

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАНАРНОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АКСИАЛЬНОЙ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ СТЕРЖНЕЙ И ОБМОТОЧНЫХ ОКОН (ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ)

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критерієм мінімуму утрат активної потужності трансформатора та виконано порівняльний аналіз енергетичної ефективності планарної і просторової аксіальної трифазних електромагнітних систем з паралельними твірними поверхнями стрижнів і обмоткових вікон.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критерию минимума потерь активной мощности трансформатора и выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон.

Основой конструктивных схем большинства трехфазных индукционных статических устройств малой мощности, а также части трансформаторов I и II габаритов являются "традиционные" планарные структуры электромагнитных систем (ЭМС) с параллельными образующими поверхностями (ОП) стержней и обмоточных окон. Такие структуры, как и структуры более мощных ЭМС с цилиндрическими ОП, практически достигли предела развития [1].

Коэффициент полезного действия (КПД) индукционных преобразователей энергии малой мощности значительно ниже, а в диапазоне мощности до 60-250 кВ·А ниже, чем при больших мощностях [2, 3]. Поэтому потери электроэнергии в распределительных сетях Украины составляют до 20% мощности отпущенной генерирующими станциями и значительную долю этой части составляют потери в трансформаторах I – II габаритов классов напряжения 6-35 кВ [4].

Указанные обстоятельства, а также современные требования энергоресурсосбережения при проектировании и организации производства новых индукционных преобразователей, обуславливают необходимость дальнейшего усовершенствования распределительных и специальных трансформаторов различной мощности. Особо важной и актуальной, в соответствии с [4], является задача разработки и освоения производства трансформаторов мощностью до 250 кВ·А с повышенным КПД.

Замена планарной структуры ЭМС на симметричную пространственную аксиальную при использовании технологии изготовления магнитопроводов навивкой и разрезкой рулона электротехнической стали (ЭТС) [5], а также сохранении параллельных и взаимно перпендикулярных ОП, преобразует прямоугольные сечения стержней в секторные [6]. Подобное преобразование позволяет, согласно [7], снизить массу и стоимость ЭМС соответственно на 4-6 % и 5-8 % относительно традиционных аналогов с прямоугольным сечением стержней шихтованного или витого магнитопроводов.

Целью настоящей работы – продолжении [7] является сравнительный анализ энергетической эффективности вариантов трехфазного трансформатора (ТТ) с параллельными и взаимно перпендикулярными ОП ЭМС, отличающихся планарной (рис. 1,а) и пространственной аксиальной (рис. 1,б) структурами.

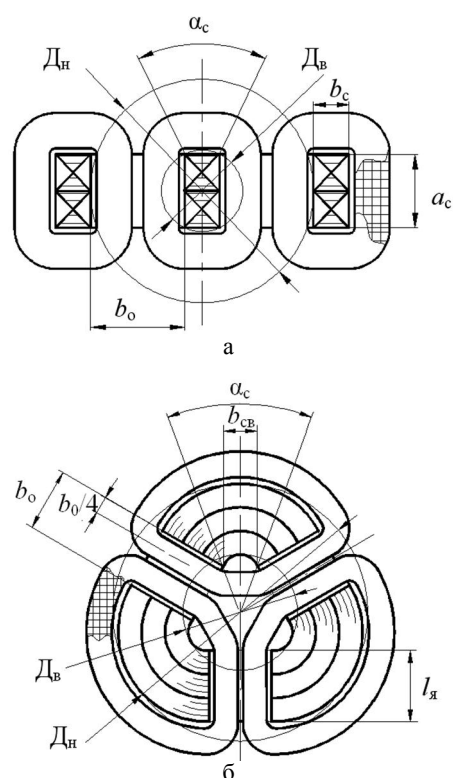


Рис. 1. Поперечные сечения и геометрические параметры планарной (а) и пространственной (б) электромагнитных систем с витыми стыковыми магнитопроводами и плоскими параллельными образующими поверхностями обмоточных окон и стержней

При сравнительном анализе энергетической эффективности ЭМС (рис. 1) принимаются следующие известные допущения [7]. Используется конструкция обмоток с чередующимися фазными катушками и средними витками, расположенными на четверти ширины b_o обмоточного окна. В таких обмотках одинаковы плотности фазных токов ($j_{01}=j_{02}=j_0$) высокого и низкого напряжений. Исходя из принципа электромагнитной эквивалентности при сравнительном анализе, принимаются соответственно идентичными электромагнитные нагрузки (ЭМН) – плотности фазных токов проводников катушек ($j_{0н}=j_{0с}=j_0$) и средние (по сечению) значения амплитуд магнитной индукции в стержнях ($B_{сн}=B_{сс}=B_c$) с прямоугольными (в планар-

