

# Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем.

## Ч. 2. Примеры структур и результатов преобразований

СТАВИНСКИЙ А.А., СТАВИНСКИЙ Р.А., АВДЕЕВА Е.А.

*Одним из способов усовершенствования трансформаторов и реакторов различного назначения является преобразование структур их электромагнитных систем. Используемое в подводных и космических аппаратах электрооборудование размещается в цилиндрических и сферических оболочках ограниченных диаметров. Приведены примеры подводных аппаратов и вариантов нетрадиционных конструктивных схем активной части компактных трансформаторов. Взамен торoidalных компонент групповых трансформаторов, устанавливаемых в трубчатых оболочках, предлагаются однофазные трехстержневые трансформаторы с шихтованными и витыми магнитопроводами. Максимальное приближение контурного объема трехфазной электромагнитной системы к цилиндру и сфере достигается симметричным пространственным расположением и нетрадиционными конфигурациями ее элементов. Представлены нетрадиционные конструкции пространственных однофазных и трехфазных аксиальных и радиальных электромагнитных систем с витыми и шихтованными магнитопроводами. Трехфазный пространственный радиальный магнитопровод может быть выполнен шихтованным или витым соответственно с ромбическими и секторными обмоточными окнами. Ромбические обмоточные окна образуются формированием магнитопровода из двух параллелограммных конфигураций различной длины или из шевронной и двух параллелограммных конфигураций пластин электротехнической стали. На основе метода относительных показателей технического уровня и геометрических относительных управляемых переменных выполнен оптимизационный сравнительный анализ массосистемных показателей вариантов трехфазной пространственной радиальной электромагнитной системы, отличающихся прямоугольными и шестиугольными сечениями стержней витого трехсекционного магнитопровода. Такая конструкция позволяет снизить массу и стоимость активной части трансформатора или реактора до 7, 8,2% и 11, 13,6% соответственно относительно традиционной конструкции с прямоугольными внешним контуром и сечениями стержней магнитопровода.*

*Ключевые слова: трансформатор, реактор, электромагнитная система, контурный объем, оптимизация, массостоймостные показатели*

Сложными, однако необходимыми для дальнейшего развития и существования человечества задачами, которые необходимо решать, являются освоение солнечной системы и освоение морского шельфа. Для выполнения таких заданий необходимо комплексное усовершенствование космических и подводных аппаратов с соответствующими специализированными техническими системами [1–4]. К элементам объектов авиационно-космического, подводно-технического и другого специального назначения предъявляются требования минимальных массогабаритных показателей, максимальной надежности и энергетической эффективности, а также конструктивного соответствия блочным корпусам. Используемое в подводных и космических аппаратах оборудование располагается в объемах, ограниченных герметичными цилиндрическими и сферическими оболочками. Поэтому неотъемлемой составляющей комплексной задачи совершенствования объектов и систем указанного назначения

является максимальное приближение совокупного контурного объема комплектующего электрооборудования к корпусам в виде цилиндров и сфер. Указанное оборудование содержит металлоемкие и габаритные компоненты – встроенные и погружные трансформаторы, т.е. задачи повышения компактности и других показателей технического уровня подобных специальных трансформаторов являются важными и актуальными. Дальнейшее усовершенствование трансформаторов различного назначения возможно совместно с использованием современных достижений электроматериаловедения на основе преобразований и оптимизации структур электромагнитных систем (ЭМС) [5, 6–12].

Аппараты и комплексы подводно-технического назначения по типам размещения блоков комплектующих компонент и внешнего корпуса подразделяются на «рамные», обтекаемые и содержащие прочные цилиндрические и сферические оболочки [8]. Это обуславливает целесообразность разработ-

ки на основе «нетрадиционных» структур пространственных ЭМС компактных трансформаторов с внешними конфигурациями, максимально приближенными к цилиндрам и сферам [6–12].

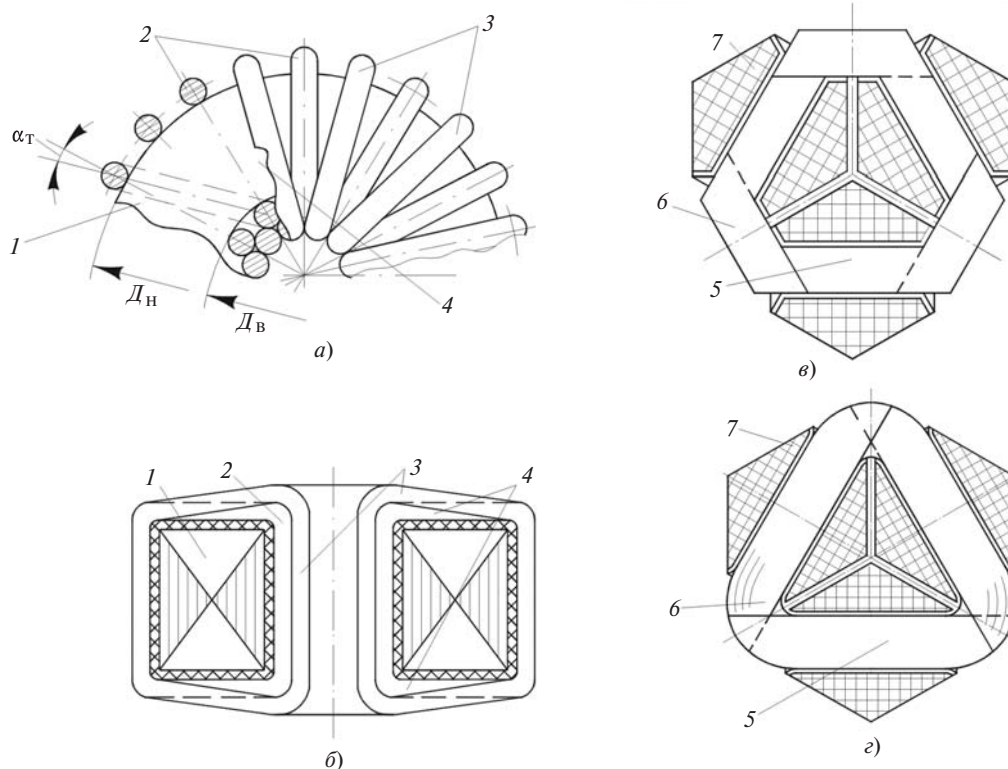
В статье дополняется обзор [12] и сравниваются показатели вариантов пространственной радиальной ЭМС с витым трехсекционным магнитопроводом и аналогичных показателей других ЭМС.

