

УДК 621.314.25

О. О. Пальчиков

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧИСЛА ФАЗ

Аннотация. На основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня с относительными геометрическими управляемыми переменными выполнен сравнительный анализ показателей массы, стоимости и активных потерь радиальной, аксиальной с прямоугольными ярмами и аксиальной с трапецевидными ярмами электромагнитных систем трансформаторов с вращающимся магнитным полем для преобразования числа фаз.

Ключевые слова: аксиальные и радиальные трансформаторы, вращающееся магнитное поле, прямоугольные и трапецевидальные ярма, масса, стоимость, потери активной мощности

O. Palchykov

COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC SYSTEMS OF TRANSFORMERS WITH THE ROTATING MAGNETIC FIELD FOR CONVERTING A NUMBER OF PHASES

Abstract. The comparative analysis of mass, cost and active power losses indications of electromagnetic systems of radial flux and axial flux variants, with rectangular and trapezoidal yokes transformers with the rotating magnetic field for converting a number of phases, based on the method of the relative indications of the technical level with relative geometric controlled variables is considered.

Keywords: axial and radial flux transformers, rotating magnetic field, rectangular and trapezoidal yokes, mass, cost, active power losses

О. О. Пальчиков

ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ОБЕРТОВИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧИСЛА ФАЗ

Анотація. На основі методу відносних коефіцієнтів показників технічного рівня з відносними геометричними керованими змінними виконано порівняльний аналіз показників маси, вартості та активних втрат радіальної, аксіальної з прямокутними ярмами і аксіальної з трапецевидними ярмами електромагнітних систем трансформаторів з обертовим магнітним полем для перетворення числа фаз.

Ключові слова: аксіальні і радіальні трансформатори, обертове магнітне поле, прямокутні і трапецевидальні ярма, маса, вартість, втрати активної потужності

Введение. Эффективная работа мощных полупроводниковых преобразователей (ПП) в составе автономных транспортных электротехнических комплексов и систем обеспечивается учетом и рассмотрением вопросов электромагнитной совместимости, а также ограничением уровня эмиссии кондуктивных помех. Нелинейность элементов ПП приводит к значительному искажению форм кривых питающих токов и напряжений, загрузке автономной сети дополнительной реактивной мощностью и мощностью искажения, что повышает нагрев статорных и роторных обмоток генераторов, потребителей переменного тока и кабельных трасс, а также вызывает сбои автоматики и систем управления. В частности увеличение коэффициента гармоник по напряжению до 10 % обуславливает резкий рост вибрации трансформаторно-реакторного оборудования и асинхронных электродвигателей систем охлаждения ПП на частотах 6ω , 12ω , 18ω , что соответствует 5-й и 7-й, 11-й и 13-й, 17-й и 19-й гармоникам ПП [1].

Традиционным способом улучшения качества электроэнергии и уровня электромагнитной совместимости является увеличение пульсности силовых схем ПП на базе трансформаторов для преобразова-

ния числа фаз [2]. Электромагнитные системы (ЭМС) таких трансформаторов делятся на два основных класса: планарные с пульсирующим магнитным полем [3 – 5], в которых число фаз преобразуется за счет схемных решений, и пространственные с вращающимся магнитным полем на основе асинхронных машин с заторможенным ротором [6]. Трансформаторы с вращающимся магнитным полем (ТВМП) характеризуются полной симметрией выходной системы фазных ЭДС, улучшенными технико-экономическими показателями по сравнению с планарными аналогами. Также преобразователи электроэнергии на их основе отличаются уменьшенным количеством полупроводниковых устройств, упрощенной системой управления и повышенной надежностью в целом [2]. Кроме того, применение ТВМП обеспечивает гальваническую развязку контуров. В свою очередь ЭМС ТВМП делятся на радиальные и аксиальные варианты.

Цель работы – на основе метода целевых функций [6 – 8] обосновать выбор ЭМС ТВМП для работы на вентиляльную нагрузку на транспорте, а также сравнить показатели массы, стоимости и потерь активной мощности радиальной, аксиальной с прямоугольными ярмами и аксиальной с трапецевидными ярмами ЭМС ТВМП.

