned} m_{oc} &= 1,5K_{30}\gamma_o\lambda_o K_{\alpha 2}^2 D_B^3 [2,0472(a_M - 1) + \\ &+ 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}]. \end{aligned} \quad (33)$$

Подстановка (22) преобразует (33) к виду

$$m_{oc} = \gamma_o \left(4 \sqrt[3]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мос}^*, \quad (34)$$

где $\Pi_{мос}^*$ – относительный показатель массы АМО ЭМС (рис. 2),

$$\begin{aligned} \Pi_{мос}^* &= 1,5K_{30}\gamma_o\lambda_o \times \\ &\times \left(4 \sqrt[3]{\left[\pi K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]} \right)^3 \times \\ &\times [2,0472(a_M - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2. \end{aligned} \quad (35)$$

Масса m_{ac} и стоимость C_{ac} активных материалов ЭМС (рис. 2) определяются, исходя из (23), (26), и (34), (35) выражениями:

$$m_{ac} = m_{мс} + m_{ос} = \gamma_c \left(4 \sqrt[3]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мас}^* ;$$

$$C_{ac} = C_{мс} + C_{ос} = \gamma_c C_c \left(4 \sqrt[3]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{сac}^* ,$$

где относительные показатели массы и стоимости

$\Pi_{мас}^*$ и $\Pi_{сac}^*$ определяются функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned} \Pi_{мас}^* &= \pi \left(4 \sqrt[3]{\left[\pi K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]} \right)^3 \times \\ &\times \{ K_{3c} (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) [K_{\alpha 2} (\lambda_0 + 1,1547) + \right. \\ &+ 2,4184 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right)] + 0,4775K_{30}\lambda_o [2,0472(a_M - 1) + \\ &+ 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o / \gamma_c \}; \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{сac}^* &= \pi \left(4 \sqrt[3]{\left[\pi K_{3c} K_{30} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]} \right)^3 \times \\ &\times \{ K_{3c} (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) [K_{\alpha 2} (\lambda_0 + 1,1547) + \\ &+ 2,4184 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right)] + 0,4775K_{30}\lambda_o [2,0472(a_M - 1) + \\ &+ 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}] K_{\alpha 2}^2 \gamma_o C_o / (\gamma_c C_c) \}. \end{aligned} \quad (37)$$

Результаты расчета оптимальных значений УП и показателей пространственной ЭМС (рис. 3,б), определенных при удельных показателях и расчетных коэффициентах аналогичных ЭМС (рис. 3,а), а также при $\alpha_c = 10^\circ$ приведены в табл. 3 и табл. 4. Примеры функциональных зависимостей (36) и (37) ЭМС (рис. 3,б), представлены на рис. 5.

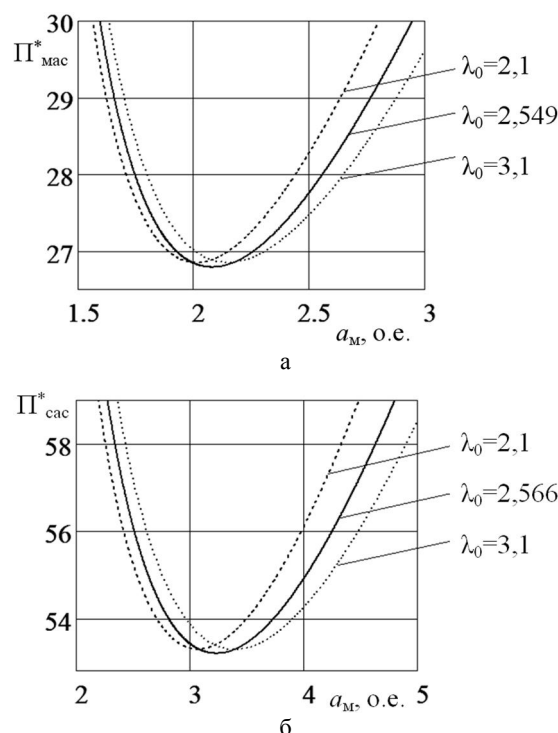


Рис. 5. Зависимости показателей массы (а) и стоимости (б) от геометрических соотношений трехфазной пространственной электромагнитной системы с секторным сечением стержней класса напряжения до 1000 В

Таблица 3
Экстремальные значения управляемых переменных и показателя массы пространственной аксиальной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных		$\Pi^*_{\text{мас}}$, о.е.
	$a_{\text{мэ}}$, о.е.	$\lambda_{\text{оэ}}$, о.е.	
0,3	2,079	2,549	26,790
0,25	1,979	2,546	28,315
0,2	1,868	2,544	30,383

Таблица 4
Экстремальные значения управляемых переменных и показателя стоимости пространственной аксиальной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных		$\Pi^*_{\text{сac}}$, о.е.
	$a_{\text{мэ}}$, о.е.	$\lambda_{\text{оэ}}$, о.е.	
0,3	3,231	2,566	53,197
0,25	3,031	2,563	55,349
0,2	2,809	2,560	58,266

ВЫВОДЫ

1. Вариант компактной трехфазной пространственной аксиальной ЭМС трансформатора с медными обмотками и секторными ОК отличается от электромагнитно – эквивалентного планарного аналога с прямоугольными ОК пониженными на 4-6 % и 5-8 % показателями массы и стоимости активной части.

