

УДК 621.314

А. А. Ставинский, д-р техн. наук,
Р. А. Ставинский, канд. техн. наук,
А. Н. Цыганов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С КРУГОВЫМИ И ВОСЬМИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ ПЛАНАРНЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Аннотация. Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимума потерь активной мощности, а также выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности планарных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней, ярем и катушек обмоток.

Ключевые слова: трансформатор, круговые и восьмигранные контуры, минимум потерь.

A. A. Stavinskiy, ScD.,
R. A. Stavinskiy, Ph.D.,
A. N. Ciganov

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF LOSSES OF THREE PHASE TRANSFORMER WITH CIRCULAR AND OCTAHEDRAL FORMING CONTOURS OF THE RODS OF PLANER CORES

Abstract. Analytical dependences determining the optimum geometric parities on the criteria of minimum active power losses are received, and comparative analysis of energy effectiveness of planar electromagnetic systems of three-phase transformers with circular and octagonal forming contours of rods, yoke and windings coils is also made.

Keywords: transformer, circular and octahedral contours, minimum losses.

А. А. Ставинський, д-р техн. наук,
Р. А. Ставинський, канд. техн. наук,
О. М. Циганов

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З КРУГОВИМИ І ВОСЬМИГРАННИМИ УТВОРЮВАЛЬНИМИ КОНТУРАМИ СТРИЖНІВ ПЛАНАРНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ

Анотація. Отримано аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімуму втрат активної потужності, а також виконано порівняльний аналіз енергетичної ефективності планарних електромагнітних систем трифазних трансформаторів з круговими і восьмигранними утворювальними контурами стрижнів, ярем та катушок обмоток.

Ключові слова: трансформатор, кругові та восьмигранні контури, мінімум втрат.

Введение. В XXI веке кроме увеличения производства электроэнергии, важнейшей задачей является её сбережение при передаче, распределении и преобразовании, что требует дальнейшего усовершенствования активной части и систем форсированного охлаждения, а также повышения мощности единичных генерирующих и трансформирующих агрегатов [1].

Анализ предыдущих исследований

Увеличение стоимости энергии стимулировало снижение потерь холостого хода (ПХХ) и потерь короткого замыкания (ПКЗ), за последние десятилетия энергетическая эффективность трансформаторов с "классическими" конструкциями активной части повышена на 50 % [2]. Однако, в дальнейшем

возможности развития преобразователей энергии в рамках классических структур и конструкций их электромагнитных систем (ЭМС) традиционными способами использования усовершенствованных электротехнических материалов и оптимизационных расчетов весьма ограничены. Дополнительное снижение ПХХ возможно использованием в производстве магнитопроводов аморфной электротехнической стали (ЭТС) при условии преодоления её физико-технологических недостатков и снижения стоимости [2]. Разработка и освоение производства новых аморфных и микрокристаллических ЭТС начаты еще в последней четверти XX века и не дают существенной экономии электроэнергии в связи с высоким коэффициентом полезного действия электрических машин [3].

Согласно [2], основным методом снижения ПКЗ является уменьшение плотностей

© Ставинский А.А., Ставинский Р.А.,
Цыганов А.Н., 2012

токов обмоток с применением так называемых компактных (многожильных транспонированных) проводов. При этом возрастает материалоемкость и стоимость ЭМС.

Более радикальным способом усовершенствования индукционных статических преобразователей является их структурное преобразование и использование нетрадиционных технических решений ЭМС с обеспечением снижения как потерь, так и материалоемкости [4, 5].

В традиционных ЭМС (рис. 1) трехфазных трансформаторов (ТТ) увеличение площади сечения каждого из стержней и ярем до коэффициента заполнения образующего контура (ОК) $K_k=0,9...0,93$ достигается расположением в ОК (рис.2, а) 14–32 ступеней и размеров пакетов ЭТС [7].