© Пальчиков О.О., 2015

Объективное сравнение ЭМС рассматриваемых вариантов ТВМП обеспечивается соблюдением принципа электромагнитной эквивалентности [7] и как следствие равенства показателей исходных данных и электромагнитных нагрузок

$$\Pi_{ИД} = K_{E1} P_n / (2,22 K_{w1} f_1 J_1 B_{\delta c} \eta \cos \varphi),$$

где K_{E1} – соотношение ЭДС фазы и напряжения U_1 первичной обмотки; P_n – номинальная мощность; K_{w1} , J_1 – обмоточный коэффициент, а также плотность тока первичной обмотки; f_1 – частота сети; η и $\cos \varphi$ – значения коэффициента полезного действия и энергетического коэффициента ТВМП; $B_{\delta c}$ – среднее значение амплитуды индукции $B_{\delta 1}$ в рабочем стыке, которое для радиального ТВМП постоянно $B_{\delta c} = B_{\delta 1} = \text{const}$, а для аксиального ТВМП определяется выражением

$$B_{\delta c} = B_{\delta 1} (1 - K_B),$$

где $B_{\delta 1}$ – значение индукции в стыке на внешнем диаметре магнитопровода D_{1A} ; K_B – усредненный коэффициент распределения индукции в стыке [9] для ТВМП с улучшенным использованием активного объема

$$K_B = (0,167 / (\xi_A - 1)) \int_1^{\xi_A} (\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15} d\xi_A.$$

Сравнение ЭМС методом [7 – 8] выполняется на основе составления целевых оптимизационных функций $F_{шP(A)}$ для радиальных и аксиальных ЭМС ТВМП

$$F_{шP(A)} = \left(4 \Pi_{ИД}^* \right)^3 K_i \Pi_{iP(A)}^*,$$

где $\Pi_{iP(A)}^*$ – относительный показатель массы ($i = M$), стоимости ($i = C$) и потерь активной мощности ($i = П$), которые являются функцией относительных геометрических управляемых переменных, а также коэффициента заполнения паза $K_{зп}$; K_i – соответственный коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов (ρ_c и C_c – плотность и стоимость электротехнической стали (ЭТС); σ_{m20} – проводимость меди; J_1).

Управляемые переменные: традиционная относительная длина $\lambda_{\delta P}$ и безразмерный параметр a_{MP} радиального ТВМП [6] определяются длиной $l_{\delta P}$, диаметром расточки под внутреннее ярмо D_P и $\Pi_{ИД}$ ЭМС:

$$\lambda_{\delta P} = l_{\delta P} / D_P; \quad a_{MP} = (D_P)^4 / \Pi_{ИД}.$$

Аналогично, управляемые переменные аксиального ТВМП определяются соотношением ξ_A внешнего D_{1A} и внутреннего D_{2A} диаметров магнитопровода [10] и безразмерным параметром a_{MA} [7], зависящим от среднего диаметра ЭМС D_A ,

$$\xi_A = D_{1A} / D_{2A}; \quad a_{MA} = (D_A)^4 / \Pi_{ИД}.$$

Также в математических моделях ЭМС ТВМП используются расчетные соотношения: β – укорочение шага обмотки; $\alpha_{1P(A)}$ – коэффициент зубцов обратный к соотношению $K_{BzP(A)}$ амплитуд индукции в

зубце к амплитуде индукции в рабочем стыке $B_{\delta 1}$ (для аксиального варианта аналогичное соотношение записывается для внешнего диаметра) и $K_{зc}$ – коэффициент заполнения ЭТС магнитопровода; $\alpha_{3P(A)}$ – коэффициент ярем обратный к соотношению $K_{BzP(A)}$ индукции $B_{\delta 1}$ к индукции в ярме и $K_{зc}$ (для аксиального тоже для диаметра D_{1A}); $K_{тр}$ – коэффициент соотношения расчетных величин обмоток [6], зависящий от обмоточных коэффициентов K_{w1} и K_{w2} первичной и вторичной обмоток соответственно; J_2 и K_{E2} – плотности тока и соотношения ЭДС фазы и напряжения U_2 вторичной обмотки, а также J_1 , η и $\cos \varphi$:

$$\begin{aligned} \alpha_{1P(A)} &= 1 / (K_{зc} K_{BzP(A)}); \\ \alpha_{3P(A)} &= 1 / (K_{зc} K_{BzP(A)}); \\ K_{тр} &= \frac{J_1 K_{w1} \eta \cos \varphi K_{E2}}{J_2 K_{w2} K_{E1}}. \end{aligned}$$