2. Массостоимостные показатели трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с параллельными ОП улучшаются относительно электромагнитно эквивалентной планарной ЭМС при повышении класса напряжения обмоток.

3. Основной геометрической УП, определяющей массостоимостные показатели планарной и пространственной аксиальной ЭМС является отношение a_m диаметров расчетных окружностей магнитопровода.

4. Оптимальные значения $a_{\text{мэ}}$ УП a_m уменьшаются при возрастании класса напряжения ЭМС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 48-52.
2. Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Классификация структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 53-58.
3. Пуйло Г.В. Оптимальные соотношения размеров элементов активной части электромагнитных преобразователей // Електромашинобудування та електрообладнання. – 1998. – Вип. 51. – С. 25-29.
4. Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Плахтир О.О. Розрахунок трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.

5. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

6. Авдеева Е.А. Варианты технических решений электромагнитных систем трехфазных трансформаторов систем электрооборудования подводных аппаратов // Підводна техніка і технологія: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2011. – С. 59-63.

7. Чайковский В.П., Матухно В.А., Игнатенко С.А. Перспективы применения конструкций магнитных систем трансформаторов из витых элементов // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2007. – Вип. 68. – С. 48-51.

8. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств // Вісник КДУ. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4 / 2010 (63), ч.2. – С. 91-94.

Bibliography (transliterated): 1. Pujlo G.V., Kuz'menko I.S., Tongalyuk V.V. Sovremennye tendencii sovershenstvovaniya raspredelitel'nyh transformatorov // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2008. - № 2. - S. 48-52. 2. Stavinskij A.A., Stavinskij R.A. Klassifikaciya struktur i `elementov `elektromagnitnyh sistem `elektromehaniicheskikh i indukcionnyh staticheskikh preobrazovatelej // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2008. - № 2. - S. 53-58. 3. Pujlo G.V. Optimal'nye sootnosheniya razmerov `elementov aktivnoj chasti `elektromagnitnyh preobrazovatelej // Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya. - 1998. - Vip. 51. - S. 25-29. 4. Stavinskij A.A., Stavinskij R.A., Plahhir O.O. Rozrahunok trifaznih transformatoriv z prostorovim magnitoprovodom: Navchal'nij posibnik. - Mikolaiv: NUK, 2004. - 106 s. 5. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - 5-e izdanie. Pererab. i dop. - M.: `Energoatomizdat, 1986. - 528 s. 6. Avdeeva E.A. Varianty tehniicheskikh reshenij `elektromagnitnyh sistem trehfaznyh transformatorov sistem `elektroobudovaniya podvodnyh apparatov // Pidvodna tehnika i tehnologiya: Materiali Vseukraïns'koi nauk.-tehn. konf. z mizhnarodnoyu uchastyu. - Mikolaiv: NUK, 2011. - S. 59-63. 7. Chajkovskij V.P., Matuhno V.A., Ignatenko S.A. Perspektivy primeneniya konstrukcij magnitnyh sistem transformatorov iz vityh `elementov // Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya. - 2007. - Vip. 68. - S. 48-51. 8. Stavinskij R.A. Netradicijonnye tehniicheskie resheniya, postanovka zadachi i metod strukturoj optimizacij indukcionnyh staticheskikh ustrojstv // Visnik KDU. - Kremenchuk: KDU, 2010. - Vip. 4 / 2010 (63), ch.2. - S. 91-94.

Поступила 11.02.2012

Авдеева Елена Андреевна

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
51025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9
тел. (0512) 366636, e-mail: e.avdeeva@ukr.net

Avdeeva E.A.

Comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (mass and price indexes). Analytical dependences of optimum geometrical relationship determination with criteria of minimal weight and price of the active part are obtained. Comparative analysis of mass and price indexes of planar and spatial three-phase electromagnetic systems with rectangular and sector forming contours of the cores, yokes and winding coils is made.

Key words – planar and spatial electromagnetic systems, rectangular and sector forming contours, mass, price, minimum, core, coil, optimization.