

УДК 621.314

Е. А. Авдеева

МОДЕЛЬ МАССЫ И СТОИМОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С РОМБИЧЕСКИМИ ОБМОТОЧНЫМИ ОКНАМИ И ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СЕЧЕНИЕМ ДВУХКОНТУРНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ ЧАСТЕЙ ШИХТОВАННОГО МАГНИТОПРОВОДА

Аннотация. На основе метода относительных коэффициентов основных показателей технического уровня определены оптимальные геометрические соотношения по критериям минимумов массы и стоимости трехфазной пространственной радиальной электромагнитной системы трансформатора с ромбическими обмоточными окнами и прямоугольным сечением стержневых частей двухконтурных фазных элементов шихтованного магнитопровода.

Ключевые слова: трансформатор, компактная радиальная электромагнитная система, шихтованный магнитопровод, показатели массы и стоимости

Е. А. Avdieieva

THE MODEL MASS – VALUE OF THREE-PHASE RADIAL ELECTROMAGNETIC SYSTEM WITH RHOMBIC COIL WINDINGS AND RECTANGULAR CROSS-SECTION OF DUAL ROD PARTS OF LAMINATED MAGNETIC CORE

Abstract. The optimal geometrical ratios of three-phase spatial radial electromagnetic system of transformer with rhombic coil windings and rectangular cross-section of rod parts of dual phase elements of laminated magnetic core using the method of relative rates of basic technical level indicators (with minimum mass and cost criteria) are determined.

Keywords: transformer, compact radial electromagnetic system, laminated magnetic core, mass – value indicators

О. А. Авдєєва

МОДЕЛЬ МАСИ І ВАРТОСТІ ТРИФАЗНОЇ РАДІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ З РОМБІЧНИМИ ОБМОТКОВИМИ ВІКНАМИ ТА ПРЯМОКУТНИМ ПЕРЕРІЗОМ ДВОКОНТУРНИХ СТРИЖНЕВИХ ЧАСТИН ШИХТОВАНОГО МАГНІТОПРОВОДА

Анотація. На основі методу відносних коефіцієнтів основних показників технічного рівня визначено оптимальні геометричні співвідношення за критеріями мінімумів маси та вартості трифазної просторової радіальної електромагнітної системи трансформатора з ромбічними обмотковими вікнами і прямокутним перерізом стрижневих частин двоконтурних фазних елементів шихтованого магнітопровода.

Ключові слова: трансформатор, компактна радіальна електромагнітна система, шихтований магнітопровід, показники маси і вартості

Введение. Технические объекты и системы, предназначенные для выполнения подводных работ, для исследования морских глубин и космического пространства, содержат электроэнергетические комплексы с металлоемкими электромеханическими компонентами, в частности трансформаторами. К трехфазным трансформаторам (ТТ) встраиваемого и погружного исполнений, которые устанавливаются в прочные сферические оболочки ограниченного диаметра, предъявляются требования максимального приближения конфигурации электромагнитной системы (ЭМС) к сфере, минимальных массогабаритных показателей и максимальной энергетической эффективности. В связи с интенсификацией работ по освоению морского шельфа, а также необходимостью развития

глубоководных и космических исследований, разработки в направлении повышения технического уровня и создания специальных компактных встраиваемых и погружных ТТ являются важными и актуальными [2].

Анализ предыдущих исследований
Решение задачи разработки ТТ для встраивания в сферические оболочки ограниченного диаметра возможно на основе вариантов симметричных пространственных ЭМС и их структурного преобразования на основе нетрадиционных, в частности секторных и шестигранных образующих контуров активных элементов [1 – 4]. Одним из вариантов повышения компактности и обеспечения конструктивного соответствия активной части ТТ сферическому объему, является использование пространственной симметричной радиальной ЭМС с нетрадиционными

© Авдеева Е.А., 2012

конструкторско – технологическими решениями магнитопровода [2].

Цель работы. Определение целевых функций, а также оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости, позволяющих сравнить компактную радиальную ЭМС с существующими конструкторско–технологическими решениями активной части ТТ.