В подвесных рамных и некоторых самоходных аппаратах электрооборудование заключено в цилиндрические оболочки малого диаметра, в которых устанавливаются трехфазные групповые преобразователи с однофазными тороидальными трансформаторами [8]. Также согласно [8] в подводных аппаратах с внутрикорпусными и внешними сферическими оболочками установки комплектующего оборудования (рис. 1, б) используются трансформаторы с трехфазными ЭМС.

Однофазные тороидальные трансформаторы соответствуют одной из первоначальных конструкций ЭМС [13] с конфигурацией внешнего контура, ограниченной окружностью (рис. 1, а). Их особенностью является неплотная укладка витковых проводников над торцевыми поверхностями кольцевого магнитопровода (рис. 1, б). Наличие полостей между витками обмоток ЭМС (рис. 1) обусловлено различием значений диаметров  $D_H$  и  $D_B$  магнитопровода и учитывается при расчетах индукционных

статических устройств (ИСУ) увеличенными на 8–15% значениями коэффициента укладки обмотки [14]. Неплотность укладки и смещения на угол  $\alpha_T$  противоположных торцевых частей (рис. 1, а) повышают среднюю длину витка, потери и материалоемкость обмотки. Кроме того, ухудшение теплоотвода, вызванное участками полого пространства, и малый радиус изгиба на  $90^\circ$  угловых зон внутренних витков снижают надежность традиционных конструкций [14] тороидальных ИСУ. Отмеченные недостатки устраняются в однофазных ЭМС с шестигранным внешним контуром шихтованного «впереплет» (рис. 1, в) и вписанного в шестигранник витого стыкового (рис. 1, г) трехстержневых магнитопроводов [7]. Структуры трехсекционных (секция на стержне) первичных (вторичных) обмоток (рис. 1, в и г) аналогичны обмоткам традиционных планарных ЭМС [14], поэтому более технологичны и лишены отмеченных выше недостатков тороидальной намотки. Вариант ЭМС (рис. 1, г) может быть выполнен со снижающими материалоемкость и повышающими надежность шестигранными образующими контурами (ОК) стержней и витков обмоточных катушек [7, 10, 11].

Повышенным заполнением сферического объема отличается исходная конструкция трехфазной радиальной ЭМС [13]. В такой ЭМС стержни с обмоточными катушками расположены под углами



**Рис. 1.** Конструктивно-технологические особенности однофазных тороидальной (а, б) и трехстержневых электромагнитных систем с шихтованным (в) и витым (г) магнитопроводами: 1 – магнитопровод; 2 – витки первого (внутреннего) слоя; 3 – витки второго слоя; 4 – полое пространство; 5 – стержень; 6 – ярмо; 7 – катушка обмотки

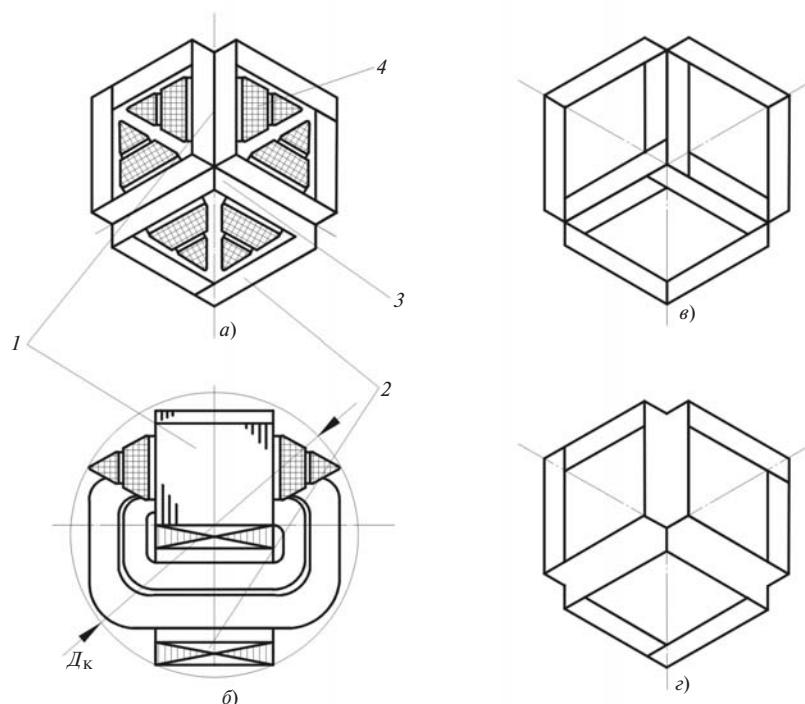
120°, соединены в центре и состыкованы с кольцевым внешним ярмом шихтованного магнитопровода. Подобное техническое решение практически не использовалось и не получило развития в связи со значительными отходами электротехнической стали (ЭТС) при изготовлении магнитопровода и последующей разработкой М.О. Доливо-Добровольским, после указанного радиального и пространственных аксиальных вариантов конструктивных схем, планарных ЭМС [13] с «безотходными» магнитопроводами [15].

В «традиционной» планарной ЭМС с прямоугольными сечениями стержней и ярм слои шихтованного магнитопровода с «прямыми» стыками образуются из прямоугольных пластин (листов) ЭТС трех размеров различной длины [14, 15]. Использование в планарной ЭМС анизотропной ЭТС с лучшими удельными характеристиками вдоль проката приводит к значительному повышению потерь в зонах углов и стыков магнитопровода. Поэтому для снижения таких потерь и тока холостого хода каждый слой магнитопровода формируется из пластин четырех конфигураций с чередующимися прямыми и «косыми» стыками [15]. Максимальное снижение потерь угловых зон достигается сборкой планарного магнитопровода со всеми косыми стыками из большого числа типоразмеров пластин с обрезкой при их укладке так называемых «усов» и отходами формирования угловых зон [15].