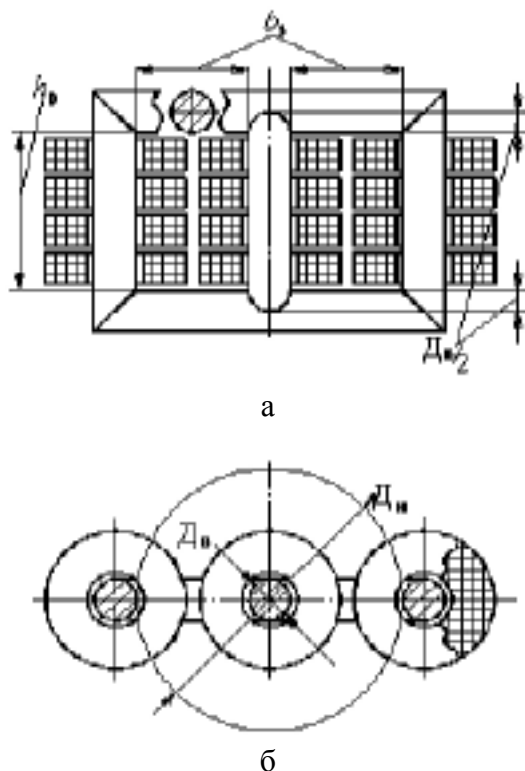


Рис.1. Продольное (а) и поперечное (б) сечения конструктивной схемы трехфазной планарной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами

Преобразование структуры ЭМС заменой круговых ОК на восьмигранные с использованием в стержнях и ярмах 5 и 7 пакетов ЭТС (рис.2, б, в) обеспечивает $K_k=0,9$ и $K_k=0,931$, создает предпосылки повышения электродинамической устойчивости обмоток и снижает трудоемкость производства маг-

нитопроводов [4]. Также, согласно [4], на 9–11 % и 6–8 % снижается масса и стоимость ЭМС (рис.3) с магнитопроводом сечения (рис.2, б, в) относительно ЭМС (рис. 1) с круговыми ОК стержней и ярем, заполненными 14–32 пакетами ЭТС. Снижение материалоемкости и стоимости ЭМС с восьмигранными ОК (рис. 2, б, в) относительно ЭМС с круговыми ОК (рис. 2,а) возрастает при уменьшении в последней числа пакетов ЭТС (уменьшении мощности ТТ).

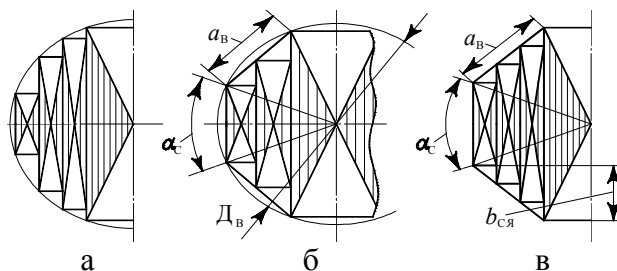


Рис. 2. Варианты конфигурации сечений стержней и ярем с круговым (а) и восьмигранными (б, в) образующими контурами

Целью работы является сравнительный анализ энергетической эффективности вариантов планарной ЭМС ТТ с круговыми и восьмигранными ОК.

Материал и результаты исследований

Сравнительный анализ потерь активной мощности ЭМС выполняется универсальным методом [5], согласно которому сумма ПХХ и ПКЗ представляется полной целевой функцией (ЦФ) потерь активной мощности P_Σ :

$$F_{\dot{I}_{\dot{a}}} = P_\Sigma = \left(4 \sqrt{\dot{I}_{\dot{a}}} \right)^3 \dot{I}_{\dot{a}}, \quad (1)$$

где $\Pi_{ид}$ – идентичный для сравниваемых ЭМС показатель исходных данных и электромагнитных нагрузок (ЭМН) ТТ: $\Pi_{па}$ – ЦФ относительного показателя P_Σ в виде коэффициента $\Pi_{па}^*$.

Целевая функция $\Pi_{па}$ определяется $\Pi_{па}^*$, а также зависит от коэффициента добавочных ПХХ [7] $K_{дх}$, плотности ЭТС γ_c , удельных потерь ЭТС $P_{ум}$ магнитопровода и среднего значения амплитуды индукции стержня B_c :

$$\dot{I}_{\dot{a}} = \hat{E}_{a0} \gamma_n D_{oi} \hat{A}_n^2 \dot{I}_{\dot{a}}^*.$$

Входящий в (1) показатель $\Pi_{па}^*$ является функцией коэффициента заполнения обмоточного окна $K_{зо}$ (класса напряжения), коэффициента удельных показателей и ЭМН K_y и