Материал и результаты исследования

Структурно–геометрическими особенностями рассматриваемой ЭМС являются внешний шестигранный контур поперечного сечения (рис. 1, а), ромбические обмоточные окна и двухконтурные фазные элементы с обмоточными катушками прямоугольной формы (рис. 1, б). ЭМС (рис. 1, а и б) характеризуется высоким заполнением контурного объема сферы диаметром D_k . Магнитопровод образуется поперечной разделкой лент (рулонов) электротехнической стали на шевронные (рис. 1, в) и параллелограммные (рис. 1, г) пластины (листы) постоянной ширины, соответственно $l_{ш}$ и $l_{п}$, и их сборкой «впереплет» по схеме (рис. 1, д и е) [1].

Для возможности объективного сравнения конструкции (рис. 1, а, б) с другими техническими решениями активной части ТТ [4,5], отличающимися структурой и технологией изготовления магнитопроводов, в настоящей работе используется метод построения математических моделей ЭМС на основе целевой функции с относительными коэффициентами показателей технического уровня и относительными координатами (управляемыми переменными) [3].

Указанным метод заключается в представлении полной целевой функции одного из трех показателей $F_{цфi}$ ($i = 3$) в виде произведения двух сомножителей

$$F_{цфi} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_i, \quad (1)$$

где $\Pi_{ид}$ – показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок [4] ТТ; Π_i – целевая функция одного из упомянутых выше трех показателей технического уровня в виде относительных коэффициентов массы $\Pi_{ма}^*$, стоимости $\Pi_{са}^*$ и потерь $\Pi_{па}^*$ активной мощности [3]:

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

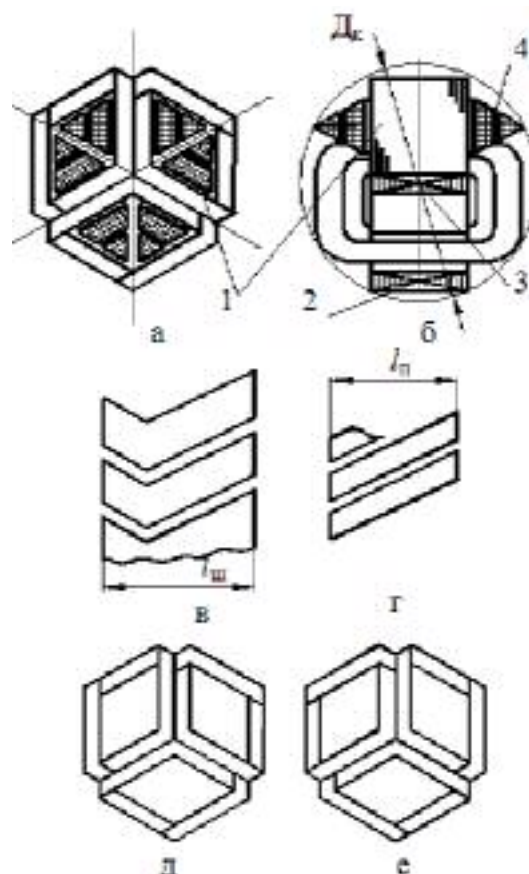


Рис. 1. Схемы продольного (а) и поперечного (б) сечений, а также конструктивно – технологические особенности (в – е) пространственной радиальной электромагнитной системы с безотходным шихтованным магнитопроводом:

1 – стержень; 2 – внешнее ярмо; 3 – внутреннее ярмо; 4 – катушка обмотки

Входящий в (1) любой из относительных показателей в виде коэффициентов массы, стоимости, или основных потерь зависит от коэффициента заполнения обмоточного окна $K_{зо}$ (класса напряжения) ТТ и является функцией универсальных относительных геометрических координат a_m и λ_o [3]:

$$\Pi_{м(с)}^* = f(K_{зо}, a_m, \lambda_o), \quad (2)$$

где a_m – отношение наружного диаметра D_n и внутреннего D_v диаметров расчетных окружностей магнитопровода (рис. 2); λ_o – отношение высоты h_o (рис. 2, б) и максимальной ширины b_o (рис. 2, а) обмоточного окна:

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

$$\lambda_o = h_o / b_o. \quad (4)$$

Кроме того, Π_i^* зависят от соотношений удельных показателей, $\Pi_{ам}^*$ – от соотноше-

ния плотностей γ_o/γ_c , Π_{ac}^* – от соотношений указанных плотностей и стоимостей C_o/C_c активных материалов обмотки и магнитопровода.

