

УДК 621.314.25

О. О. Пальчиков

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**Аннотация.** Определена оптимальная геометрия и выполнен сравнительный анализ на основе обобщенного критерия, полученного как длина вектора отклонения от идеальной точки в пространстве пяти нормированных показателей технического уровня, радиальной и аксиальной с трапециевидными ярмами электромагнитных систем трансформаторов с вращающимся магнитным полем. Сформулированы выражения выбора индукции в зубцах и ярмах аксиальной электромагнитной системы с учетом ее неравномерного распределения, обеспечивающие электромагнитную эквивалентность нагрузке в соответствующих элементах радиальной электромагнитной системы.

**Ключевые слова:** радиальный и аксиальный трансформаторы, цилиндрическая и тороидальная обмотки, метод идеальной точки, обобщенный критерий оптимизации.

О. О. Пальчиков

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ОБЕРТОВИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

**Анотація.** Визначена оптимальна геометрія і виконано порівняльний аналіз на основі узагальненого критерію, отриманого як довжина вектора відхилення від ідеальної точки в просторі п'яти нормованих показників технічного рівня, радіальної та аксіальної з трапецеїдальними ярмами електромагнітних систем трансформаторів з обертовим магнітним полем. Сформульовані вирази вибору індукції в зубцях і ярмах аксіальної електромагнітної системи з урахуванням її нерівномірного розподілу, що забезпечують електромагнітну еквівалентність навантаження у відповідних елементах радіальної електромагнітної системи.

**Ключові слова:** радіальний та аксіальний трансформатори, циліндрична та тороїдальна обмотки, метод ідеальної точки, узагальнений критерій оптимізації.

O. Palchykov

## MULTICRITERIAL OPTIMIZATION OF TRANSFORMERS WITH A ROTATING MAGNETIC FIELD

**Abstract.** The transformer optimal geometrical relations have been determined and the comparative analysis of radial and axial with trapezoidal yokes electromagnetic systems of transformers with a rotating magnetic field has been done on the basis of the generalized criterion, which has been obtained as the vector deviation from the ideal point in the space of five normed technical level indications. Expressions for the choice of an induction in the teeth and the yokes of the axial electromagnetic system taking into account its an uneven distribution, that provides the electromagnetic equivalent load in the corresponding elements of the radial electromagnetic system, has been formulated.

**Keywords:** radial flux and axial flux transformers, cylindrical and toroidal winding, ideal point method, generalized optimization criterion.

**Введение.** За последнюю четверть века резко возрос интерес к многофазным системам передачи электроэнергии и многофазным потребителям, что связано в первую очередь с проблемами улучшения гармонического состава напряжения на выходе полупроводниковых статических преобразователей и электромагнитной совместимости, а также модернизации систем электропередач сверхвысокого напряжения [1 – 3]. Для согласования указанных и традиционных систем необходимо применять согласующие трансформаторы с различной фазностью первичной и вторичной обмоток. Известно два основных способа изменения числа фаз и формирования многофазной

системы электродвижущих сил (ЭДС) во вторичной обмотке: на базе традиционных планарных электромагнитных систем (ЭМС) трансформаторов с пульсирующим магнитным полем, в основном за счет схемных решений и секционирования ЭМС, и на основе вращающегося магнитного поля в статической пространственной ЭМС, построенной на основе радиальных и аксиальных активных частей асинхронных машин с заторможенным ротором и распределенными обмотками [4]. 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].

**Цель работы** – в продолжение [5 – 7], дальнейшее уточнение математических моделей (ММ) определения основных показателей технического уровня ЭМС радиальных и аксиальных с трапециевидными ярами ТВМП с цилиндрической и тороидальной обмотками соответственно, а также на основе решения задачи многокритериальной оптимизации методом идеальной точки выполнение сравнительного анализа указанных ЭМС ТВМП.

**Основные соотношения математической модели радиального трансформатора.** ММ относительных показателей технического уровня радиальных ТВМП (ТВМПР) содержит две управляемые переменные (УП) [5, 6]: характерная для радиальных ЭМС относительная длина магнитопровода  $\lambda_{\delta P}$  и безразмерный диаметр расточки под внутреннее ярмо  $a_{MP}$ ,

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

где  $l_{\delta P}$  и  $D_P$  – длина магнитопровода и наружный диаметр внутреннего яра ТВМПР.