Практическое отсутствие отходов при разделении прямоугольной полосы (ленты) ЭТС на параллелограммные элементы и некоторое снижение потерь угловых зон обеспечивает радиальная ЭМС [7] с шестигранным ОК и ромбическими обмоточными окнами магнитопровода (рис. 2, *а* и *б*). Сохраняется удобство встраивания ЭМС [7] в сферический объем контурного диаметра  $D_k$ . В отличие от планарных ЭМС [15] косые стыки слоев шихтованного впереплет магнитопровода (рис. 2, *а* и *в*) с двухконтурными фазными элементами образуются всего двумя параллелограммными конфигурациями ЭТС различной длины. Вследствие индивидуальности контуров замыкания и при отсутствии уравнивающего перераспределения силовых линий поля в стержневых стыках в магнитопроводе ЭМС (рис. 2, *а*) возникают добавочные потери от третьих гармоник секционных магнитных потоков. Формирование магнитопровода из трех типоразмеров чередующихся пластин — двух параллелограммных (рис. 2, *в*) и третьей шевронной (рис. 2, *з*) совмещает фазные элементы и исключает такой вид потерь.

Согласно [5] потери электроэнергии в распределительных сетях составляют до 20% всей отпущенной с шин электростанций. Значительная часть этих потерь приходится на распределительные трансформаторы I–II габаритов класса напряжения 6–35 кВ.

Резервом энергоресурсосбережения при производстве и эксплуатации ИСУ различной мощности



**Рис. 2.** Конфигурации сечений пространственной радиальной электромагнитной системы (*а*, *б*) и элементарных слоев (*в*, *з*) трехфазного радиального шихтованного магнитопровода: 1 – стержень; 2 – внешнее ярмо; 3 – внутреннее ярмо; 4 – катушка обмотки

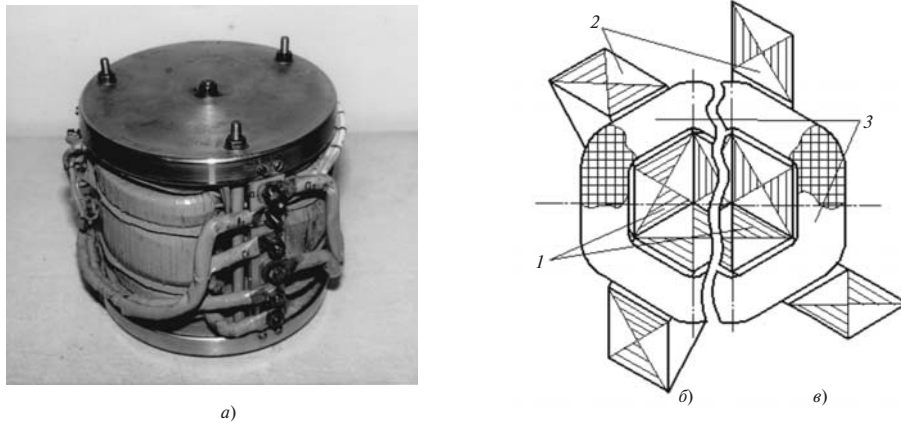


Рис. 3. Трехфазный трансформатор мощностью 6,3 кВА с комбинированным магнитопроводом (а) и варианты аксиальной пространственной электромагнитной системы с витым (б) и шихтованным (в) броневыми магнитопроводами: 1 – стержень; 2 – элемент ярма; 3 – катушка обмотки

можно считать замену традиционных прямоугольных и круговых ОК стержней и катушек обмоток на  $n_T$ -гранные ( $n_T^3 \cdot 6$ ) ОК [6–12, 17, 18]. Создаются предпосылки повышения электродинамической устойчивости обмоток устранением внутренних остаточных напряжений кругового изгиба проводников на основных прямых участках витков с многогранными ОК [6]. Дополнительно представляется возможность развития преобразовательных и других специальных трансформаторов [16].

На основе шестигранных ОК стержней и катушек обмоток достигается усовершенствование трехфазных аксиальных ЭМС ИСУ с витыми и комбинированными магнитопроводами. Примером компактного ИСУ с витыми ярами и шихтованными стержнями является трансформатор (рис. 3,а) системы электрооборудования подводного аппарата МТК-200 [8]. Могут быть также усовершенствованы однофазные ЭМС с витыми броневыми стыковыми магнитопроводами (рис. 3,б) и однофазные и трехфазные ЭМС с шихтованными броневыми магнитопроводами (рис. 3,в) [6, 7]. Трехфазная планарная ЭМС с пятью и семью пакетами (ступенями) ЭТС элементов магнитопровода, вписанных совокупным сечением в равносторонние восьмигранники, характеризуется контурными коэффициентами заполнения указанных восьмигранников  $K_K = 0,90$  и  $0,93$  [17]. Аналогичные заполнения круговых ОК поперечными сечениями стержней и ярм достигается использованием 14–18 и 28–32 пакетов и размеров листов ЭТС соответственно [15]. Сравнительный анализ электромагнитно-эквивалентных планарных ЭМС с круговыми и восьмигранными ОК стержней и катушек медных обмоток с  $K_K = 0,9, 0,93$  показал возможность 11,9% и 8,6% снижения массы и стоимости, а также 6,5, 3,5% снижения потерь активной мощности трехфазных трансформаторов [17, 18].

Аналогом ЭМС с двухконтурными фазными элементами (рис. 2,а и б) является радиальная ЭМС (рис. 4,а) с витым трехсекционным магнитопроводом и секторными обмоточными окнами [7]. Использование вместо прямоугольной (рис. 4,б) трапецевидной (рис. 4,в) формы сечений секций несколько снижает механическую деформацию угловых зон и материалоемкость ЭМС образованием шестигранной конфигурации ОК витков и катушек обмоток.