двух (в рассматриваемых ЭМС) основных геометрических управляемых переменных (УП) a_m и λ_0 :

$$\dot{I}_{i\dot{a}}^* = f(\hat{E}_{\dot{a}}, \hat{E}_{\dot{o}}, \dot{a}_i, \lambda_i),$$

где a_m – отношение наружного D_n к внутреннему D_v диаметру расчетных окружностей магнитопроводов ЭМС; λ_0 – отношение высоты h_o к ширине b_o обмоточного окна (рисунки 1 и 3):

$$\dot{a}_i = \ddot{A}_i / \ddot{A}_a, \quad (2)$$

$$\lambda_0 = h_o / b_o. \quad (3)$$

Коэффициент удельных показателей и ЭМН определяется соотношением [6]

$$\hat{E}_{\dot{o}} = \hat{E}_{\dot{a}} \hat{\gamma}_i D_{oi} j_o^2 / (\hat{E}_{\dot{a}} \hat{\gamma}_n D_{oi} \hat{A}_n^2), \quad (4)$$

где K_{dk} – коэффициент добавочных ПКЗ [7]; γ_o – плотность активного материала обмотки (АМО); P_{yo} – удельные потери в АМО.

При сравнительном анализе ЭМС, отличающихся структурой и технологией изготовления вариантов магнитопровода, принимаются следующие известные допущения [4–6]. Используется конструкция обмоток с чередующимися фазными катушками и средними витками, расположенными на четверти ширины b_o обмоточного окна (рис. 1, рис. 3). В таких обмотках одинаковы плотности фазных токов ($j_{o1} = j_{o2} = j_o$) высокого и низкого напряжений. Исходя из принципа электромагнитной эквивалентности при структурной оптимизации ЭМС принимаются соответственно идентичными ЭМН j_o и B_c . Средние (по сечению) значения амплитуд индукции ярем и стержней одинаковы. Также соответственно идентичными являются коэффициенты K_k и K_{zo} и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС K_{zc} .

При принятых допущениях ПХХ P_{xx} и ПКЗ P_{kz} ЭМС (рис. 1 и 3) определяются уравнениями [6]

$$D_{oo} = \hat{E}_{\dot{a}} \hat{E}_{\dot{c}} \gamma_n D_{oi} \hat{A}_n^2 V_{i\dot{a}}(\dot{a}), \quad (5)$$

$$P_{kz} = 1,5 K_{dk} K_{zo} \gamma_o P_{yo} j_o^2 l_{wk(b)} S_{ok(b)}, \quad (6)$$

где $V_{mk(b)}$, $l_{wk(b)}$ и $S_{ok(b)}$ – соответственно объем магнитопровода, средняя длина витка чередующихся катушек и площадь обмоточного окна вариантов планарной ЭМС с круговыми (рис. 1) и восьмигранными (рис. 3) ОК.

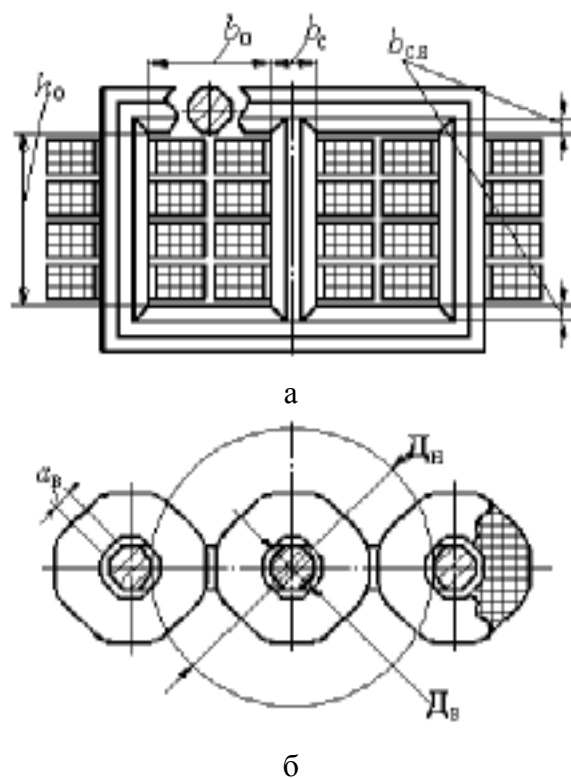


Рис. 3. Продольное (а) и поперечное (б) сечения конструктивной схемы трехфазной планарной электромагнитной системы с восьмигранными образующими контурами