Суммарная площадь пазов, занятая первичной и вторичной обмоткой в поперечном слое магнитопровода [5, 6]:

$$S_{1\Delta P} = z_1 N_{п1} S_{эф1} / K_{зп1} = \sqrt{\Pi_{ИД}} / \left( K_{зп1} \lambda_{\delta P} \sqrt{a_{MP}} \right);$$

$$S_{2\Delta P} = z_2 N_{п2} S_{эф2} / K_{зп2} = K_{тр} \sqrt{\Pi_{ИД}} / \left( K_{зп2} \lambda_{\delta P} \sqrt{a_{MP}} \right),$$

где  $z_{1(2)}$  – число пазов, занятых первичной (вторичной) обмоткой ТВМП;  $N_{п1(2)}$  и  $S_{эф1(2)}$  – число и площадь элементарного проводника первичной (вторичной) обмотки;  $K_{зп1}$  – коэффициент заполнения пазов медью первичной обмотки;  $K_{зп2}$  – коэффициент заполнения пазов медью вторичной обмоткой, пропорциональный  $K'_{зп2}$  и  $K_{зпп}$  (коэффициент  $K'_{зп2}$  аналогичный  $K_{зп1}$ , коэффициент  $K_{зпп}$  учитывает фазную зону и число фаз),  $K_{зп2} = K'_{зп2} K_{зпп}$ .

Показатель исходных данных  $\Pi_{ИД}$  и коэффициент изменения показателя исходных данных при переходе от первичной к вторичной обмотке  $K_{тр}$ :

$$\Pi_{ИД} = K_{E1} P_H / (2,22 K_{p1} K_{y1} J_1 f_1 B_{\delta c} \eta \cos \varphi);$$

$$K_{тр} = \frac{J_1 K_{p1} K_{y1} \eta \cos \varphi K_{E2}}{J_2 K_{p2} K_{y2} \cos \varphi_{нт} K_{E1}} = 0,5 \dots 1,5,$$

где  $K_{E1(2)}$  – соотношение ЭДС фазы первичной (вторичной) обмотки и его фазного напряжения;  $J_{1(2)}$  – плотность тока первичной (вторичной) обмотки ТВМП;  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  и  $\cos \varphi_{нт}$  – коэффициент полезного действия, энергетический коэффициент трансформатора и энергетический коэффициент нагрузки;  $K_{p1(2)}$ ,  $K_{y1(2)}$  – коэффициенты распределения и укорочения первичной (вторичной) обмотки ТВМП;  $B_{\delta c}$  – значение индукции в стыке между зубцами магнитопровода и наружным диаметром внутреннего яра на диаметре  $D_P$ .

Высота паза ТВМПР  $h_{zP}$  [5, 6]

$$h_{zP} = \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MP}} f_{hP}.$$

Безразмерный функциональный сомножитель упрощения записи  $f_{hP}$

$$f_{hP} = 0,5 \alpha_1 + \sqrt{0,25 \alpha_1^2 + \frac{(1 + K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2})}{\pi K_{зп1} \lambda_{\delta P} a_{MP}}},$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент зубца, пропорциональный коэффициенту заполнения электротехнической сталью (ЭТС) магнитопровода ТВМП  $K_{зс}$  и коэффициенту  $K_{Bz}$  соотношения амплитуды индукции в зубце  $B_z$  и  $B_{\delta c}$ ,

$$\alpha_1 = 1 / (K_{зс} K_{Bz}) - 1.$$

Высота ярем магнитопровода ТВМПР [5, 6]

$$h_{a1(2)P} = D_P / (2 K_{зс} K_{Ba}) = \alpha_2 \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MP}},$$

где  $K_{Ba}$  – коэффициент соотношения амплитуд индукции в яре  $B_a$  и  $B_{\delta c}$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент яра,  $\alpha_2 = 1 / (2 K_{зс} K_{Ba})$ .

Средняя ширина катушки первичной (вторичной) обмотки ЭМС ТВМПР

$$b_{cp1(2)P} = \beta_{1(2)} \pi (D_P + h_{zP} K_{h1(2)}) / 2,$$

где  $\beta_{1(2)}$  – относительный шаг первичной (вторичной) обмотки;  $K_{h1(2)}$  – коэффициент соотношения высоты первичной (вторичной) обмотки ТВМПР к полной высоте паза:

$$K_{h1} = \frac{1 + 2 K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}}{1 + K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}}; \quad K_{h2} = \frac{K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}}{1 + K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}}.$$

Вылет лобового участка первичной (вторичной) обмотки

$$l_{B1(2)P} = 2 b_{пм1(2)} q_{1(2)} / z_{1(2)} =$$

$$= 0,7 \pi \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MP}} (f_{hP} K_{h1(2)} - \alpha_1) / m_{1(2)},$$

где  $b_{пм1(2)}$  – суммарная средняя ширина меди первичной (вторичной) обмотки в пазах;  $q_{1(2)}$  и  $m_{1(2)}$  – параметры первичной (вторичной)

обмотки, соответственно число пазов на полюс и фазу и число фаз.