Анализ массостоймых показателей ЭМС (рис. 4,а) с вариантами магнитопровода (рис. 4,б и в) выполняется в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности. Используется метод и целевые функции оптимизации ИСУ  $F_{\Pi i}$  с относительными показателями технического уровня ( $i = 1, \dots, 4$ ) сравниваемых вариантов [12]:

$$F_{\Pi i} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}})^3 K_{\Pi i} \Pi_{\Pi i}^*, \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{и}}$  – показатель исходных данных (технического задания на проектирование и электромагнитных нагрузок) трансформатора или реактора;  $K_{\Pi i}$  – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов.

Показатель  $\Pi_{\Pi i}^*$  ЭМС (рис. 4,а) является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом  $K_{3,0}$  (класса напряжения) и зависящих от расчетных диаметров  $D_{\text{нп(ш)}}$  и  $D_{\text{вп(ш)}}$ , а также высоты  $h_{\text{оп(ш)}}$  и ширины  $b_{\text{оп(ш)}}$  обмоточного окна (рис. 4,б и в) относительных геометрических управляемых переменных:

$$\Pi_{\Pi i}^* = f(K_{3,0}, a_M, l_0); \quad (2)$$

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

$$l_0 = h_{\text{оп(ш)}} / b_{\text{оп(ш)}}. \quad (4)$$

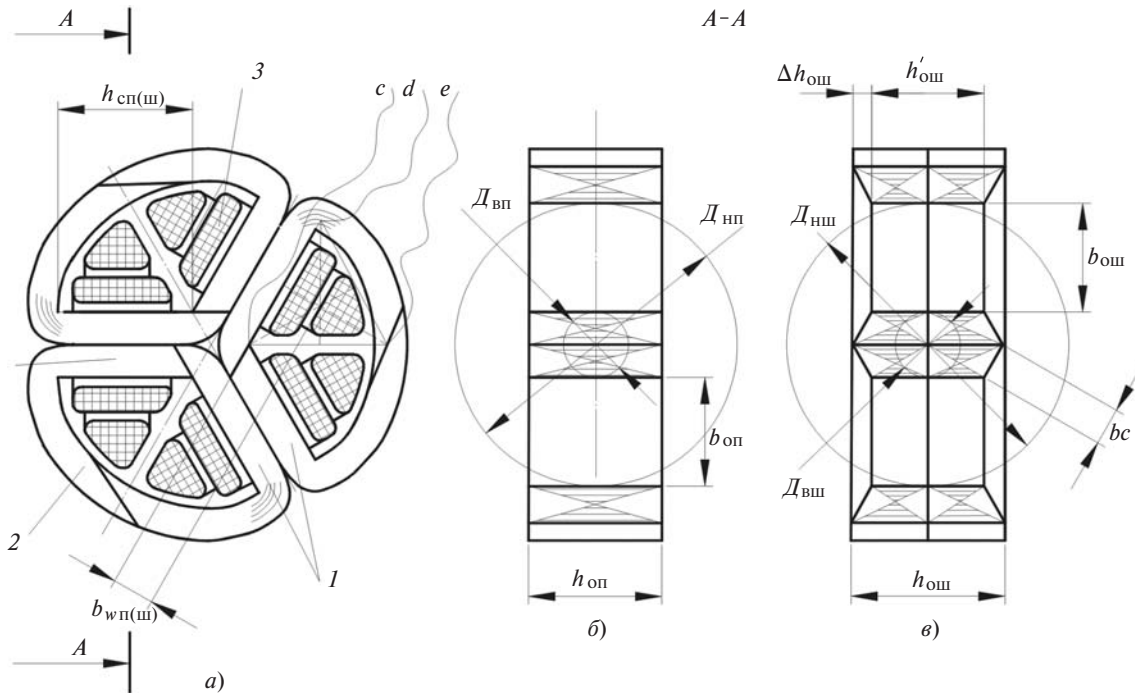


Рис. 4. Поперечная структура (а) пространственной радиальной электромагнитной системы с прямоугольными (б) и шестигранными (в) сечениями стержней витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

При сравнительном анализе ЭМС на основе (1)–(4) используются известные допущения [9–12, 17, 18]. Принимается, что радиус изгиба внутренних витков угловых зон фазных катушек равен значению изоляционного промежутка между катушкой и стержнем. Пренебрегается радиусами изгиба угловых зон витков внутренних контуров секций магнитопровода, которые несколько превышают или равны толщине ленты (рулона) ЭТС [14]. Принимаются идентичными плотности токов обмоток высокого и низкого напряжений. В соответствии с [12] система фазных катушек обмоток трансформатора заменяется эквивалентной расчетной обмоткой структурно-эквивалентного реактора со средней длиной витка  $l_{вп(ш)}$ . Стороны такого витка отстоят от стержней на расстоянии  $b_{вп(ш)}$  и расположены в геометрическом центре сектора половины обмоточного окна. Этот центр совпадает с центром равностороннего треугольника  $cde$ . Площадь треугольника  $cde$  соответствует площади сектора половины обмоточного окна.

Функции (1) и (2) определяются с использованием уравнений связей площади обмоточного окна  $S_{оп(ш)}$  с площадью ЭТС поперечного сечения стержня и массы обмотки  $m_{оп(ш)}$  ЭМС (рис. 4,а) с прямоугольным (шестигранным) сечением стержня [9–12, 17, 18]:

$$S_{оп(ш)} = \Pi_{и} / K_{3.0} S_{сп(ш)}; \quad (5)$$

$$m_{оп(ш)} = 1,5g_o K_{3.0} S_{оп(ш)} l_{вп(ш)}, \quad (6)$$

где  $g_o$  – плотность проводящего материала обмоточного провода.