Показатели материалоемкости первичной и вторичной обмоток Π_{w1P}^* и Π_{w2P}^* , медных обмоток $\Pi_{шP}^*$, изоляции в пазу $\Pi_{шИ}^*$ и ЭТС магнитопровода $\Pi_{ммP}^*$ активной части радиального ТВМП [6]:

$$\Pi_{w1P}^* = \left\{ \lambda_{\delta P} + 1,3\beta \pi [1 + f_1 (K_{зп} \lambda_{\delta P} a_{MP}) (2K_{тр} + 1) / (1 + K_{тр})] / 2 \right\} \div \left(\lambda_{\delta P}^4 \sqrt[4]{a_{MP}} \right);$$

$$\Pi_{w2P}^* = K_{тр} \left\{ \lambda_{\delta P} + 1,3\beta \pi [1 + f_1 (K_{зп} \lambda_{\delta P} a_{MP}) (K_{тр}) (1 + K_{тр})] / 2 \right\} \div \left(\lambda_{\delta P}^4 \sqrt[4]{a_{MP}} \right);$$

$$\Pi_{шP}^* = \Pi_{w1P}^* + \Pi_{w2P}^*; \quad \Pi_{шИ}^* = (1 + K_{тр}) / \sqrt[4]{a_{MP}};$$

$$\begin{aligned} \Pi_{ммP}^* &= K_{зc}^4 \sqrt[4]{(a_{MP})^3} \left\{ \pi \lambda_{\delta P} [f_1 (K_{зп} \lambda_{\delta P} a_{MP}) + \alpha_{3P} / 2] \times \right. \\ &\quad \left. \times [1 + f_1 (K_{зп} \lambda_{\delta P} a_{MP}) + \alpha_{3P} / 2] + \right. \\ &\quad \left. + \pi \lambda_{\delta P} [\alpha_{3P} / 2 - (\alpha_{3P} / 2)^2] - [(1 + K_{тр}) / (K_{зп} a_{MP})] \right\}, \end{aligned}$$

где $f_i(K_{зп}, \lambda_{\delta P}, a_{MP})$ – функциональный сомножитель упрощения записи

$$f_i(K_{зп}, \lambda_{\delta P}, a_{MP}) = 0,5(\alpha_{1P} - 1) + [0,25(\alpha_{1P} - 1)^2 + (1 + K_{тр}) / (\pi K_{зп} \lambda_{\delta P} a_{MP})]^{0,5}.$$

Показатели материалоемкости медных обмоток Π_{wA}^* , изоляции в пазу $\Pi_{шИА}^*$ и ЭТС магнитопровода $\Pi_{ммA}^*$, а также показатели потерь в зубцах $\Pi_{ПzA}^*$ (зависящий от коэффициента интегральных потерь $f_{ПzA}$) и массы ярма $\Pi_{атA}^*$ (зависящий от коэффициента трапецидальности сечения ярма $K_{та}$) аксиального ТВМП с трапецидальными сечениями ярем при учете известных расчетных выражений [7 – 8; 10]:

$$\Pi_{wA}^* = \frac{(1 + 1/\xi_A)(1 + K_{тр})}{2\sqrt[4]{a_{MA}}(1 - 1/\xi_A)} \left[\frac{1 - 1/\xi_A}{1 + 1/\xi_A} + \frac{1,3\beta \pi}{2} \right]; \quad (1)$$

$$\Pi_{шИА}^* = (1 + K_{тр}) / (2\sqrt[4]{a_{MA}}); \quad (2)$$

$$\Pi_{ммA}^* = \frac{K_{зc}}{\sqrt[4]{a_{MA}}} \left(\frac{1 + K_{тр}}{K_{зп}} \left[\frac{1 + 1/\xi_A}{4(1 - \alpha_{1A})} - \frac{1}{2} \right] \right) + \Pi_{ат(и)A}^*; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{ПzA}^* &= K_{зc} f_{ПzA} (1 + K_{тр}) \div \\ &\div \sqrt[4]{a_{MA}} K_{зп} K_{BzA}^2 \pi (1 - 1/\xi_A) (1 - \alpha_{1A}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$f_{ПЗА} = \int_0^1 \int_{\xi_A}^1 \left(\frac{1}{4\xi_A} - \frac{1-\alpha_{1A}}{4} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{1-0,167(\xi_A-1)^{1,36}\xi_A^{0,15}}{K_{зс}(1-\xi_A)(1-\alpha_{1A})} \right)^2 d(1/\xi_A) d\varphi$$

$$\Pi_{атА}^* = \sqrt[4]{a_{МА}^3 K_{зс} K_{та} 2\pi \alpha_{3А} \frac{1-1/\xi_A}{1+1/\xi_A}}$$

$$K_{та} = \frac{1 + \frac{1-0,167(\xi_A-1)^{1,36}\xi_A^{0,15}}{\xi_A}}{(1+1/\xi_A)}$$