ной ЭМС) и секторными (в пространственной ЭМС) образующими контурами. Также соответственно идентичными являются коэффициенты заполнения обмоточного окна ($K_{30п} = K_{30с} = K_{30}$) и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС ($K_{зсп} = K_{зсс} = K_{зс}$). Средние значения амплитуд индукции ярем $B_{яп}$ (рис. 1,а), прямых участков ярем $B_{яс}$ (рис. 1,б) и стержней одинаковы ($B_{яп(с)} = B_c$).

Значение КПД трансформатора определяется суммой потерь холостого хода (ПХХ) и потерь короткого замыкания (ПКЗ) [2,3]. Указанные потери на основе метода относительных коэффициентов целевых функций в виде относительных показателей технического уровня [8] представляются полной целевой функцией потерь активной мощности

$$F_{цп} = (\sqrt[4]{\Pi_{ид}})^3 \Pi_{па}, \quad (1)$$

где $\Pi_{ид}$ – идентичный для сравниваемых ЭМС (рис. 1) показатель исходных данных и ЭМН ТТ. $\Pi_{па}$ – целевая функция относительного показателя потерь активной мощности в виде коэффициента $\Pi_{па}^*$,

$$\Pi_{па} = K_{дх} \gamma_c P_{ум} B_c^2 \Pi_{па}^*,$$

где $K_{дх}$ – коэффициент добавочных ПХХ [3]; γ_c – плотность ЭТС; $P_{ум}$ – удельные потери ЭТС магнитопровода.

Входящий в (1) показатель $\Pi_{па}^*$ является функцией K_{30} (класса напряжения), коэффициента удельных показателей и ЭМН K_y , двух основных относительных и третьей дополнительной (используемой в части ЭМС) геометрических управляемых переменных (УП) a_m , λ_o и α_c

$$\Pi_{па}^* = f(K_{30}, K_y, a_m, \lambda_o, \alpha_c),$$

где a_m – отношение наружного D_n и внутреннего D_b диаметров расчетных окружностей магнитопроводов ЭМС (рис. 1); λ_o – отношение высоты h_o и ширины b_o обмоточного окна; α_c – центральный угол стержня:

$$a_m = D_n / D_b; \quad (2)$$

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

Коэффициент удельных показателей и ЭМН определяется соотношением [9]

$$K_y = \frac{K_{дк} \gamma_o P_{yo} j_o^2}{K_{дх} \gamma_c P_{ум} B_c^2}, \quad (4)$$

где $K_{дк}$ – коэффициент добавочных потерь короткого замыкания [3]; γ_o – плотность активного материала обмотки (АМО); P_{yo} – удельные потери в АМО.

При принятых допущениях ПХХ $P_{хп(с)}$, в соответствии с числом и пространственным положением ярем, а также, вне зависимости от особенностей структуры магнитопровода, ПКЗ $P_{кзп(с)}$ ЭМС с прямоугольными (рис. 1,а) и секторными (рис. 1,б) образующими сечений стержня определяются уравнениями [3, 9]:

$$P_{хп} = K_{дх} K_{зс} \gamma_c P_{ум} B_c^2 \times (V_{сп} + V_{яп} + V_{уп}); \quad (5)$$

$$P_{хс} = K_{дх} K_{зс} \gamma_c P_{ум} B_c^2 \times (V_{сс} + V_{яс} + 0,757 V_{ус}); \quad (6)$$

$$P_{кзп(с)} = 1,5 K_{дк} P_{yo} \gamma_o K_{30} \times j_o^2 \lambda_o l_{вп(с)} b_{оп(с)}^2, \quad (7)$$

где $V_{сп(с)}$, $V_{яп(с)}$ и $V_{уп(с)}$ – соответственно объемы стержней, ярем и угловых участков ярем; $l_{вп(с)}$ и $b_{оп(с)}$ – средняя длина витка катушки чередующейся обмотки и ширина обмоточного окна магнитопровода вариантов ЭМС (рис. 1).