Ширина  $b_{оп(ш)}$ , высота стержня  $h_{сп(ш)}$  и площадь  $S_{оп(ш)}$  вариантов магнитопровода ЭМС (рис. 4,а), а также площадь прямоугольного сечения стержня  $S_{сп}$  магнитопровода (рис. 4,б) связаны с диаметрами  $D_{н}$  и  $D_{в}$  и управляемыми переменными выражениями:

$$b_{оп(ш)} = (D_{нп(ш)} - D_{вп(ш)})/2 = D_{вп(ш)}(a_M - 1)/2; \quad (7)$$

$$h_{сп(ш)} = 2b_{оп(ш)} \operatorname{tg} 30^\circ = D_{вп(ш)}(a_M - 1)/\sqrt{3}; \quad (8)$$

$$S_{оп(ш)} = \rho h_{сп(ш)}^2 / 3 = \rho D_{вп(ш)}^2 (a_M - 1)^2 / 9; \quad (9)$$

$$S_{сп} = K_{3.c} D_{вп} h_{оп} = K_{3.c} l_o D_{вп}^2 (a_M - 1) / 2. \quad (10)$$

Исходя из равенства (5) и (9) и с подстановкой (10), можно получить зависимость  $D_{вп}$  от  $\Pi_{и}$ ,  $a_M$  и  $l_o$ :

$$\rho D_{вп}^2 (a_M - 1)^2 / 9 = 2 \Pi_{и} / [K_{3.c} K_{3.0} l_o D_{вп}^2 (a_M - 1)];$$

$$D_{вп} = \sqrt[4]{\Pi_{и} \sqrt[4]{5,73 / [K_{3.c} K_{3.0} l_o (a_M - 1)^3]}}. \quad (11)$$

Масса магнитопровода (рис. 4,б) определяется с учетом (3), (4) и (8):

$$m_{мп} = K_{3.c} g_c [3h_{сп} D_{вп} + 2\rho(h_{сп} + D_{вп}/4)D_{вп} / 2 +$$

$$+ 2\rho(D_{\text{вп}}/2)^2]h_{\text{оп}} = 1,773K_{3,с}g_c l_o D_{\text{вп}}^3 (a_M - 1) \cdot (a_M - 0,3357), \quad (12)$$

где  $K_{3,с}$  – коэффициент заполнения магнитопровода ЭТС [14, 15];  $g_c$  – плотность ЭТС магнитопровода.

Площадь  $S_{cde}$  и сторона  $h_{\text{сп(ш)}}$  равностороннего треугольника  $cde$  (рис. 4,а) определяются с учетом (9):

$$S_{cde} = (h_{\text{сп(ш)}})^2 \sin 30^\circ = \sqrt{3}(h_{\text{сп(ш)}})^2 / 4; \\ h_{\text{сп(ш)}} = \sqrt{4S_{cde} / \sqrt{3}} = \sqrt{2S_{\text{оп(ш)}} / \sqrt{3}} = 0,635D_{\text{вп(ш)}}(a_M - 1). \quad (13)$$

Расстояние положения среднего витка эквивалентной обмотки от стержня

$$b_{\text{вп(ш)}} = h_{\text{сп(ш)}}(\text{tg}30^\circ)/2 = 0,1833D_{\text{вп(ш)}}(a_M - 1). \quad (14)$$

Длина среднего витка эквивалентной обмотки ЭМС (рис. 4,а) с магнитопроводом (рис. 4,б)

$$l_{\text{вп}} = 2(D_{\text{вп}} + h_{\text{оп}} + \rho b_{\text{вп}}) = D_{\text{вп}}[2 + (a_M - 1)(l_o + 1,1515)]. \quad (15)$$

Масса обмотки ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и б) определяется на основе (6), (9) и (15):

$$m_{\text{оп}} = 0,5236K_{3,о}g_o D_{\text{вп}}^3 (a_M - 1)^2 [2 + (a_M - 1)(l_o + 1,1515)], \quad (16)$$

где  $g_o$  – плотность обмоточного окна.

Масса  $m_{\text{ап}}$  и стоимость  $C_{\text{ап}}$  ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и б) определяются с использованием удельных стоимостей  $C_c$  и  $C_o$  ЭТС и обмоточного провода соответственно подстановкой (11) в (12) и (16):

$$m_{\text{ап}} = m_{\text{мп}} + m_{\text{оп}} = g_c (4\sqrt{\Pi_{\text{и}}})^3 \Pi_{\text{мп}}^*; \\ C_{\text{ап}} = C_{\text{мп}} + C_{\text{оп}} = g_c C_c (4\sqrt{\Pi_{\text{и}}})^3 \Pi_{\text{сп}}^*,$$

где  $C_{\text{мп}}$  и  $C_{\text{оп}}$  – стоимость ЭТС магнитопровода и проводников системы обмоточных катушек ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а,б);  $\Pi_{\text{мп}}^*$  и  $\Pi_{\text{сп}}^*$  – соответствующие (2) относительные показатели массы и стоимости:

$$\Pi_{\text{мп}}^* = 6,56 \frac{\rho}{g} \sqrt{1/[K_{3,с} K_{3,о} l_o (a_M - 1)^3]} \frac{\rho^3}{g} (a_M - 1) \cdot \{K_{3,о} l_o (a_M - 0,3357) + 0,2953K_{3,о} (a_M - 1)\} \cdot [2 + (a_M - 1)(l_o + 1,1515)]g_o / g_c \}; \quad (17)$$

$$\Pi_{\text{сп}}^* = 6,56 \frac{\rho}{g} \sqrt{1/[K_{3,с} K_{3,о} l_o (a_M - 1)^3]} \frac{\rho^3}{g} (a_M - 1) \cdot \{K_{3,о} l_o (a_M - 0,3357) + 0,2953K_{3,о} (a_M - 1)\} \cdot [2 + (a_M - 1)(l_o + 1,1515)]g_o C_o / (g_c C_c)}. \quad (18)$$

Составляющая  $Dh_{\text{ош}}$  и внутренняя высота  $h_{\text{ош}}$  обмоточного окна, а также площадь сечения стержня магнитопровода (рис. 4,б) определяются с учетом (4) и (7) выражениями:

$$Dh_{\text{ош}} = D_{\text{вш}}(\text{tg}30^\circ)/2 = D_{\text{вш}}/2\sqrt{3}; \\ h_{\text{ош}} = h_{\text{ош}} - 2Dh_{\text{ош}} = D_{\text{в}}[l_o (a_M - 1) - 2\sqrt{3}]/2; \quad (19)$$

$$S_{\text{сш}} = K_{3,с}(h_{\text{ош}} - Dh_{\text{ош}})D_{\text{вш}} = K_{3,с}D_{\text{вш}}^2 [(a_M - 1)l_o - 0,5774]/2. \quad (20)$$