Величины $V_{mk(b)}$, $l_{wk(b)}$ и $S_{ok(b)}$ определяются известными из [4] выражениями:

$$V_{i\dot{a}} = 0,7854 \hat{E}_{\dot{a}} \ddot{A}_a^3 [(a_i - 1)(2 + 1,5 \lambda_i) + 6,2146]; \quad (7)$$

$$V_{mb} = K_k D_v^3 [(a_m - 0,9239)(1,4126 + 1,05943 \lambda_o) + 4,0278], \quad (8)$$

$$l_{w\dot{e}} = \pi \ddot{A}_a [1 + 0,25(a_i - 1)], \quad (9)$$

$$l_{w\dot{a}} = 3,0616 \ddot{A}_a [1 + 0,12827(a_i - 0,9239)], \quad (10)$$

$$S_{i\dot{e}} = 0,25 \lambda_i \ddot{A}_a^2 [(a_i - 1)^2], \quad (11)$$

$$S_{i\dot{a}} = 0,25 \lambda_i \ddot{A}_a^2 [(a_i - 0,9239)^2]. \quad (12)$$

Входящий в (7) – (12) диаметр внутренней расчетной окружности магнитопровода определяется выражением из [4]:

$$\ddot{A}_a = \sqrt[4]{\dot{I}_{\dot{e}\dot{a}} \hat{E}_{\dot{a}} \hat{E}_{\dot{a}(\dot{a})} / (\hat{E}_{\dot{c}\dot{a}} \hat{E}_{\dot{e}} \hat{E}_{\dot{c}\dot{a}})}, \quad (13)$$

где $K_{dk(b)}$ – коэффициент расчетного диаметра ЭМС с круговыми (восьмигранными) ОК (рисунки 1 и 3),

$$\hat{E}_{\dot{a}\dot{e}} = 5,093 / [\lambda_i (a_i - 1)^2], \quad (14)$$

$$\hat{E}_{aa} = 5,6635 / \left[\lambda_i (a_i - 0,9239)^2 \right]. \quad (15)$$

Суммарные потери ЭМС (рисунки 1 и 3) определяются на основе (4), (5) и (6) уравнением

$$D_{\Sigma} = D_{\delta\delta} + D_{\epsilon\epsilon} = \hat{E}_{\delta\delta} \gamma_n D_{\delta\delta} \hat{A}_n^2 \times \\ \times \left[\hat{E}_{\epsilon\epsilon} V_{i\epsilon(\hat{a})} + 1,5 \hat{E}_{\epsilon\epsilon} \hat{E}_{\delta\delta} l_{w\epsilon(\hat{a})} S_{i\epsilon(\hat{a})} \right]. \quad (16)$$

На основе (1), после подстановки величины из (7), (9), (11), (13) и (14), а также соответственно (8), (10), (12), (13) и (15) уравнение (16) преобразуется в ЦФ потерь активной мощности каждой из рассматриваемых планарных ЭМС ТТ:

$$F_{i\hat{a}\epsilon(\hat{a})} = D_{\Sigma\epsilon(\hat{a})} = \hat{E}_{\delta\delta} \gamma_n D_{\delta\delta} \hat{A}_n^2 \left(\sqrt[4]{\hat{I}_{\epsilon\epsilon}} \right) \hat{I}_{i\hat{a}\epsilon(\hat{a})}^*,$$

где ЦФ относительного показателя энергетической эффективности ЭМС (рисунки 1 и 3) определяются соответственно уравнениями

$$\Pi_{\text{пак}}^* = 0,7854 \left(\sqrt[4]{\frac{5,093}{K_{3c} K_K K_{30} \lambda_o (a_m - 1)^2}} \right)^3 \times \\ \times \{ K_{3c} K_K [(a_m - 1)(2 + 1,5\lambda_o) + 6,2146] + 1,5 K_{30} K_Y \lambda_o \times \\ \times [1 + 0,25(a_i - 1)](a_i - 1)^2 \}. \quad (17)$$

$$\Pi_{\text{пав}}^* = \left(\sqrt[4]{\frac{5,6635}{K_{3c} K_K K_{30} \lambda_o (a_m - 0,9239)^2}} \right)^3 \times \\ \times \{ K_{3c} K_K [(a_m - 0,9239)(1,4126 + 1,05943\lambda_o) + \\ + 4,0278] + 1,1481 \hat{E}_{\epsilon\epsilon} \hat{E}_{\delta\delta} \lambda_i [1 + 0,12827 \times \\ \times (a_i - 0,9239)](a_i - 0,9239)^2 \}. \quad (18)$$