Средняя длина витка первичной (вторичной) обмотки ТВМПР

$$l_{w1(2)P} = 2[l_{\delta P} + 2l_{B1(2)P} + b_{cp1(2)P}] =$$

$$= 2 \left[ \lambda_{\delta P} + 0,5\pi\beta_{1(2)} \left( 1 + \frac{2,8(f_{hP}K_{h1(2)} - \alpha_1)}{\beta_{1(2)}m_{1(2)}(1 + f_{hP}K_{h1(2)})} \right) \times \right.$$

$$\left. \times (1 + f_{hP}K_{h1(2)}) \right]$$

**Основные соотношения математической модели аксиального трансформатора.** Разработка ММ и определение безразмерных относительных показателей технического уровня аксиальных ТВМП (ТВМПА) выполняются с использованием двух УП [6, 7]: соотношения наружного  $D_{HA}$  и внутреннего  $D_{BA}$  диаметров магнитопровода  $\xi_A$  [8, 9] и безразмерного среднего диаметра  $a_{MA}$  активной поверхности ТВМПА,

$$\xi_A = D_{HA} / D_{CA}; \quad a_{MA} = D_{CA}^4 / \Pi_{ИД},$$

где  $D_{CA}$  – средний диаметр активной поверхности магнитопровода

$$D_{CA} = (D_{HA} + D_{BA}) / 2 = D_{HA} (1 + 1/\xi_A) / 2.$$

Поток главного магнитного поля в рабочем стыке ТВМПА определяется

$$\Phi_{\delta} = \frac{2}{\pi} B_{\delta H} (1 - K_B) \int_0^{\pi/p} \int_{D_{BA}}^{D_{HA}} \frac{D}{2} d \frac{D}{2} d\varphi =$$

$$= B_{\delta c} \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A),$$

где  $B_{\delta H}$  – амплитуда индукции в рабочем стыке на диаметре  $D_{HA}$ ;  $B_{\delta c}$  – усредненная по радиусу индукция в рабочем стыке,  $B_{\delta c} = B_{\delta H} (1 - K_B)$ ;  $K_B$  – усредненный коэффициент распределения индукции в стыковом зазоре, полученный на основе [10],

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

С учетом (1) суммарная площадь пазов первичной и вторичной обмоток в плоскости ортогональной активной поверхности магнитопровода ТВМПА [6, 7]:

$$S_{1\Sigma A} = \sqrt{\Pi_{ИД}} / (K_{зп1} \sqrt{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A)),$$

$$S_{2\Sigma A} = K_{тр} \sqrt{\Pi_{ИД}} / (K_{зп2} \sqrt{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A)).$$

Суммарная ширина пазов магнитопровода [6, 7]

$$b_{\Sigma A} = 4 \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt{a_{MA}} 2\pi(1 - \alpha_n) / (1 + 1/\xi_A).$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент зубца обратно пропорциональный соотношению амплитуд индукции  $B_{\delta H}$  и индукции в зубце  $B_{зH}$  на диаметре  $D_{HA}$   $K_{BзH}$ ,  $\alpha_n = 1/(K_{зс}K_{BзH})$ .

Коэффициент  $K_{BзH}$  определяется на основе выражения, обеспечивающего не превышение индукции  $B_{зB}$  на диаметре  $D_{BA}$  выше допустимого [6, 7],

$$K_{BзH} = \left[ K_{зс} \left( 1 - \left( 1 - \frac{B_{\delta H} (1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15})}{B_{зB} K_{зс}} \right) \xi_A^{-1} \right) \right]^{-1}.$$

Эквивалентность нагрузок в зубцах ТВМПА и ТВМПР обеспечивает тождество

$$\frac{1}{(\xi_A - 1)} \int_1^{\xi_A} \frac{[1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}]}{K_{зс} (1 - \xi_A (1 - \alpha_n))} d\xi_A =$$

$$= K_{Bз} (1 - K_B).$$

Высота паза ТВМПА [6, 7]

$$h_{зA} = \frac{(1 + K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}) \sqrt[4]{\Pi_{ИД}}}{\left( \sqrt[4]{a_{MA}} \right)^3 K_{зп1} (1 - 1/\xi_A) 2\pi(1 - \alpha_n) / (1 + 1/\xi_A)^2}.$$

Средняя высота трапецеидального яра магнитопровода ТВМПА [6, 7, 9]

$$h_{a1(2)A} = (h_{aH1(2)A} + h_{aB1(2)A}) / 2 = 4 \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MA}} \times$$

$$\times \alpha_3 \left[ 1 + (1/\xi_A) (1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}) \right] / (1 + 1/\xi_A),$$