На основе равенства (5) и (9) при подстановке (19) определяется зависимость  $D_{\text{вш}}$  от  $\Pi_{\text{и}}$ ,  $a_M$  и  $l_o$ :

$$\rho D_{\text{вш}}^2 (a_M - 1)^2 / 9 = 2\Pi_{\text{и}} / [K_{3,с} K_{3,о} D_{\text{вш}}^2] \cdot [(a_M - 1)l_o - 0,5774];$$

$$D_{\text{вш}} = \sqrt[4]{\Pi_{\text{и}} \sqrt[4]{5,73/[K_{3,с} K_{3,о} (a_M - 1)^2 [(a_M - 1)l_o - 0,5774]}}}. \quad (21)$$

Длина среднего витка ленты (рулона) ЭТС секции магнитопровода (рис. 4,в) определяется с использованием (8):

$$l_{\text{сш}} = 2h_{\text{сш}} + [2\rho(h_{\text{сш}} + D_{\text{вш}}/4)/3] + (\rho D_{\text{вш}}/4) + \rho D_{\text{вш}}/12 = 2,364D_{\text{вш}}(a_M - 0,3355). \quad (22)$$

Число витков в секции магнитопровода (рис. 4,в)

$$n_{\text{вш}} = D_{\text{вш}} / (2d_{\text{эТС}}), \quad (23)$$

где  $d_{\text{эТС}}$  – толщина ленты (рулона) ЭТС.

Масса магнитопровода (рис. 4,в) определяется на основе (3), (4), (7), (19) и (22), (23):

$$m_{\text{мш}} = 3g_c K_{3,с} n_{\text{вш}} d_{\text{эТС}} l_{\text{сш}} (h_{\text{ош}} + h_{\text{ош}}) / 2 = 1,773g_c K_{3,с} (a_M - 0,3355) [l_o (a_M - 1) - 0,5774] D_{\text{в}}^3. \quad (24)$$

Длина среднего витка эквивалентной обмотки ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и в) определяется при подстановке (14) и (19):

$$l_{wш} = 2\rho b_{wш} + 2hg_{ш} + 4b_{сш} = \Delta_B [(a_M - 1)(l_o + 1,1515) + 1,1547], \quad (25)$$

где сторона шестигранника  $b_{сш}$  выражается соотношением

$$b_{сш} = \Delta_B / (2 \sin 60^\circ) = \Delta_B / \sqrt{3}.$$

Масса обмотки ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и в) определяется на основе (6), (9) и (25):

$$m_{ош} = 0,5236 K_{3,о} g_o \Delta_B^3 (a_M - 1)^2 [(a_M - 1) \cdot (l_o + 1,1515) + 1,1547]. \quad (26)$$

Масса  $m_{аш}$  и стоимость  $C_{аш}$  ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и в) определяются суммой (24) и (26) при использовании (21):

$$m_{аш} = m_{мш} + m_{ош} = g_c (\sqrt[4]{P_{и}})^3 P_{мш}^*;$$

$$C_{аш} = C_{мш} + C_{ош} = g_o C_o (\sqrt[4]{P_{и}})^3 P_{сш}^*,$$

где  $C_{мш}$  и  $C_{ош}$  – стоимость ЭТС магнитопровода и проводников системы обмоточных катушек ЭМС с магнитопроводом (рис. 4,а и б);  $P_{мш}^*$  и  $P_{сш}^*$  – соответствующие (2) относительные показатели массы и стоимости:

$$P_{мш}^* = 6,565 (\sqrt[4]{1 / \{K_{3,с} K_{3,о} (a_M - 1)^2 [(a_M - 1) l_o - 0,577]\}})^3 \cdot \{K_{3,с} (a_M - 0,3355) [l_o (a_M - 1) - 0,577] + 0,2953 K_{3,о} (a_M - 1)^2 \cdot [(a_M - 1)(l_o + 1,1515) + 1,1547] g_o / g_c\}; \quad (27)$$

$$P_{сш}^* = 6,565 (\sqrt[4]{1 / \{K_{3,с} K_{3,о} (a_M - 1)^2 [(a_M - 1) l_o - 0,577]\}})^3 \cdot \{K_{3,с} (a_M - 0,3355) [l_o (a_M - 1) - 0,577] + 0,2953 K_{3,о} (a_M - 1)^2 \cdot [(a_M - 1)(l_o + 1,1515) + 1,1547] g_o C_o / (g_c C_c)\}. \quad (28)$$

Результаты определения экстремальных значений (минимумов)  $P_{мп(ш)э}^*$  и  $P_{сп(ш)э}^*$  функциональных зависимостей (17), (18) и (27), (28) рассчитанных для трех значений  $K_{3,о}$  при  $K_{3,с} = 0,97$  и  $g_o / g_c = 8,9/7,65$ , а также  $C_o / C_c = 3,5, 5,5$  приведены в табл. 1 и 2. Там же приведены для сравнения полученные при аналогичных допущениях и удельных характеристиках материалов минимальные значения показателей массы и стоимости  $P_{м1э}^*$  и  $P_{с1э}^*$  [9] планарной ЭМС с прямоугольным внешним контуром и сечениями стержней магнитопровода и аналогичные показатели  $P_{м(с)2э}^*$ ,  $P_{м(с)3э}^*$  и  $P_{м(с)4э}^*$  пространственных аксиальных аналогов. Показатели  $P_{м2э}^*$  и  $P_{с2э}^*$  [9], а также  $P_{м3э}^*$  и  $P_{с3э}^*$  [10] соответствуют ЭМС с секторными и шестиугольными сечениями стержней соответственно витого и комбинированного стыковых магнитопроводов. Показатели  $P_{м4э}^*$  и  $P_{с4э}^*$  [11] соответствуют ЭМС с двухконтурными фазными элементами и шестиугольным сечением стержней витого стыкового магнитопровода.