При определении целевой функции ЭМС (рис. 1, а и б) принимается, что радиус изгиба внутренних витков угловых зон фазных катушек равен величине изоляционного промежутка между катушкой и стержнем (рис. 1, а и б). Также принимаются идентичными плотности токов обмоток высокого и низкого напряжений. В соответствии со способом сокращения размерности оптимизационной задачи на предварительном этапе проектного синтеза путем замены реальных обмоток трансформатора одной эквивалентной обмоткой [5] вводится понятие усредненного витка фазных катушек. Стороны указанного витка расположены в геометрическом центре равностороннего треугольника сечения геометрического объема фазных катушек в обмоточном окне (рис. 2, а).

Анализ ЭМС (рис. 1, а и б) методом [3] выполняется с использованием (1) – (4) и общих выражений связи площади стержня S_c и массы трехфазной системы фазных катушек m_o с площадью обмоточного окна [4]:

$$S_c = \Pi_{ид} / (K_{30} S_o), \quad (5)$$

$$m_o = 1,5 K_{30} \gamma_o l_w S_o, \quad (6)$$

где l_w – длина усредненного витка совокупности фазных катушек, охватывающих стержень ЭМС.

При определении целевых функций ЭМС (рис. 1, а и б) используются геометрические параметры магнитопровода (рис. 2).

Горизонтальная ширина обмоточного окна b_o , вспомогательный размер Δb и площадь сечения стали стержня S_c магнитопровода определяются через (3), (4) и геометрический параметр D_B (рис. 2):

$$b_o = (D_H - D_B)/2 = D_B (a_M - 1)/2, \quad (7)$$

$$\Delta b = D_B (tg 30^\circ)/2 = D_B / (2\sqrt{3}), \quad (8)$$

$$S_c = K_{3c} h_o D_B = K_{3c} \lambda_o D_B^2 (a_M - 1)/2, \quad (9)$$

где K_{3c} – коэффициент заполнения магнитопровода [4].

Высота стержня h_c , расстояние от усредненного витка фазных катушек до стержня b_w и площадь обмоточного окна S_o определяются через (3) и (7):

$$h_c = 2b_o tg 30^\circ = D_B (a_M - 1)/\sqrt{3}, \quad (10)$$

$$b_w = h_c (tg 30^\circ)/2 = D_B (a_M - 1)/6, \quad (11)$$

$$S_o = h_c b_o = D_B^2 (a_M - 1)^2 / (2\sqrt{3}). \quad (12)$$

Из подстановки S_c и S_o из (9) и (12) в (5) следует:

$$K_{3c} \lambda_o D_B^2 \frac{a_M - 1}{2} = \frac{4\sqrt{3}\Pi_{ид}}{K_{30} D_B^2 (a_M - 1)^2};$$

$$D_B = \sqrt[4]{\Pi_{ид} \frac{6,9282}{K_{3c} K_{30} \lambda_o (a_M - 1)^3}}. \quad (13)$$

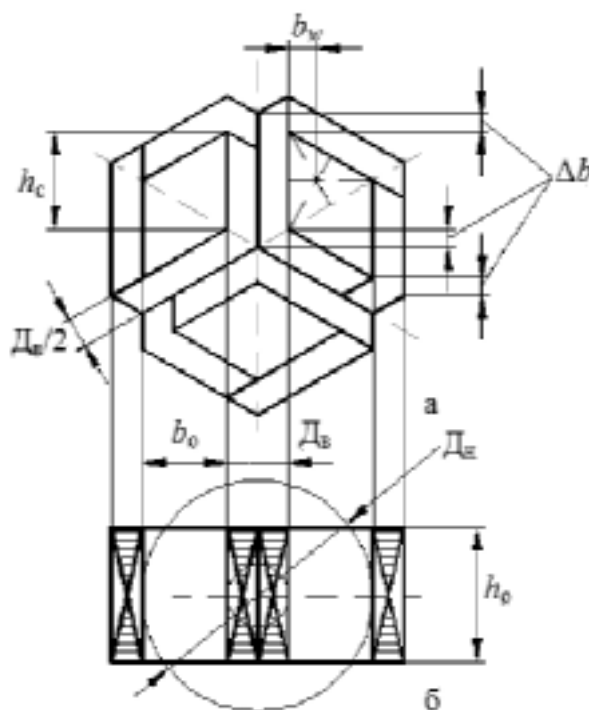


Рис. 2. Конфигурации сечений магнитопровода в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Масса стали магнитопровода (рис. 2) выражается с использованием (4), (7), (8) и (10) через геометрические параметры и координаты уравнением

$$m_m = K_{3c} \gamma_c h_o [3h_c D_B + 3D_B \Delta b + 3(h_c + 2\Delta b)D_B] = \sqrt{3} K_{3c} \gamma_c \lambda_o D_B^3 \times (a_M - 1)(a_M - 0,25). \quad (14)$$