где  $h_{aH1(2)A}$  и  $h_{aB1(2)A}$  – соответственно высота яра на диаметрах  $D_{HA}$  и  $D_{BA}$ ;  $\alpha_3$  – коэффициент яра ТВМПА,

$$\alpha_3 = 1 / (2K_{зс} K_{Ba} (1 - K_B)).$$

Длина активной поверхности магнитопровода

$$l_{\delta A} = 4 \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A).$$

Длина лобовой части тороидальной первичной (вторичной) обмотки ТВМПА

$$l_{л1(2)A} = \left[ \left( (q_{1(2)} - 1) / q_{1(2)} \right) \alpha_3 (1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}) / \xi_A + \right.$$

$$\left. \sqrt{\left( \frac{1 - (1/\xi_A)}{2} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_3 (\xi_A - 1 + 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15})}{\xi_A} \right)^2} + \right.$$

$$\left. + (1/\xi_A q_{1(2)}) + (1 - (1/\xi_A)) / (2q_{1(2)}) + \right.$$

$$\left. + \sqrt{(\alpha_3)^2 + \left( \pi / (2q_{1(2)} m_{1(2)}) \right)^2} + (2q_{1(2)} - 1) \sqrt{2} / q_{1(2)} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{(1 + (1/\xi_A))^3 \Theta_{1(2)}}{a_{MA} (1 - (1/\xi_A)) 4K_{зп1} \pi(1 - \alpha_n)} \right] \frac{2 \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MA}}}{1 + 1/\xi_A} =$$

$$= 4 \sqrt{\Pi_{ИД}} \sqrt[4]{a_{MA}} l_{л1(2)A}^*,$$

где  $l_{л1(2)A}^*$  – множитель упрощения записи;  $\Theta_{1(2)}$  – коэффициенты,

$$\Theta_1 = 1; \quad \Theta_2 = K_{тр} K_{зп1} / K_{зп2}.$$

Средняя длина первичной (вторичной) обмотки ТВМПА

$$l_{w1(2)A} = 2(l_{\delta A} + l_{л1(2)A}).$$

**Показатели технического уровня.**  
 Масса меди первичной (вторичной) обмоток ТВМПР (ТВМПА)

$$m_{w1(2)P(A)} = \rho_m l_{w1(2)P(A)} S_{1(2)\Sigma P(A)} K_{\Sigma 1(2)} / 2 =$$

$$= \rho_m \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{w1(2)P(A)}^*$$

где  $\Pi_{w1P(A)}^*$  и  $\Pi_{w2P(A)}^*$  – соответственно показатели массы (объема) активного материала первичной и вторичной обмоток:

$$\Pi_{w1P}^* = \left( 1 / \sqrt[4]{a_{MP}} \right) \left[ 1 + (0,5\pi\beta_1 / \lambda_{\delta P}) \times \right.$$

$$\times \left. \left( 1 + \frac{2,8(f_{hP} K_{h1} - \alpha_1)}{\beta_1 m_1 (1 + f_{hP} K_{h1})} \right) \times (1 + f_{hP} K_{h1}) \right];$$

$$\Pi_{w2P}^* = \left( K_{TP} / \sqrt[4]{a_{MP}} \right) \left[ 1 + (0,5\pi\beta_2 / \lambda_{\delta P}) \times \right.$$

$$\times \left. \left( 1 + \frac{2,8(f_{hP} K_{h2} - \alpha_1)}{\beta_2 m_2 (1 + f_{hP} K_{h2})} \right) (1 + f_{hP} K_{h2}) \right].$$

$$\Pi_{w1A}^* = \frac{1 + 1/\xi_A}{\sqrt[4]{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A)} \left( \frac{1 - 1/\xi_A}{1 + 1/\xi_A} + L_{л1A}^* \right);$$

$$\Pi_{w2A}^* = \frac{K_{TP} (1 + 1/\xi_A)}{\sqrt[4]{a_{MA}} (1 - 1/\xi_A)} \left( \frac{1 - 1/\xi_A}{1 + 1/\xi_A} + L_{л1A}^* \right).$$

Масса изоляционных материалов ТВМПР (ТВМПА) при допущении равенства суммарного сечения медных проводников обмоток и их изоляции и незначительности массы изоляции лобовых частей обмоток

$$m_{wиP(A)} = \rho_{и} l_{\delta P(A)} (S_{1\Sigma P(A)} K_{\Sigma 1} + S_{2\Sigma P(A)} K_{\Sigma 2}) =$$

$$= \rho_{и} \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{wиP(A)}^*$$

где  $\Pi_{wиP(A)}^*$  – показатель массы (объема) изоляционных материалов обмоток,

$$\Pi_{wиP(A)}^* = (1 + K_{TP}) / \left( \sqrt[4]{a_{MP(A)}} \right)$$

Масса магнитопровода ТВМП

$$m_{MMP(A)} = \rho_c K_{3c} l_{\delta P(A)} S_{MP(A)} = \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{MMP(A)}^*$$