Данные табл. 1 и 2 характеризуют возможности повышения технического уровня трехфазных ИСУ с медными обмотками на основе вариантов структур пространственных ЭМС. Указанные пространственные структуры отличаются между собой показателями массы и стоимости на 2,7, 3,6% и 5,8% соответственно. Из анализа табл. 1 и 2 также следует, что максимальное соответствие критерию минимума массы возможно достигнуть использованием аксиальной или радиальной ЭМС с шестиугольными сечениями стержней трехсекционного витого стыкового магнитопровода. Минимальную стоимость обеспечивает ЭМС по рис. 4,а с магнитопроводом по рис. 4,в. Преимуществом радиальной ЭМС (рис. 4,а) относительно аксиальных аналогов представляются более простые и технологичные конструкции витого магнитопровода (рис. 4,б и в). Однако симметричные аксиальные пространственные ЭМС отличаются от планарных и радиальных

Таблица 1

Коэффициент заполнения обмоточного окна, отн.ед.	Показатель массы, отн. ед.					
	$P_{м1э}^*$	$P_{м2э}^*$ (рис. 1)	$P_{м3э}^*$ (рис. 2,а)	$P_{м4э}^*$ (рис. 2,б)	$P_{мпэ}^*$ (рис. 3,б)	$P_{мшэ}^*$ (рис. 3,в)
0,30	27,764	26,451	26,469	25,555	25,774	25,477
0,25	29,318	27,977	27,992	27,006	27,336	27,07
0,20	31,423	30,045	30,056	28,972	29,523	29,228

Таблица 2

Соотношение стоимости обмоточной меди и электротехнической стали	Коэффициент заполнения обмоточного окна, отн. ед.	Показатель стоимости, отн. ед.					
		$P_{c1э}^*$	$P_{c2э}^*$	$P_{c3э}^*$	$P_{c4э}^*$	$P_{спэ}^*$	$P_{сшэ}^*$
3,5	0,30	51,652	48,667	48,706	47,256	46,079	45,309
	0,25	53,778	50,749	50,792	49,247	48,275	47,489
	0,20	56,658	53,571	53,619	51,942	51,208	50,442
4,0	0,30	55,503	52,236	52,275	50,745	49,303	48,45
	0,25	57,701	54,389	54,433	52,804	51,555	50,705
	0,20	60,678	57,306	57,356	55,591	54,606	53,758
4,5	0,30	59,19	55,651	55,69	54,084	52,382	51,449
	0,25	61,454	57,868	57,913	56,204	54,702	53,771
	0,20	64,52	60,872	60,923	59,079	57,844	56,916
5,0	0,30	62,739	58,937	58,976	60,401	55,339	54,329
	0,25	65,064	61,213	61,259	62,632	57,721	56,713
	0,20	68,212	64,297	64,349	65,653	60,947	59,942
5,5	0,30	66,171	62,113	62,151	60,413	58,193	57,106
	0,25	68,551	64,443	64,488	62,664	60,532	59,547
	0,20	71,776	67,601	67,654	65,665	63,936	62,855

ЭМС симметрией топологии «векторного магнитного момента». Поэтому их варианты [6, 7, 9–12] обеспечивают возможность создания без дополнительных устройств магнитной компенсации условий минимума внешнего магнитного поля (электромагнитной совместимости) ИСУ [16].

**Вывод.** Однофазные и трехфазные пространственные симметричные ЭМС с магнитопроводами, ограниченными секторными и шестигранными конфигурациями элементов внешних контуров, а также стержней и катушек обмоток, повышают компактность ИСУ и объектов с комплексами встраиваемого электрооборудования. Оптимизационные расчеты показывают, что при использовании вариантов пространственных трехфазных радиальных ЭМС с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней витых стыковых магнитопроводов можно достигнуть до 7, 8,2% и 11, 13,6% снижения массы и стоимости активной части ИСУ с медными обмотками соответственно относительно планарного аналога с прямоугольными внешним контуром и сечениями стержней магнитопровода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шереметьевский Н.Н.** Электромеханика и мирный космос. – Электротехника, 1987, № 6, с. 10–16.
2. **Агеев М.Д.** Автономные подводные роботы. Системы и технологии. – М.: Наука, 2005, 398 с.
3. **Moore S., Bohm H., Jensen V.** Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication. – Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010, 770 p.
4. **Глубоководные** водолазные комплексы для флота России [www.tetis-pro.ru](http://www.tetis-pro.ru)
5. **Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В.** Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов. – Электротехника і електромеханіка, 2008, № 2, с. 48–52.
6. **Ставинский А.А.** Генезис структур и предпосылки совершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами). – Электротехника і електромеханіка, 2011, № 5, с. 43–47.
7. **Ставинский А.А.** Генезис структур и предпосылки совершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами). – Электротехніка і електромеханіка, 2011, № 6, с. 33–38.
8. **Блинцов В.С., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А., Садовой А.С.** Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их совершенствования. – Электротехніка і електромеханіка, 2012, № 2, с. 16–21.



9. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массоистощенные показатели). — *Электротехника і електромеханіка*, 2012, № 4, с. 15–20.

10. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Сравнение массоистощенных показателей трехфазных планарной и пространственной аксиальной статических электромагнитных систем с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней // *Электротехнические и компьютерные системы*, 2013, № 12(88), с. 35–43.

11. Авдеева Е.А., Ставинский Р.А. Массоистощенные показатели пространственных аксиальных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых магнитопроводов. — *Электротехника і електромеханіка*, 2014, № 1, с. 15 – 20.

12. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Часть 1. Варианты и метод оценки преобразований. — *Электричество*, 2014, № 9, с.

13. Веселовский О.Н., Копылов И.П. У истоков электротехники. Столетие трансформатора. — *Электротехника*, 1984, № 11, с. 62–63.

14. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1971, 720 с.