Длина усредненного витка фазных катушек ЭМС (рис. 1, а и б) определяется на основе (4), (7) и (11)

$$l_w = 2D_B + 2h_o + 2\pi b_w = D_B [2 + (a_M - 1)(\lambda_o + \pi/3)]. \quad (15)$$

На основе (12) и (15) уравнение массы меди (алюминия) обмотки (6) преобразуется

$$m_o = 0,433K_{30}\gamma_o D_b^3 (a_m - 1)^2 [2 + (a_m - 1) \times (\lambda_o + 1,0472)]. \quad (16)$$

После подстановки K_{3c} и D_b из (13) уравнения (14) и (16) представляются в виде

$$m_m = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{мм}^*, \quad (17)$$

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

где $\Pi_{мм}^*$ и $\Pi_{мо}^*$ – относительные показатели масс активных материалов ЭМС,

$$\Pi_{мм}^* = \sqrt{3}K_{3c}\lambda_o \left(\sqrt[4]{\frac{6,9282}{K_{3c}K_{30}\lambda_o(a_m - 1)^3}} \right)^3 \times (a_m - 1)(a_m - 0,25); \quad (19)$$

$$\Pi_{мо}^* = 0,433K_{30} \left(\sqrt[4]{\frac{6,9282}{K_{3c}K_{30}\lambda_o(a_m - 1)^3}} \right)^3 \times (a_m - 1)^2 [2 + (a_m - 1)(\lambda_o + 1,0472)]. \quad (20)$$

В соответствии с (1) и (2) и на основе (17) – (20) масса m_a и стоимость C_a ЭМС (рис.1, а и б) определяются уравнениями:

$$m_a = m_m + m_o = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{ма}^*,$$

$$C_a = C_c m_m + C_o m_o = \gamma_c C_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{ид}} \right)^3 \Pi_{са}^*,$$

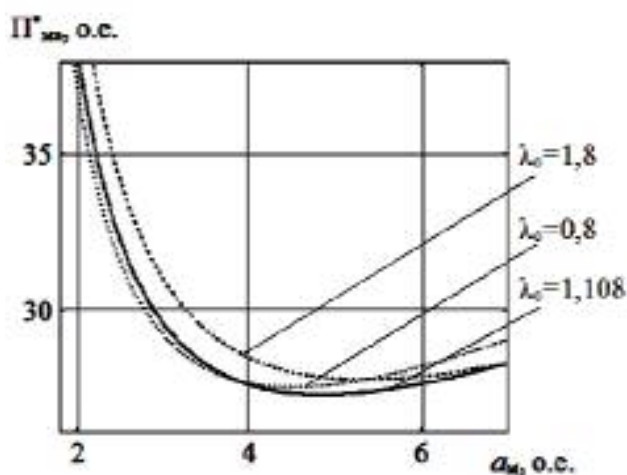
где относительные показатели массы и стоимости определяются функциями

$$\Pi_{ма}^* = 1,732 \left(\sqrt[4]{\frac{6,9282}{K_{3c}K_{30}\lambda_o(a_m - 1)^3}} \right)^3 \times \{K_{3c}\lambda_o(a_m - 1)(a_m - 0,25) + 0,25K_{30} \times (a_m - 1)^2 [2 + (a_m - 1)(\lambda_o + 1,0472)]\gamma_o/\gamma_c\}, \quad (21)$$