Согласно [7], средняя длина витка и ширина обмоточного окна каждого из рассматриваемых вариантов ЭМС определяются выражениями:

$$l_{вп} = 2D_b \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]; \quad (8)$$

$$l_{вс} = D_b [2,0472(a_m - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}]; \quad (9)$$

$$b_{оп} = D_b [a_m - \sin(\alpha_c/2)]/2; \quad (10)$$

$$b_{ос} = K_{\alpha 2} D_b, \quad (11)$$

где $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ – коэффициенты угла α_c (рис. 1,б):

$$K_{\alpha 1} = \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right];$$

$$\hat{E}_{\alpha 2} = \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) / \left[\cos \frac{\alpha_c}{2} + \sin \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) / \sqrt{3} \right].$$

Объемы стержней, ярем и угловых участков магнитопровода (рис. 1,а) при принятых допущениях определяются соотношениями:

$$V_{сп} = 3h_o S'_{сп}; \quad (12)$$

$$V_{яп} = 4b_o S'_{сп}; \quad (13)$$

$$V_{уп} = 6b_c S'_{сп}, \quad (14)$$

где площадь прямоугольного сечения $S'_{сп}$ и ширина стержня $b_{сп}$ определяются из (4):

$$S'_{сп} = (D_b^2 / 2) \sin \alpha_c; \quad (15)$$

$$b_c = D_b \sin(\alpha_c / 2). \quad (16)$$

После подстановки (3), (10) и (15), (16) соотношения (12) – (14) преобразуется:

$$V_{сп} = \frac{3}{4} \lambda_o D_b^3 [a_m - \sin(\alpha_c / 2)] \sin \alpha_c; \quad (17)$$

$$V_{яп} = D_b^3 [a_m - \sin(\alpha_c / 2)] \sin \alpha_c; \quad (18)$$

$$V_{уп} = 3D_b^3 \sin(\alpha_c / 2) \sin \alpha_c. \quad (19)$$

На основе (17) – (19) уравнение (5) принимает вид

$$P_{хп} = K_{дх} K_{зс} \gamma_c P_{ум} B_c^2 D_b^3 \sin \alpha_c \times \left[3 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) (a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2}) \right]. \quad (20)$$

Уравнение (7) после подстановки геометрических параметров (8) и (10) ЭМС (рис. 1,а) запишется в виде

$$P_{кзп} = \frac{3}{4} K_{дк} K_{30} \gamma_o P_{yo} j_o^2 \lambda_o D_b^3 \times (a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2})^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]. \quad (21)$$

Суммарные потери ТТ с ЭМС (рис. 1,а) определяются на основе (4) и (20), (21) уравнением

$$P_{\Sigma П} = P_{хп} + P_{кзп} = K_{дх} \gamma_c P_{ум} B_c^2 \times D_b^3 \left\{ K_{зс} \sin \alpha_c \left[3 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \frac{3}{4} K_y K_{30} \lambda_o (a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2})^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{\pi}{8} \left(a_m - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right\}, \quad (22)$$

где диаметр внутренней расчетной окружности (рис. 1,а) определяется выражением [7]

$$D_{в} = 4\sqrt{8\Pi_{ид}} \left/ \left[K_{зс} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right] \right. \quad (23)$$

Подстановка (23) преобразует уравнение потерь (22) к виду

$$P_{\Sigma\Pi} = K_{дх} \gamma_c P_{ум} B_c^2 (4\sqrt{\Pi_{ид}}) \Pi_{пап}^*$$

где относительный показатель потерь ТТ с ЭМС (рис. 1,а) определяется выражением

$$\begin{aligned} \Pi_{пап}^* = & \left(4\sqrt{8\Pi_{ид}} \left/ \left[K_{зс} K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \sin \alpha_c \right] \right. \right)^3 \times \\ & \times \left\{ K_{зс} \sin \alpha_c \left[3 \sin \frac{\alpha_c}{2} + \left(1 + \frac{3}{4} \lambda_o \right) \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] + \right. \\ & + \frac{3}{4} K_y K_{30} \lambda_o \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)^2 \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} + \cos \frac{\alpha_c}{2} + \right. \\ & \left. \left. + \frac{\pi}{8} \left(a_M - \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) \right] \right\}. \quad (24) \end{aligned}$$