В математической модели аксиального ТВМП с прямоугольными сечениями ярем, кроме выражений (1) – (4), следует учитывать постоянство высоты ярма, а также уменьшение индукции в ярме по радиусу в показателях материалоемкости ярма и потерь в нем:

$$\Pi_{апА}^* = \sqrt[4]{a_{МА}^3 K_{зс} K_{та} 4\pi \alpha_{3А} \frac{1-1/\xi_A}{(1+1/\xi_A)^2}}$$

$$\Pi_{аппА}^* = \frac{4\pi \alpha_{3А} \sqrt[4]{a_{МА}^3 K_{зс}}}{(1+1/\xi_A)^2} \int_{\xi_A}^1 \frac{(1-0,167(\xi_A-1)^{1,36}\xi_A^{0,15})^2}{(\xi_A)^3} d(1/\xi_A)$$

В результате получены следующие зависимости показателей ЭМС радиального и аксиального вариантов ТВМП:

$$\Pi_{MP(A)}^* = \rho_M \Pi_{WP(A)}^* / \rho_C + \rho_{и} \Pi_{WP(A)}^* / \rho_C + \Pi_{ММА}^* ; \quad (5)$$

$$\Pi_{CP(A)}^* = C_{MP} \Pi_{WP(A)}^* / (C_C \rho_C) + C_{иP} \Pi_{WP(A)}^* / (C_C \rho_C) + \Pi_{ММА}^* ; \quad (6)$$

$$\Pi_{TP(A)}^* = \frac{P_c B_1^2 \rho_c \sigma_{M20}}{J_1^2} (K_{дз} K_{BzP(A)}^2 \Pi_{ГЛP(A)}^* + K_{да} K_{BzP(A)}^2 \Pi_{аP(ТА)}^* (ппА)) + \Pi_{WP(A)}^* ; \quad (7)$$

где P_c – удельные потери ЭТС; $\rho_{M(и)}$ и $C_{M(и)}$ – плотность и стоимость меди (изоляции); $K_{дз(a)}$ – коэффициент повышения потерь зубцов (ярем).

Примеры исследований и сравнения функциональных зависимостей (5) – (7) показателей аксиальных ТВМП при $K_{BaP(A)} = 2$; $J_1 = 5,5$ А/мм²; $B_1 = 0,75$ Тл; $K_{BzP} = 2,75$; рационального K_{BzA} (который выбирается по условию не превышения индукции в зубце 2 Тл на D_{2A}); марки ЭТС 2013 и рыночных стоимостей материалов активной части радиального и аксиальных с трапециевидными и прямоугольными ярмами ТВМП для преобразования числа фаз приведены в таблицах 1 и 2. В табл. 2 по результатам использования аналогичной [6] комплексной математической модели компромиссной оптимизации определены геометрические соотношения ЭМС ТВМП с отклонениями не больше 8,6 % для радиальных и 7,6 % для аксиальных вариантов с трапециевидными ярмами от оптимальных показателей массы, стоимости и активных потерь. В соответствии с табл. 2 требование к максимизации полезной нагрузки транспортных средств полностью обеспечивается выбором аксиальных вариантов ЭМС ТВМП для преобразования числа фаз.

Выводы. Установлено, что аксиальные ЭМС ТВМП с трапециевидными сечениями ярем отличаются от электромагнитно-эквивалентных радиальных вариантов ЭМС ТВМП улучшенными (сниженными) показателями массы, стоимости и активных потерь соответственно на 15 %, 5,8 % и 5,6 %.

Показано, что аксиальные ЭМС ТВМП с прямоугольным ярмом уступают по показателям стоимости и потерь соответственно на 4,9 % и 0,6 % и характеризуются улучшенным показателем массы на 8,4 % относительно радиального аналога.