Согласно [2, 7] в диапазоне номинальной мощности $S_n \geq 6300$ кВ·А в силовых "масляных" ТТ используются медный АМО с $\gamma_o = 8900$ кг/м³ и $P_{\gamma o} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ Вт/кг, а также ЭТС марок 3404–3408 с $\gamma_c = 7650$ кг/м³ и $K_{3c} = 0,91$ при двухкратной лакировке проката

толщиной 0,35 мм. Значения ЭМН при $f = 50$ Гц составляют $B_c = 1,5 \dots 1,7$ Тл и $j_0 = 2 \dots 3,5$ А/мм². Для указанных толщины рулонной ЭТС и значений ЭМН принимаются величины коэффициентов добавочных потерь $K_{\text{дк}} \leq 1,15$ и $K_{\text{дх}} \leq 1,25$ [7].

В варианте использования в расчетах ЭМС ЭТС 3404 со значениями ($f = 50$ Гц) $P_{\text{ум}} B_c^2 = 1,1$ Вт/кг при $B_c = 1,5$ Тл и $P_{\text{ум}} B_c^2 = 1,6$ Вт/кг при $B_c = 1,7$ Тл [7], а также указанных выше данных и диапазонах изменения ЭМН,

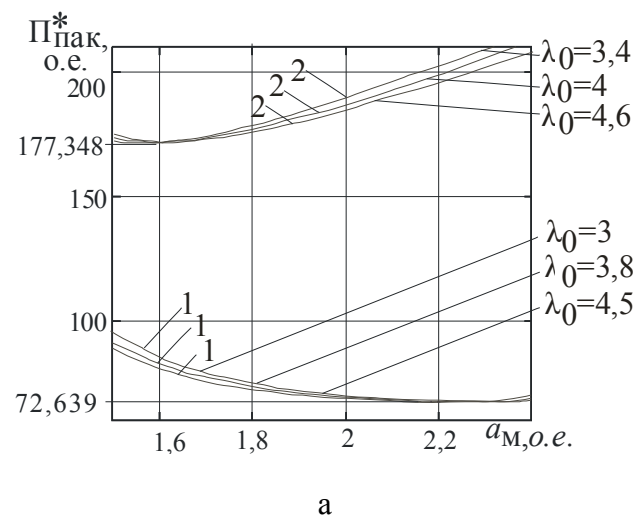
$$6,4 = K_{ymin} \leq K_y \leq K_{ymax} = 28,6. \quad (19)$$

Примеры результатов расчета ЦФ (17), (18) и экстремальных значений $\Pi_{\text{пао(в)}}^* \min$ ЭМС (рисунки 1 и 3) при значении $K_{30} = 0,25$, а также значениях K_{ymin} и K_{ymax} (19) представлены в таблице и на рис. 4.

Зависимости относительных показателей потерь активной мощности от коэффициента удельных показателей и электромагнитных нагрузок, а также коэффициента заполнения образующего контура

1. Относительные показатели потерь

$K_{y,o.e.}$	$\Pi_{\text{пакmin}, o.e.}^*$		$\Pi_{\text{павmin}, o.e.}^*$	
	$K_{K,o.e.}$		$K_{K,o.e.}$	
	0,9	0,93	0,9	0,93
6,4	72,639	71,912	67,979	67,247
28,6	177,834	175,608	171,73	169,418