В ТТ АМО являются электротехнические медь и алюминий, а при производстве магнитопроводов используется холоднокатаная рулонная ЭТС [2, 3, 10]. В связи с ортогональным, по отношению к направлению проката, направлением магнитного потока стержней, в магнитопроводе ЭМС (рис. 1,б) целесообразно использование аморфной или холоднокатаной изотропной ЭТС, например ЭТС 2412 с $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ и $P_{ум} = 1,15 \text{ Вт/кг}$. При разработке "сухих" и "масляных" ТТ различной мощности для рулонной ЭТС толщиной 0,35 мм принимаются значения коэффициентов добавочных потерь и расчетный диапазон индукции $K_{дк} \leq 1,15$, $K_{дх} \leq 1,25$ и $B_c = 1,6-1,7 \text{ Тл}$. При использовании медных обмоточных проводов с $\gamma_o = 8900 \text{ кг/м}^3$ и $P_{yo} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/кг}$, а также частоте сети $f_1 = 50 \text{ Гц}$, в диапазонах номинальной мощности ТТ $S_n = 0,3-1 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ и $S_n = 1-2,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, плотность тока соответствует значениям: $j_o = 2,4-1,7 \text{ А/мм}^2$ и $j_o = 1,7-1,4 \text{ А/мм}^2$ [2]. При аналогичных АМО и частоте, согласно [3], в масляных ТТ при $S_n = 2,5-63 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $j_o = 1,8-2,2 \text{ А/мм}^2$ и при $S_n = 63-630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $j_o = 2,2-3,5 \text{ А/мм}^2$, а в "сухих" ТТ с $S_n = 10-1600 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ полусумма плотностей тока первичной и вторичной концентрических обмоток составляет $j_o = 1,7-2,4 \text{ А/мм}^2$. В указанных диапазонах изменения ЭМН расчетные значения коэффициента (4) составляют:

$$K_y \geq \frac{1,15 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,25 \cdot 7650 \cdot 1,15 \cdot 1,7^2} = 1,515;$$

$$K_y' \leq \frac{1,15 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,25 \cdot 7650 \cdot 1,15 \cdot 1,6^2} = 5,026;$$

$$K_y'' \leq \frac{1,15 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,25 \cdot 7650 \cdot 1,15 \cdot 1,6^2} = 10,689.$$

Принимается минимальное K_{ymin} и максимальное K_{ymax} значения коэффициента удельных показателей и ЭМН

$$1,5 = K_{ymin} \leq K_y \leq K_y^{(v)}_{max} = 5,5(11). \quad (25)$$

Результаты расчета оптимальных значений УП и

показателей энергетической эффективности планарной ЭМС (рис. 1,а) при $K_{зс} = 0,91$, трех значениях K_{30} и значениях K_{ymin} , K_{ymax} и K_{ymax}'' (25) представлены в табл. 1-3. Примеры функциональных зависимостей (24) от a_M показаны на рис. 2. Указанные зависимости получены при экстремальных значениях соответственно $\alpha_{c3} = 51,04^\circ$ и $\alpha_{c3} = 51,67^\circ$ при $K_{30} = 0,3$.

Таблица 1

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности планарной электромагнитной системы при K_{ymin}

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о. е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{пап}^*$ о.е.
	a_{M3} , о.е.	λ_{o3} , о.е.	α_{c3} , град.	
0,3	1,872	2,769	51,04	31,69
0,25	2,006	2,764	50,99	33,35
0,2	2,189	2,756	50,89	35,59

Таблица 2

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности планарной электромагнитной системы при K_{ymax}

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о. е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{пап}^*$ о.е.
	a_{M3} , о.е.	λ_{o3} , о.е.	α_{c3} , град.	
0,3	1,196	2,807	51,67	62,015
0,25	1,269	2,793	51,56	64,307
0,2	1,363	2,796	51,502	67,412

Таблица 3

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности планарной электромагнитной системы при K_{ymax}''

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о. е.	Экстремальные значения управляемых переменных			$\Pi_{пап}^*$ о.е.
	a_{M3} , о.е.	λ_{o3} , о.е.	α_{c3} , град.	
0,3	0,978	2,812	51,903	92,466
0,25	1,029	2,818	51,903	95,192
0,2	1,097	2,815	51,789	98,885

Объемы стержней, ярем и угловых участков магнитопровода (рис. 1,б) при принятых допущениях определяются выражениями [9]

$$V_{cc} = \pi \lambda_o K_{\alpha 2} D_B^3 (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right); \quad (26)$$

$$V_{яс} = 3,627 K_{\alpha 2} D_B^3 (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right); \quad (27)$$