1. Оптимальная геометрия электромагнитных систем радиальных и аксиальных трансформаторов с вращающимся магнитным полем по критериям минимумов массы, стоимости и потерь

Критерий	K _{зп}	K _{тр}	Радиальный трансформатор			Аксиальный трансформатор с прямоугольными ярмами			Аксиальный трансформатор с трапециевидными ярмами		
			$\lambda_{\delta P}$, о.е.	a_{MP} , о.е.	Π_{iP}^* , о.е.	ξ_A , о.е.	a_{MA} , о.е.	Π_{iA}^* , о.е.	ξ_A , о.е.	a_{MA} , о.е.	Π_{iA}^* , о.е.
F _{цмΣ} → min	0,3	0,5	2,65	0,500	11,614	1,75	2,984	10,630	1,90	3,232	9,833
		1,0	2,95	0,530	14,400	1,75	3,943	13,190	1,90	4,310	12,201
		1,5	2,95	0,665	17,023	1,75	4,956	15,593	1,90	5,435	14,424
F _{цсΣ} → min	0,3	0,5	2,80	2,555	34,098	2,25	7,488	35,781	2,50	9,207	32,212
		1,0	2,80	3,400	42,309	2,25	9,972	44,397	2,50	12,297	39,855
		1,5	2,80	4,255	50,017	2,25	12,492	52,485	2,50	15,356	47,116
F _{цпΣ} → min	0,3	0,5	3,40	1,680	4,140	2,45	11,954	4,166	2,70	7,387	3,909
		1,0	3,40	2,240	5,137	2,45	15,169	5,169	2,70	9,840	4,850
		1,5	3,40	2,795	6,073	2,45	19,887	6,110	2,70	12,284	5,733

2. Выбор геометрии радиальных и аксиальных трансформаторов

K _{зп}	K _{тр}	$\lambda_{\delta P}$, о.е.	a_{MP} , о.е.	Π_{MP}^* , %	Π_{CP}^* , %	Π_{TP}^* , %	ξ_A , о.е.	a_{MA} , о.е.	Π_{MA}^* , %	Π_{CA}^* , %	Π_{PA}^* , %
		Радиальный						Аксиальный с трапециевидными ярмами			
0,3	0,5	2,9	1,0	8,4	8,1	7,7	2,20	5,0	6,7	6,7	7,5
	1,0	2,7	1,5	8,6	8,0	6,3	2,20	7,0	7,6	6,4	6,9
	1,5	3,1	1,5	8,5	8,2	6,0	2,20	8,5	7,1	6,8	7,3

Список использованной литературы

1. Черевко А. И. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и электрооборудования в автономных электроэнергетических установках : Монография [Текст] / А. И. Черевко. – Архангельск : Изд-во АГТУ. – 2005. – 185 с.
2. Сингаевский Н. А. Улучшение уровня ЭМС в САЭ при использовании трансформаторов с вращающимся магнитным полем [Текст] / Н. А. Сингаевский, Б. Х. Гайтов, Ф. И. Жуков. // Известия вузов Электромеханика. – 1997. – № 6. – С. 32 – 37.
3. Munteanu A., Simion A., Hagianu D.A. and oth., (2014), Special Three-Phase to Multiple Different Polyphase Systems Electric Transformer [Text], *Electrical and Power Engineering (EPE), International Conference and Exposition okt. 16 – 18*, pp. 345 – 348.
4. Kahel M.E., Oliver G., Guimaraes C. and oth., Transformations' de Conversion cinq et Sept Phases [Text], [Five and Seven Phase Converter Transformers], (1995), *Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference Sep. 5-8, Montreal, QC, Canada*, pp. 708 – 711.
5. Moinoddin S., Iqbal A., Abu-Rub H. and oth., (2012), Three-Phase to Seven-Phase Power Converting Transformer [Text], *IEEE Trans. Energy Convers*, No. 3, pp. 757 – 765.
6. Пальчиков О. О. Показатели массы и стоимости трансформаторов с вращающимся магнитным полем для преобразования числа фаз [Текст] / О. О. Пальчиков // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК. – 2014. – № 5 (455). – С. 67 – 72.
7. Ставинский А. А. Использование метода относительных коэффициентов показателей технического уровня в решении задач оптимизации асинхронных двигателей [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // *Электротехника і електромеханіка*. – 2014. – № 5. – С. 37 – 44.
8. Ставинский А. А. Целевые функции сравнительного анализа энергетической эффективности электромагнитных систем асинхронных двигателей с внутренними и внешними роторами [Текст] / А. А. Ставинский, О. О. Пальчиков // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – № 1. – С. 41 – 45.
9. Игнатов В. А. Исследование распределения магнитного поля в активном объеме торцевых электрических машин с витым магнитопроводом [Текст] / В. А. Игнатов, А. А. Ставинский, И. Г. Забора // *Электротехника*. – 1983. – № 8. – С. 27 – 30.
10. Игнатов В. А. Зависимости технико-экономических показателей торцевых асинхронных двигателей от соотношения диаметров активных частей [Текст] / В. А. Игнатов, А. А. Ставинский // *Электричество*. – 1984. – № 6. – С. 28 – 34.