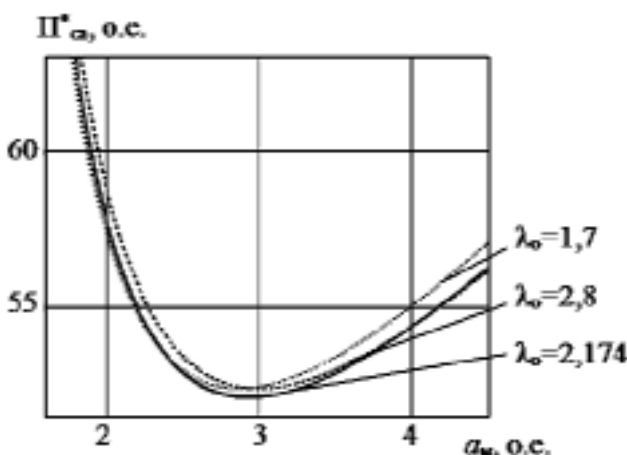
$$\Pi_{са}^* = 1,732 \left(\sqrt[4]{\frac{6,9282}{K_{3c}K_{30}\lambda_o(a_m - 1)^3}} \right)^3 \times \{K_{3c}\lambda_o(a_m - 1)(a_m - 0,25) + 0,25K_{30}(a_m - 1)^2 \times [2 + (a_m - 1)(\lambda_o + 1,0472)]\gamma_o C_o / (\gamma_c C_c)\}. \quad (22)$$

Примеры функциональных зависимостей (21) и (22) ЭМС с медными обмотками, определенных при соотношениях плотностей (кг/м^3) $\gamma_o / \gamma_c = 8,9 / 7,65$ и стоимостей $C_o / C_c = 4$, а также при $K_{3c} = 0,91$ и $K_{30} = 0,3$ представлены на рис. 3. Результаты расчета оптимальных значений координат и показателей (2) ЭМС (рис. 1, а и б) при указанных

выше соотношениях и $K_{3c} = 0,91$, а также различных K_{30} , приведены в таблицах 1 и 2.



а



б

Рис. 3. Зависимости показателя массы (а) и стоимости (б) от геометрических соотношений трехфазой пространственной радиальной электромагнитной системы класса напряжения до 1000 В

1. Экстремальные значения относительных координат и показателя массы радиальной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения координат, о.е.		Относительный коэффициент массы, о.е.
	$a_{мэ}$	$\lambda_{оэ}$	
0,3	4,841	1,108	27,226
0,25	5,206	1,014	28,907
0,2	5,698	0,909	31,183

2. Экстремальные значения относительных координат и показателя стоимости радиальной электромагнитной системы

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения координат, о.е.		Относительный коэффициент стоимости, о.е.
	$a_{мэ}$	$\lambda_{оэ}$	
0,3	2,932	2,174	52,108
0,25	3,115	1,99	54,485
0,2	3,362	1,786	57,705

Выводы

1. Основная геометрическая координата, определяющая массу и стоимость трехфазной пространственной радиальной ЭМС, – отношение a_m диаметров расчетных окружностей магнитопровода.

2. Зависимости массы и стоимости от a_m и λ_o являются унимодальными функциями, позволяющими выполнять геометрическую оптимизацию пространственных радиальных ЭМС.

Список использованной литературы

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

2. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В. С. Блинцов, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, А. С. Садовой // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 16 – 21.

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

4. Ставинський А. А. Розрахунок трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом: [навч. посібник] / А. А. Ставин-

ський, Р. А. Ставинський, О. О. Плахтир. – Миколаїв : НУК, 2004. – 106с.

5. Пуило Г. В. Построение обобщенных математических моделей трансформаторных устройств / Г. В. Пуило // Електромашинобудування та електрообладнання. – 1996. – Вип. 48. – С. 89 – 95.

Получено 18.06.2012

References

1. Avdieieva E.A., (2011), Variants of the technical solutions of electromagnetic systems of three-phase transformers of underwater vehicles electrical equipment systems / E. A. Avdieieva // *Underwater equipment and technology: materials of Ukrainian sc. – techn. conference with international participation*, pp .59 – 63 [in Russian].

2. Blintsov V.S., (2012), Transformers for embedding to limited diameter shells for special equipment objects and the aim formulation of the improvement / V. S. Blintsov, R. A. Stavinskiy, E. A. Avdieieva, A. S. Sadovoj // *Electrical engineering and Electromechanics*. – No. 2, pp. 16 – 21 [in Russian].

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

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

5. Puilo G.V., (1996), Construction of generalized mathematical models of transformer devices / G. V. Puilo // *Electrical machinery and electrical equipment*. –V. 48. – Pp. 89 – 95 [in Russian].



Авдеева
Елена Андреевна,
мл. научн. сотрудник НИЧ
«Подводная техника» Нац. ун-та кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев,
т. (0512) 36-66-36,
e-mail: e.avdeeva@ukr.net.