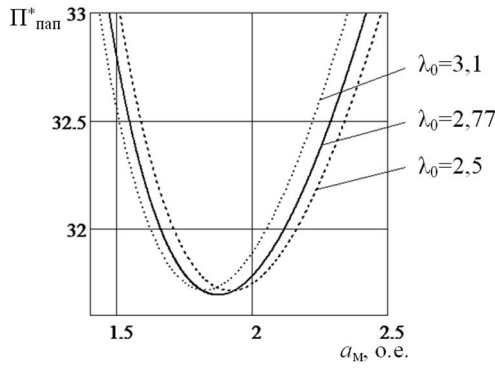
$$V_{yc} = 2,418 \pi D_B^3 (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right)^2. \quad (28)$$

На основе (26) – (28) уравнение (6) преобразуется

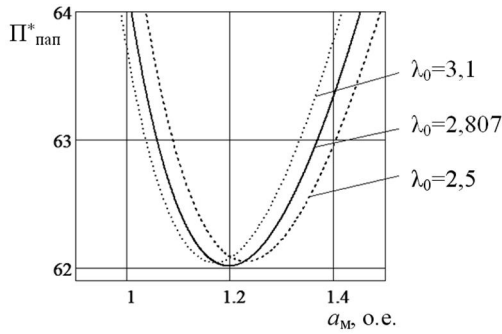
$$\begin{aligned} P_{хс} = & K_{дх} K_{зс} \gamma_c P_{ум} B_c^2 D_B^3 (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \times \\ & \times \pi \left[K_{\alpha 2} (1,1545 + \lambda_o) + 1,83 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \right]. \quad (29) \end{aligned}$$

Уравнение (7) после подстановки геометрических параметров (9) и (11) ЭМС (рис. 1,б) принимает вид

$$\begin{aligned} P_{кзс} = & 1,5 K_{дк} K_{30} \gamma_o P_{yo} j_o^2 K_{\alpha 2}^2 \lambda_o D_B^3 \times \\ & \times [2,0472 (a_M - 1) + 2,2092 K_{\alpha 1} + 1,5708 K_{\alpha 2}]. \quad (30) \end{aligned}$$



а



б

Рис. 2. Зависимости показателя потерь активной мощности от геометрических соотношений трехфазной планарной электромагнитной системы с $K_y = 1,5$ (а) и $K_y = 5,5$ (б)

Суммарные потери ТТ с пространственной ЭМС определяются на основе (4), (29) и (30) уравнением

$$P_{\Sigma c} = P_{\text{ххс}} + P_{\text{кзс}} = K_{\text{дх}} \gamma_c P_{\text{ум}} B_c^2 D_{\text{в}}^3 \left\{ (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \times \right. \\ \times \pi \left[K_{\text{зс}} K_{\alpha 2} (1,1545 + \lambda_0) + 1,83 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \right] + 1,5 K_y K_{\text{з}0} \times \\ \times K_{\alpha 2}^2 \lambda_0 [2,0472(a_M - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}] \Big\}, \quad (31)$$

где диаметр внутренней расчетной окружности определяется выражением [7]

$$D_{\text{в}} = 4 \sqrt{3 \Pi_{\text{ид}}} / \left[\pi K_{\text{зс}} K_{\text{з}0} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right]. \quad (32)$$

Подстановка (32) преобразует уравнение суммарных потерь пространственной ЭМС к виду

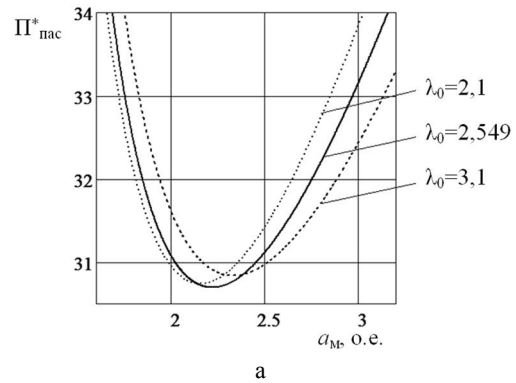
$$P_{\Sigma c} = K_{\text{дх}} \gamma_c P_{\text{ум}} B_c^2 (4 \sqrt{3 \Pi_{\text{ид}}})^3 \Pi_{\text{пас}}^*$$