15. Майорец А.И., Пшеничный Г.И., Чечелюк Я.З. и др. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование). — М.: Энергия, 1973 – 272 с.

16. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части. — *Электротехника і електромеханіка*, 2005, № 4, с. 30–36.

17. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Цыганов А.Н. Сравнительный анализ массоистощенных показателей планарных

трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней. — *Электротехнические и компьютерные системы*, 2012, № 5(81), с. 106–112.

18. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Цыганов А.Н. Сравнительный анализ потерь трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней планарных магнитопроводов. — *Электротехнические и компьютерные системы*, 2012, № 7(83), с. 47–52.

[07.05.14]

*А в т о р ы : Ставинский Андрей Андреевич окончил в 1975 г. электромеханический факультет Одесского политехнического института. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по специальным и энергоресурсосберегающим асинхронным двигателям. Заведующий кафедрой «Судовые электроэнергетические системы» Национального университета кораблестроения (НУК) им. Адмирала Макарова (г. Николаев, Украина).*

*Ставинский Ростислав Андреевич окончил в 2000 г. электротехнический факультет НУК. В 2004 г. В Одесском национальном политехническом университете защитил кандидатскую диссертацию «Пространственные трансформаторы с эффективным использованием конструктивного объема». Заведующий кафедрой энергетики Николаевского национального аграрного университета.*

*Авдеева Елена Андреевна окончила в 2006 г. Институт автоматики и электротехники НУК. Аспирант института автоматики и электротехники НУК.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 10, pp. 28–37.*

## Optimization Comparative Analysis of Structure of Static Electromagnetic Systems. Part. 2. Examples of Structures and Transformation Results

A.A. STAVINSKII, R.A. STAVINSKII, E.A. AVDEYEVA

*On of the ways to improve transformers and reactors of various purpose is to transform the structures of electromagnetic systems. Electrical equipment used in underwater and spacecraft locate in cylindrical and spherical shells of limited diameter. The examples of underwater vehicles and unconventional variants of constructive schemes of the active part of compact transformers are given. Instead toroidal component group of transformers installed in the tubular membranes, three-rod single-phase transformers with laminated and twisted magnetic cores are offered. Maximal approximation of contour volume of three-phase electromagnetic system to the cylinder and sphere is achieved with symmetric spatial arrangement and unconventional configurations of its elements. Unconventional designs of spatial single-phase and three-phase axial and radial electromagnetic systems with twisted and laminated magnetic cores are presented. Three-phase spatial radial magnetic core can be made laminated or twisted respectively with rhombic and sectorial coil windows. Rhombic coil windows formed by forming of magnetic core from two parallelogram configurations with different length, or from chevron and two parallelogram configurations of electrical steel plates. On the basis of technical level relative indicators method and geometrical relative controlled variables the optimization comparative analysis of mass and value indicators of three-phase spatial radial electromagnetic system variants, which are different in rectangular and hexagonal rods sections of twisted three-section magnetic core is made. This design reduces to 7, 8,2% and 11, 13,6%, respectively, weight and cost of the active part of transformer or reactor with respect to traditional design with rectangular outer contour and rods sections of the magnetic core.*

*Key words: transformer, reactor, electromagnetic system, the contour volume, optimization, mass and value indicators*

## REFERENCES

1. Sheremet'yevskii N.N. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 1987, No. 6, pp. 10–16.
2. Ageyev M.D. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii (Autonomous underwater robots. Systems and Technologies)*. Moscow. Publ. «Nauka», 2005, 398 p.
3. Moore S., Bohm H., Jensen V. *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication.* – Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010, 770 p.
4. **Glubokovodnye vodolaznye komplekсы dlya flota Rossii:** www.tetis-pro.ru
5. Pulo G.V., Kuz'menko I.S., Tonhalyuk V.V. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2008, No. 2, pp. 48–52.
6. Stavinskii A.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2011, No. 5, pp. 43–47.
7. Stavinskii A.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2011, No. 6, pp. 33–38.
8. Blintsov V.S., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A., Sadovoi A.S. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2012, No. 2, pp. 16–21.
9. Avdeyeva Ye.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2012, No. 4, pp. 15–20.
10. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A. *Elektrotekhnicheskiye i kompyuternye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2013, No. 12(88), pp. 35–43.
11. Avdeyeva Ye.A., Stavinskii R.A. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2014, No. 1, pp. 15–20.
12. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No. 9, pp.
13. Veselovskii O.N., Kopylov I.P. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 1984, No. 11, pp. 62–63.
14. Bal'yan R.Kh. *Transformatory dlya radioelektroniki (Transformers for radioelectronics)*. Moscow. Publ. «Sovetskoe radio», 1971, 720 p.
15. Maiorets A.I., Pshenichnyi G.I., Checchelyk Ya.Z. *Magnitoprovody silovykh transformatorov (Tekhnologiya i oborudovaniye) (Magnetic circuits of the power transformers. Technology and equipment)*. Moscow. Publ. «Energiya», 1973, 272 p.
16. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Plakhtyr' O.O. *Elektrotehnika i elektromekhanika (Power Engineering and Electromechanics)*, 2005, No. 4, pp. 30–36.
17. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Tsyganov A.N. *Elektrotekhnicheskiye i kompyuternye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2012, No. 5(81), pp. 106–112.
18. Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Tsyganov A.N. *Elektrotekhnicheskiye i kompyuternye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2012, No. 7(83), pp. 47–52.

*Authors: Stavinskii Andrei Andreyevich graduated from the Odessa National Polytechnic University in 1975. In 1993 he received the degree of Doctor Techn. Sci. from the Moscow Power Engineering Institute. He is a Head of Department «Ship electric power systems of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding (NUS) (Nikolaev, Ukraine).*

*Stavinskii Rostislav Andreevich graduated from electrical engineering department of the NUS. In 2004 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from the Odessa National Polytechnic University. He is Head of the Energy Department of the NUS.*

*Avdeyeva Elena Andreyevna graduated from the NUS. In 2006 she is a Ph. D. Student of the NUS.*

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru

etr1890@mail.ru