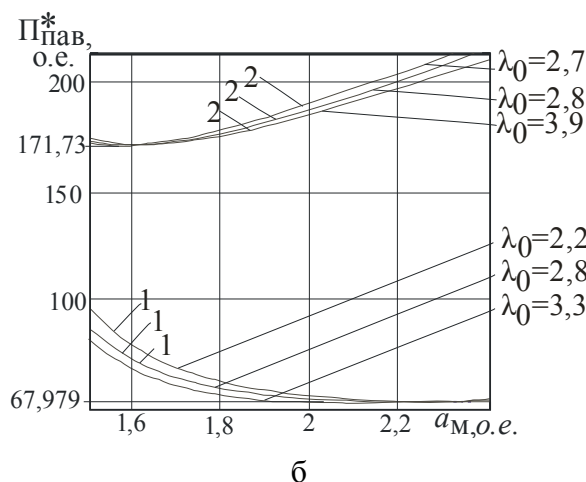


Рис. 4. Зависимости относительного показателя потерь активной мощности от геометрических соотношений вариантов трехфазной планарной электромагнитной системы с круговыми (а) и восьмигранными (б) образующими контурами при значении коэффициента заполнения образующего контура $K_k=0,9$ и двух значениях коэффициента удельных показателей и электро-магнитных нагрузок: 1 – $K_{ymin} = 6,4$; 2 – $K_{ymax} = 28,6$

Вывод

Замена в планарной ЭМС круговых ОК катушек обмоток и 14...32 – пакетных стержней и ярем на восьмигранные ОК катушек обмоток, а также 5...7 – пакетные стержни и ярма, позволяет, в дополнение к снижению трудоемкости производства магнитопроводов и улучшению массостоймых показателей, на 3,4...6,5 % повысить энергетическую эффективность ТТ.

Список использованной литературы

1. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А. В. Иванов-Смоленский, И. П. Копылов, Е. М. Лопухина [и др.] // *Электропанорама*. – 2001. – № 1. – С. 14–15.
2. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
3. Смольская Н. Е. Применение аморфных сплавов в электромашиностроении / Н. Е. Смольская. – М.: ВНИИТИ, 1986. – 36 с.
4. Ставинский А. А. Сравнительный анализ массостоймых показателей планар-

ных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и восьмигранными образующими контурами стержней / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // *Электротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 05(81). – С. 106–112.

5. Ставинский Р. А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / Р. А. Ставинский // *Вісник Кременчуцького державного ун-ту ім. М.Остроградського*. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип. 4/2010 (63). – Ч.2. – С. 91–94.

6. Ставинский А. А. Зависимости потерь трехфазных пространственных трансформаторов с параллельными стенками обмоточных окон от геометрических соотношений активной части / А. А. Ставинский, О. О. Плахтырь, Р. А. Ставинский // *Вісник СУНУ ім. В. Даля*. – Луганськ: СУНУ, 2003. – № 4. – С. 95–100.

7. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: [Учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп.] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Получено 18.06.2012

References

1. Prospects for the development of electromechanics in XXI century / A. V. Ivanov-Smolensky, I. P. Kopylov [and other] // *Electropanorama*. – 2001. – № 1. – P.14–15 [in Russian].
2. Power transformers. Reference book / edited by S. D. Lizunova, A. K. Lohanina. – Moscow: Energoatomizdat, 2004. – 616 p. [in Russian].
3. Smolskaya N. E. The use of amorphous alloys in engineering / N. E. Smolskaya. – Moscow: ALSTI, 1986. – 36 p. [in Russian].
4. Stavinskiy A. A. The comparative analysis of mass-and-price indexes of planar three phase electromagnetic systems with circular and octahedral forming contours of cores / A. A. Stavinskiy, R. A. Stavinsky, A. N. Tsyganov //

Electrotechnic and computer systems. – 2012. – №.05(81). – P.106–112 [in Russian].

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

6. Stavinsky A. A. The dependences of losses of three-phased spatial transformers with parallel sides of winding windows on the geometric correlations of the active part. / A. A. Stavinsky, O. O. Plakhtyr, R. A. Stavinsky // Transactions of EUSU. – Luqansk: EUSU, 2003. – № 4. – C.95–100 [in Russian].

7. Tikhomirov P. M. CalculationP of transformers: [Handbook for the institutes.–5 edition. Processed and added] / P. M. Tikhomirov. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 528 p. [in Russian].



Ставинский
Андрей Андреевич,
д.т.н., проф, зав. каф. судовых электроэнергетических систем Нац. ун-та кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев,
т. (0512) 36-02-27.



Ставинский
Ростислав Андреевич,
к.т.н., доц, зав. каф. энергетики аграрного производства Николаевского гос. аграрного ун-та,
т. (0512)39-93-01,
e-mail: strostand@mail.ru



Цыганов
Александр Николаевич,
ассистент каф. энергетики аграрного производства Николаевского гос. аграрного ун-та,
т. (0512) 48-09-52.