где относительный показатель потерь ТТ с ЭМС (рис. 1,б) определяется уравнением

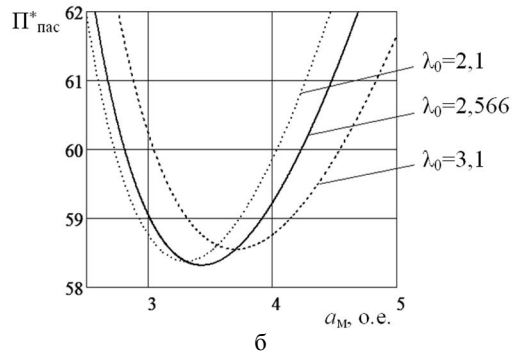
$$\Pi_{\text{пас}}^* = \left(4 \sqrt{3} / \left[\pi K_{\text{зс}} K_{\text{з}0} \lambda_0 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) K_{\alpha 2}^2 (a_M - 1) \right] \right)^3 \times \\ \times \left\{ \pi (a_M - 1) \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \left[K_{\alpha 2} (1,1545 + \lambda_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + 1,83 \left(\frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} + \frac{a_M - 1}{4} \right) \right] + 1,5 K_y K_{\text{з}0} K_{\alpha 2}^2 \lambda_0 \times \right. \\ \left. \times [2,0472(a_M - 1) + 2,2092K_{\alpha 1} + 1,5708K_{\alpha 2}] \right\}. \quad (33)$$

Результаты расчета оптимальных значений УП и показателя энергетической эффективности (33) пространственной ЭМС (рис. 1,б) при $K_{\text{зс}} = 0,91$, $\alpha_c = 10^\circ$, трех значениях $K_{\text{з}0}$ и значениях $K_{\text{умин}}$, $K_{\text{умак}}$ и $K_{\text{умак}}$ (25)

представлены в табл. 4-6. Примеры функциональных зависимостей (33) от a_M при $K_{\text{з}0} = 0,3$ и $\alpha_c = 10^\circ$ показаны на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Зависимости показателя потерь активной мощности от геометрических соотношений трехфазной пространственной электромагнитной системы с $K_y = 1,5$ (а) и $K_y = 5,5$ (б)

Таблица 4

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности пространственной электромагнитной системы при $K_{\text{умин}}$

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных		$\Pi_{\text{пас}}^*$ о.е.
	$a_{MЭ}$ о.е.	$\lambda_{0Э}$ о.е.	
0,3	2,219	2,346	30,696
0,25	2,104	2,351	32,433
0,2	1,978	2,357	34,787

Таблица 5

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности пространственной электромагнитной системы при $K_{\text{умак}}$

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных		$\Pi_{\text{пас}}^*$ о.е.
	$a_{MЭ}$ о.е.	$\lambda_{0Э}$ о.е.	
0,3	3,426	2,314	58,318
0,25	3,205	2,318	60,718
0,2	2,961	2,323	63,97

Таблица 6

Экстремальные значения управляемых переменных и показателя потерь активной мощности пространственной электромагнитной системы при $K_{\text{умак}}$

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Экстремальные значения управляемых переменных		$\Pi_{\text{пас}}^*$ о.е.
	$a_{MЭ}$ о.е.	$\lambda_{0Э}$ о.е.	
0,3	4,477	2,301	85,697
0,25	4,164	2,304	88,549
0,2	3,818	2,308	92,414

ВЫВОДЫ

1. Трёхфазная пространственная аксиальная ЭМС ТТ с витыми стыковым магнитопроводом, медными обмотками и секторными ОК, в диапазоне мощности 0,3-630 кВ·А, в дополнение к улучшенным массо-стоимостным показателям, отличается от электромагнитно-эквивалентного планарного аналога с прямоугольными ОК пониженными на 3-7 % потерями активной мощности.

2. Потери активной мощности планарной и пространственной ЭМС ТТ при $f_1 = 50$ Гц возрастают с повышением коэффициента соотношения плотностей тока обмоток и индукции стержня.

3. Энергетическая эффективность трёхфазной пространственной аксиальной ЭМС ТТ с параллельными ОП при $f_1 = 50$ Гц повышается относительно электромагнитно эквивалентной планарной ЭМС с увеличением плотности тока обмоток.

4. Основной геометрической УП, определяющей энергетическую эффективность планарной и пространственной аксиальной ЭМС является отношение a_m диаметров расчетных окружностей магнитопровода.