где  $\Pi_{MMP(A)}^*$  – показатель массы (объема) магнитопровода ТВМПР (ТВМПА),

$$\Pi_{MMP}^* = \pi \lambda_{\delta P} \left( \sqrt[4]{a_{MP}} \right)^3 \left[ 2\alpha_2 + f_{hP} (1 + f_{hP} + 2\alpha_2) - \right.$$

$$\left. - (1 + K_{\Sigma 1} K_{TP} / K_{\Sigma 2}) / (\pi K_{\Sigma 1} \lambda_{\delta P} a_{MP}) \right];$$

$$\Pi_{MMA}^* = \left( \sqrt[4]{a_{MA}} \right)^3 K_{3c} \left( \frac{1 + K_{TP} K_{\Sigma 1} / K_{\Sigma 2}}{K_{\Sigma 1} 2a_{MA} (1 - \alpha_n)} \left( (1 + 1/\xi_A) - 2(1 - \alpha_n) \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{2\pi \alpha_3 (1 - 1/\xi_A)}{(1 + 1/\xi_A)^2} \left( 1 + (1/\xi_A) (1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}) \right) \right).$$

Масса и стоимость (зависящая от удельных цен меди  $C_m$ , изоляции  $C_{и}$  и ЭТС  $C_c$ ) ЭМС ТВМПР (ТВМПА):

$$M_{AP(A)} = m_{w1P(A)} + m_{w2P(A)} + m_{wиP(A)} +$$

$$+ m_{MMP(A)} = \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{MP(A)}^*;$$

$$C_{AP(A)} = C_m (m_{w1P(A)} + m_{w2P(A)}) + C_{и} m_{wиP(A)} +$$

$$+ C_c m_{MMP(A)} = C_c \rho_c \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \Pi_{CP(A)}^*,$$

где  $\Pi_{MP(A)}^*$  и  $\Pi_{CP(A)}^*$  – показатель массы и стоимости ЭМС ТВМПР (ТВМПА),

$$\Pi_{MP(A)}^* = (\rho_m / \rho_c) (\Pi_{w1P(A)}^* + \Pi_{w2P(A)}^*) +$$

$$+ (\rho_{и} / \rho_c) \Pi_{wиP(A)}^* + \Pi_{MMP(A)}^*;$$

$$\Pi_{CP(A)}^* = (C_m \rho_m / (C_c \rho_c)) (\Pi_{w1P(A)}^* + \Pi_{w2P(A)}^*) +$$

$$+ (C_{и} \rho_{и} / (C_c \rho_c)) \Pi_{wиP(A)}^* + \Pi_{MMP(A)}^*.$$

Реактивные потери рассеяния ЭМС ТВМПР (ТВМПА)

$$Q_{PAP(A)} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^5 0,79 \cdot 10^{-5} f_1 J_1^2 \Pi_{PPR(A)}^*.$$

Показатель реактивных потерь рассеяния  $\Pi_{PPR(A)}^*$ :

$$\Pi_{PPR}^* = \left( \lambda_{рп1P} + \lambda_{рл1P} \right) + K_{TP}^2 J_2^2 (\lambda_{рп2P} + \lambda_{рл2P}) / J_1^2 \div$$

$$\div \left( \lambda_{\delta P} \left( \sqrt[4]{a_{MP}} \right)^3 \right);$$

$$\Pi_{PPA}^* = \left( \lambda_{рп1A} + \lambda_{рл1A} \right) + K_{TP}^2 J_2^2 (\lambda_{рп1A} + \lambda_{рл1A}) / J_1^2 \div$$

$$\div \left( \left( \sqrt[4]{a_{MA}} \right)^3 (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A) \right),$$

где  $\lambda_{рп1(2)P(A)}$  и  $\lambda_{рл1(2)P}$  – коэффициенты проводимости рассеяния паза ТВМПР (ТВМПА) и лобового участка первичной (вторичной) обмотки ТВМПР, определяемые по стандартной методике [11] и отнесенные к  $Z_{1(2)}$ ;  $\lambda_{рл1(2)A}$  – коэффициент проводимости лобового участка тороидальной обмотки ТВМПА,

$$\lambda_{рл1(2)A} = \left( 1 / (2\pi z_{1(2)}) \right) \left( l_{л1(2)A} / l_{\delta A} \right)$$

Реактивные потери магнитной цепи ЭМС ТВМПР (ТВМПА)

$$Q_{HAP(A)} = \left( \sqrt[4]{\Pi_{ИД}} \right)^3 \pi^2 25,7 B_{\delta c}^2 f_1 \Pi_{ПНР(A)}^*$$