Получено 29.04.2015

References

1. Cherevko A.I. Elektromagnitnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovatelei i elektrooborudovaniya v avtonomnykh elektroenergeticheskikh ustanovkakh: Monografiya [Electromagnetic Compatibility of Semiconductor Converters and an Electrical Equipment in the Autonomous Electric Power Plants: Monograph], (2005), Arkhangel'sk, Russian Federation, *ASTU Publ.*, 185 p. (In Russian).
2. Singaevskii N.A., Gaitov B.Kh., and Zhukov F.I. Uluchshenie urovnya EMS v SAE pri ispol'zovanii transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Im-

proving the Level of EMC in SAE by Using Transformers with the Rotating Magnetic Field], (1997), *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, No. 6, pp. 32 – 37 (In Russian).

3. Munteanu A., Simion A., Hagianu D.A. and oth. (2014), Special Three-Phase to Multiple Different Polyphase Systems Electric Transformer, *Electrical and Power Engineering (EPE), International Conference and Exposition okt. 16 – 18*, pp. 345 – 348. (In English).

4. Kahel M.E., Oliver G., Guimaraes C. and oth. Transformations' de Conversion cinq et Sept Phases [Five and Seven Phase Converter Transformers], (1995), *Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference Sep. 5-8, Montreal, QC, Canada*, pp. 708 – 711 (In French).

5. Moinoddin S., Iqbal A., Abu-Rub H. and oth., (2012), Three-Phase to Seven-Phase Power Converting Transformer, *IEEE Trans. Energy Convers*, No. 3, pp. 757 – 765 (In English).

6. Palchykov O.O. Pokazateli massy i stoimosti transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem dlya preobrazovaniya chisla faz [Mass and Cost Indications of Transformers with the Rotating Magnetic Field for Converting a Number of Phases], (2014), *Zbirnyk Naukovykh Prats' NUK*, Mykolaiv, Ukraine, No. 5 (455), pp. 67 – 72 (In Russian).

7. Stavinskii A.A., and Palchykov O.O. Ispol'zovanie metoda otноситel'nykh koeffitsientov pokazatelei tekhnicheskogo urovnya v reshenii zadach optimizatsii asinkhronnykh dvigatelei [Using the Method of Relative Indications of the Technical Level in Solving Optimization Problems of Induction Motors], (2014), *Electrical Engineering & Electromechanics*, No. 5, pp. 37 – 44 (In Russian).

8. Stavinskii A.A., and Palchykov O.O. Tselevye funktsii sravnitel'nogo analiza energeticheskoi effektivnosti elektromagnitnykh sistem asinkhronnykh dvigatelei s vnutrennimi i vneshnimi rotorami [Objective Functions of the Comparative Analysis of the Energy Efficiency of Electromagnetic Systems of Induction Motors with Inner and Outer Rotors], (2015), *Electrical Engineering & Electromechanics*, No. 1, pp. 41 – 45 (In Russian).

9. Ignatov V.A., Stavinskii A.A., and Zabora I.G. Issledovanie raspredeleniya magnitnogo polya v aktivnom ob'eme tortsevykh elektricheskikh mashin s vitym magnitoprovodom [Investigation of the Distribution of the Magnetic Field in the Active Volume of Axial Electrical Machines with the Wound Magnetic Core], (1983), *Electrical Engineering*, No. 8, pp. 27 – 30 (In Russian).

10. Ignatov V.A., and Stavinskii A.A. Zavisimosti tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei tortsevykh asinkhronnykh dvigatelei ot sootnosheniya diametrov aktivnykh chastei [Dependence of Technical and Economic Indications of Axial Induction Motors on the Ratio of the Active Parts Diameter], (1984), *Electrical Technology*, No. 6, pp. 28 – 34 (In Russian).



Пальчиков

Олег Олегович,

аспирант Национального ун-та кораблестроения им. адм. Макарова, 54025, г. Николаев, Украина, пр. Героев Сталинграда, 9).
Тел. дом. (0512) 55 96 89.

E-mail: ole2013hulk@yandex.ua