5. Величины экстремальных значений отношения диаметров расчетных окружностей a_m зависят от конкретных соотношений ЭМН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – №5. – С. 43-47.
2. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. / И.И. Белопольский, Е.И. Каретникова, Л.Г. Пикалова. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
4. Шидловський А.К., Федоренко Г.М. Макроекономічні тренди в електроенергетиці України 1990-2000 р. // *Технічна електродинаміка*. – 2002. – № 5. – С. 3-12.
5. Магнітопроводи силових трансформаторів (технологія і обладнання) / А.І. Майорець, Г.І. Пшеничний, Я.З. Чечелюк і др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
6. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 6. – С. 33-38.
7. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трёхфазных электромагнитных систем с параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (массо-стоимостные показатели) // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 15-20.
8. Ставинский Р.А. Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств // *Вісник КДУ*. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4 / 2010 (63), ч. 2 – С. 91-94.

9. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Зависимости потерь трёхфазных пространственных трансформаторов с параллельными стенками обмоточных окон от геометрических соотношений активной части // *Вісник Східно-укр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. – 2003. – № 4. – С. 95-100.

10. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Т.3 – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

Bibliography (transliterated): 1. Stavinskij A.A. Genезis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov `elektromagnitnyh sistem (elektrodinamicheskaya ustojchivost' i sistemy so stykovymi magnitoprovodami) // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2011. - №5. - S. 43-47. 2. Raschet transformatorov i drossелей maloj moschnosti. Izd. 2-e, pererab. i dop. / I.I. Belopol'skij, E.I. Karetnikova, L.G. Pikalova. - M.: `Energiya, 1973. - 400 s. 3. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - 5-e izdanie. Pererab. i dop. - M.: `Energoatomizdat, 1986. - 528 s. 4. Shidlovsk'ij A.K., Fedorenko G.M. Makroekonomichni trenди v elektroenergetici Ukraїni 1990-2000 r. // *Tehnichna elektrodinamika*. - 2002. - № 5. - S. 3-12. 5. Magnitoprovody silovih transformatorov (tehnologiya i oborudovanie) / A.I. Majorec, G.I. Pshenichnyj, Ya.Z. Chechelyuk i dr. - M.: `Energiya, 1973. - 272 s. 6. Stavinskij A.A. Genезis struktur i predposylki usovershenstvovaniya transformatorov i reaktorov preobrazovaniem konturov `elektromagnitnyh sistem (sistemy s shihtovannymi i vitymi magnitoprovodami) // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2011. - № 6. - S. 33-38. 7. Avdeeva E.A. Sravnitel'nyj analiz planarnoj i prostranstvennoj aksial'noj trehfaznyh `elektromagnitnyh sistem s parallel'nymi obrazuyuschimi poverhnostyami stержnej i obmotochnyh okon (massostoimostnye pokazately) // *Elektrotehnika i elektromehaniка*. - 2012. - № 4. - S. 15-20. 8. Stavinskij R.A. Netradicionnye tehničeskie resheniya, postanovka zadachi i metod struktornoj optimizacii indukcionnyh staticheskikh ustrojstv // *Visnik KDU*. - Kremenčuk: KDU, 2010. - Vip. 4 / 2010 (63), ch. 2 - S. 91-94. 9. Stavinskij A.A., Plahtyr' O.O., Stavinskij R.A. Zavisimosti poter' trehfaznyh prostranstvennyh transformatorov s parallel'nymi stenkami obmotochnyh okon ot geometričeskikh sootnoshenij aktivnoj chasti // *Visnik Shidno-ukr. nac. un-tu im. V. Dallya*. - 2003. - № 4. - S. 95-100. 10. Spravochnik po `elektrotehničeskim materialam / Pod red. Yu.V. Korickogo, V.V. Pasynkova, B.M. Tareeva. - T.3 - 3-e izd., pererab. - L.: `Energoatomizdat, 1988. - 728 s.

Поступила 11.02.2012

Авдеева Елена Андреевна

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
51025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9
тел. (0512) 366636, e-mail: e.avdeeva@ukr.net

Avdeeva E.A.

Comparative analysis of planar and spatial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (watt loss).

Analytical dependences for optimum geometrical relationship determination with a transformer minimal watt loss criterion are obtained. A comparative analysis of energy efficiency for planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with rectangular and sector forming contours of the cores and coil windows is made.

Key words – planar and spatial electromagnetic system, rectangular and sector forming contours, minimum watt loss, optimization.