где  $\Pi_{ПНР(A)}^*$  – показатель реактивных потерь холостого хода ТВМПР (ТВМПА),

$$\Pi_{ПНР}^* = K_{ст} (K_{Hc} f_{HP} + (\pi/2) K_{Ha} (1 + f_{HP})) \lambda_{\delta P} \left( \sqrt[4]{a_{MP}} \right)^3 / 25,7; \quad (6)$$

$$\Pi_{ПНА}^* = \frac{\left( \sqrt[4]{a_{MA}} \right)^3 K_{ст} 4}{25,7 (1 + 1/\xi_A)^3} \int_{\xi_A}^1 \frac{1}{\xi_A} (1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}) \times$$

$$\times \left( f_{Hc} \frac{100}{B_{\delta c}} \left( \exp \left( 0,59 B_{\delta c}^{2,5} \left( \frac{1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}}{K_{3c} (1 - K_B) [1 - \xi_A (1 - \alpha_n)]} \right)^{2,5} \right) + \right.$$

$$\left. + 2 \right) + K_{Ha} \pi / (2\xi_A (1 - K_B)) \right) d(1/\xi_A); \quad (7)$$

$$f_{Hz} = \frac{(1 + (1/\xi_A))^3 (\Theta_1 + \Theta_2)}{a_{MA} (1 - (1/\xi_A)) 4K_{3п1} \pi (1 - \alpha_H) (1 - K_B)},$$

где  $K_{ст}$  – коэффициент увеличения намагничивающей силы при наличии стыков в магнитопроводе;  $K_{Hz}$  и  $K_{Ha}$  – аппроксимации кривой намагничивания зубцов и ярем [11]:

$$K_{Hz} = \frac{100(e^{0,59B_z^{2,5}} + 2)}{B_{\delta c}}; K_{Ha} = \frac{25,7e^{1,95B_a}}{B_{\delta c}}.$$

Активные потери первичной (вторичной) обмотки ТВМПР (ТВМПА)

$$P_{эл1(2)P(A)} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 (J_{1(2)}^2 / \sigma_{m20}) \Pi_{w1(2)P(A)}^*,$$

где  $\Pi_{w1(2)P(A)}^*$  – показатель потерь, совпадающий с показателем массы (объема) первичной (вторичной) обмотки ТВМП.

Магнитные потери магнитопровода ТВМПР (ТВМПА)

$$P_{пMP(A)} = P_c (K_{дз} B_z^2 m_{zP(A)} + K_{да} B_a^2 m_{aP(A)}) = \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 \rho_c P_c B_{\delta c}^2 (K_{дз} K_{Bz}^2 \Pi_{zP(A)}^* + K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{aP(A)}^*),$$

где  $P_c$  – удельные потери ЭТС при частоте 50 Гц и индукции 1 Тл;  $K_{дз}$  и  $K_{да}$  – коэффициенты увеличения потерь зубцов и яра соответственно [11];  $m_{z(a)P(A)}$  – масса зубцов (ярма) ТВМП;  $\Pi_{zP(A)}^*$  и  $\Pi_{aP(A)}^*$  – соответственно показатели магнитных потерь зубцов и ярем магнитопровода ТВМП:

$$\begin{aligned} \Pi_{zP}^* &= \left(\sqrt[4]{a_{MP}}\right)^3 K_{зс} [\pi \lambda_{\delta P} f_{HP} (1 + f_{HP}) - \\ &- (1 + K_{тP} K_{3п1} / K_{3п2}) / (K_{3п1} a_{MP})]; \\ \Pi_{aP}^* &= \left(\sqrt[4]{a_{MP}}\right)^3 K_{зс} \pi \lambda_{\delta P} 2\alpha_2 (1 + f_{HP}); \\ \Pi_{zA}^* &= \frac{2f_{пzA} K_{зс}}{\sqrt[4]{a_{MA}}} \frac{1 + K_{тP} K_{3п1} / K_{3п2}}{K_{3п1} (1 - 1/\xi_A) \pi (1 - \alpha_H)}, \end{aligned}$$

где  $f_{пzA}$  – коэффициент распределения магнитной индукции в зубцах по радиусу магнитопровода,

$$\begin{aligned} f_{пzA} &= \frac{1}{K_{Bz}^2 (1 - K_B)^2} \int_{\xi_A}^1 \int_0^{2\pi} \left( \frac{1}{4\xi_A} - \frac{(1 - \alpha_H)}{4} \right) \times \\ &\times \left( \frac{1 - 0,167(\xi_A - 1)^{1,36} \xi_A^{0,15}}{K_{зс} (1 - \xi_A (1 - \alpha_H))} \right)^2 d(1/\xi_A) d\varphi; \\ \Pi_{aA}^* &= \left(\sqrt[4]{a_{MA}}\right)^3 K_{зс} \left( (1 - 1/\xi_A) / (1 + 1/\xi_A) \right)^2 \times \\ &\times \left( 2\pi \alpha_3 [1 + (1/\xi_A) (1 - 0,167(1 - 1/\xi_A)^{1,36} \xi_A^{0,15})] \right) \end{aligned}$$

Суммарные потери ЭМС ТВМПР (ТВМПА)

$$\begin{aligned} P_{AP(A)} &= (P_{эл1P(A)} + P_{эл2P(A)} + P_{тMP(A)}) K_{DM} = \\ &= \left(\sqrt[4]{\Pi_{ИД}}\right)^3 K_{DM} (J_1^2 / \sigma_{m20}) \Pi_{ПAP(A)}^*, \end{aligned}$$

где  $K_{DM}$  – коэффициент учета повышения основных потерь ЭМС до суммарных потерь ТВМП;  $\Pi_{ПAP(A)}^*$  – показатель основных потерь ЭМС ТВМПР (ТВМПА),

$$\begin{aligned} \Pi_{ПAP(A)}^* &= (P_c B_{\delta c}^2 \rho_c \sigma_{m20} / J_1^2) (K_{дз} K_{Bz}^2 \Pi_{zP(A)}^* + \\ &+ K_{да} K_{Ba}^2 \Pi_{aP(A)}^*) + \Pi_{w1P(A)}^* + (J_2^2 / J_1^2) \Pi_{w2P(A)}^*. \end{aligned} \quad (8)$$

**Результаты оптимизации трансформаторов.** Решение задачи оптимизации ТВМП предлагается искать как скалярную свертку частных критериев методом идеальной точки [12] с дальнейшей оптимизацией на минимум. Для этого формируется обобщенный критерий как длина вектора  $R_{pP(A)}$  в  $n$ -мерном пространстве критериев, характеризующего отклонения показателей технического уровня ТВМП от оптимальных

$$R_{pP(A)} = \sqrt{\sum_{n=1}^k [\beta_{nP(A)} \Pi_{noP(A)}^* (a_{MP(A)}, \lambda_{\delta P} (\xi_A))]^2}, \quad (9)$$

где  $\beta_{nP(A)}$  – весовой коэффициент, обеспечивающий приведение показателей ЭМС, изменяющихся в широких пределах, к среднему уровню отклонений показателей ЭМС, а также отражающий значимость соответствующего показателя;  $\Pi_{noP(A)}^*$  – отклонение соответствующего показателя относительно экстремального  $\Pi_{nэP(A)}^*$ , полученного как результат решения задач одномерной оптимизации (2 – 8) в области изменения УП  $a_{MP(A)}$  и  $\lambda_{\delta P} (\xi_A)$ , достижимых при настоящем уровне изготовления ТВМП,

$$\Pi_{noP(A)}^* = \frac{\Pi_{nP(A)} - \Pi_{nэP(A)}}{\Pi_{nэP(A)}}.$$

Результаты оптимизации ТВМПР и ТВМПА по обобщенному критерию (9) при  $K_{Ba} = 2$ ;  $K_{Bz} = 2,5$ ;  $K_{3п1(2)} = 0,3$ ;  $K_{зс} = 0,97$ ;  $K_{ст} = 1,3$ ; марки ЭТС 2013, рыночных стоимостей материалов активной части и значений нагрузок  $J_{1(2)} = 5,5 \text{ А/мм}^2$ ;  $B_{\delta c} = 0,7 \text{ Тл}$  приведены в таблице 1. Весовые коэффициенты выражения (9) принимались  $\beta_{MP} = \beta_{CP} = \beta_{ПAP}$

$= 1; \beta_{ПРР} = \beta_{ПНР} = 0,05; \beta_{МА} = 1,3; \beta_{СА} = \beta_{ПАА} = 3; \beta_{ПРА} = \beta_{ПНА} = 0,33.$

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

K <sub>гр</sub>	$\lambda_{\text{вР}}$ , б.е.	$a_{\text{МР}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{МР}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{СР}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПАР}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПНР}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПРР}}$ , б.е.	$\xi_{\text{А}}$ , б.е.	$a_{\text{МА}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{МА}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{СА}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПАА}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПНА}}$ , б.е.	$\Pi^*_{\text{ПРА}}$ , б.е.
	Радиальный трансформатор							Аксиальный трансформатор						
0,5	4,3	0,8	14,115	37,932	4,324	387,24	0,038	1,9	49,0	14,572	36,461	4,390	452,85	0,014
1,0	4,2	1,0	17,134	47,715	5,444	463,50	0,048	1,9	63,0	17,791	44,931	5,410	554,76	0,017
1,5	4,2	1,2	20,091	56,768	6,477	540,43	0,066	1,9	81,0	21,263	53,171	6,400	662,33	0,024

**Выводы.** 1. Оптимизированная ЭМС ТВМПА отличается улучшенными показателями стоимости и реактивных потерь рассеяния соответственно на 3,9...6,3 %, 63,2...64,6 % и ухудшенными показателями массы и реактивных потерь холостого хода соответственно на 3,2...5,8 % и 16,9...22,6 %, а показатели потерь активной мощности находятся в пределах  $-1,5...+1,3$  % относительно электромагнитно-эквивалентной ЭМС ТВМПР. Следовательно, рекомендуется применение ТВМПА в электротехнических системах и комплексах с высокими требованиями к качеству электроэнергии.

2. Вследствие повышенных суммарных реактивных потерь и сопротивления короткого замыкания в качестве сварочного трансформатора целесообразно использовать ТВМПР.

### Список использованной литературы

1. Kahel M.E. Transformateurs de conversion cinq et sept phases [Текст] / М.Е. Kahel, G. Oliver, C. Guimaraes and oth. // *Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference sep.* 5 – 8, Montreal, QC, Canada. – 1995. – P. 708 – 711.
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. 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.
4. Фишлер Я.Л. Преобразовательные трансформаторы [Текст] / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
5. Пальчиков О.О. Показатели массы и стоимости трансформаторов с вращающимся

магнитным полем для преобразования числа фаз [Текст] / О. О. Пальчиков // *Зб. наук. праць НУК.* – Миколаїв: НУК, 2014. – № 5 (455). – С. 67 – 72.

6. Пальчиков О.О. Сравнение электромагнитных систем трансформаторов с вращающимся магнитным полем для преобразования числа фаз [Текст] / О.О. Пальчиков // *Електротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2015. – № 19 (95). – С. 111 – 114.

7. Пальчиков О.О. Математична модель аксіальної електромагнітної системи трансформаторів з обертовим магнітним полем [Текст] / О.О. Пальчиков // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах.* Наука, освіта, практика. – Кременчук: КрНУ. – 2015. – Вип. 1/2015(3). – С. 252 – 255.

8. 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.

9. Игнатов В.А. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления [Текст] / В.А. Игнатов, К.Я. Вильданов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.

10. 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.

11. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. Учеб. пособ. [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

12. Пентегов И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов [Текст] / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // *Электричество.* – 2006. – № 3. – С. 35 – 48.

Получено

30.04.2016

### References

1. Kahel M.E., Oliver G., Guimaraes C. and oth. Transformateurs 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).
2. Singaevskii N. A., Gaitov B.Kh. and Zhukov F.I. Uluchshenie urovnya EMS v SAE pri ispol'zovanii transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem [Improving the Level of EMC in SAE by Using Transformers with the Rotating Magnetic Field], (1997), *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, Novocherkassk, Russian Federation, no. 6, pp. 32 – 37. (In Russian).
3. 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), Arkhangelsk, Russian Federation, *ASTU Publ.*, 185 p. (In Russian).
4. Fishler Ya.L. and Urmanov R.N. Preobrazovatel'nye transformatory [Converter transformers], (1974), Moscow, USSR, *Energiya Publ.*, 224 p. (In Russian).
5. 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).
6. Palchykov O.O. Sravnenie elektromagnitnykh sistem transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem dlya preobrazovaniya chisla faz [Comparison of electromagnetic systems of transformers with the rotating magnetic field for converting a number of phases], (2015), *Electrotechnic and computer systems*, Odesa, Ukraine, no. 19 (95), pp. 111 – 114. (In Russian).
7. Palchykov O.O. Matematychna model' aksial'noi' elektromagnitnoi' systemy transformatoriv z obertovym magnitnym polem [Mathematical model of the axial electromagnetic system of transformers with the rotating magnetic field], (2015), *Problemy energoresursozberezhennja v elektrotehnichnyh systemah. Nauka, osvita, praktyka Publ.*, Kremenchuk: KrNU, Ukraine, no. 1/2015(3), pp. 252 – 255 (In Ukrainian).
8. 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*, Moscow, Russian Federation, no. 6, pp. 28 – 34. (In Russian).
9. Ignatov V.A. and Vil'danov K.Ya. Tortsevye asinkhronnye elektrodvigateli integral'nogo izgotovleniya [Axial field induction integrated manufacturing motors], (1988), Moscow, USSR, *Energoatomizdat Publ.*, 304 p. (In Russian).
10. 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*, Moscow, Russian Federation, no. 8, pp. 27 – 30. (In Russian).
11. Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. Ucheb. posob. [Designing of electrical machines. Textbook], (1980), Moscow, USSR, *Energiya Publ.*, 496 p. (In Russian).
12. Pentegov I.V. and Rymar S.V. Optimizacija matematicheskikh modelej transformatorov i reaktorov [Optimization of mathematical models of transformers and reactors], (2006), *Electrical Technology*, Moscow, Russian Federation, no. 3, pp. 35 – 48. (In Russian).



Пальчиков Олег Олегович, аспирант Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, (54025, г. Николаев, Украина, пр. Героев Сталинграда, 9). Тел. дом. (0512) 55 96 89. E-mail: ole2013hulk@yandex.ua