

ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С КРУГОВЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ ВИТЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критерієм мінімуму втрат активної потужності та виконано порівняльний аналіз енергетичної ефективності трифазних аксіальних просторових електромагнітних систем з круговими і шестикутними конфігураціями перерізів стрижнів витого секціонованого стикового магнітопроводу.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критерию минимума потерь активной мощности трансформатора и выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности трехфазных аксиальных пространственных электромагнитных систем с круговыми и шестиугольными конфигурациями сечений стержней витого секционированного стыкового магнитопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивно-структурные схемы планарных электромагнитных систем (ЭМС) большинства состоящих в производстве трехфазных трансформаторов (ТТ) практически неизменны в течение более столетия [1-4]. Характеристики таких ТТ улучшены во второй половине прошедшего века на основе применения взамен листовой изотропной рулонной анизотропной электротехнической стали (ЭТС) [1-4]. Также было освоено производство ТТ с пространственными комбинированными и витыми магнитопроводами [1]. В настоящее время снижение потерь трансформаторов достигается использованием для изготовления магнитопроводов и обмоток соответственно изотропной аморфной ЭТС, транспонированных и ленточных обмоточных проводов [2-5]. В [3] перспективным направлением решения задач новых разработок ТТ мощностью 25...630 кВ·А определено создание пространственных витых разъемных магнитопроводов. Замена в ЭМС обмотываемых челночным станком моноблочных витых магнитопроводов на разрезные стыковые позволяет снизить металлоемкость и обеспечить ремонтпригодность ТТ. Однако возможности дальнейшего энергоресурсосбережения при производстве и эксплуатации конструкций ЭМС с "традиционными" прямоугольными и круговыми образующими контурами (ОК) стержней и катушек обмоток "классическими" способами [6] ограничены достигнутым низким уровнем потерь и пределами физических свойств материалов. Поэтому основным фактором будущего развития трансформаторов с высокой энергетической эффективностью представляется усовершенствование их конструкций на основе структурных преобразований ЭМС [6, 7].

Вариантом структурных преобразований ЭМС с различными исполнениями и технологиями изготовления магнитопроводов является замена круговых ОК сечений стержней и катушек обмоток (рис. 1) на "нетрадиционные" шестиугольные ОК (рис. 2). Такая замена улучшает на 15...20 % показатель компактности и несколько улучшает массостоймостные показатели трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с витым трехсекционным магнитопроводом, что очень важно, в частности, для объектов специальной техники [7-9].

Целью работы является сравнительный анализ, в дополнение к [8], потерь активной мощности вариантов пространственной аксиальной ЭМС ТТ с витым трехсекционным магнитопроводом (рис. 1, 2).

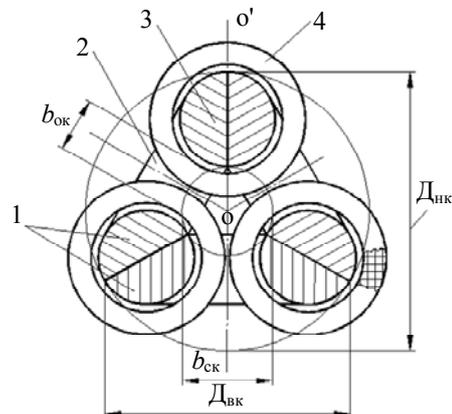


Рис. 1. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

ОСОБЕННОСТИ И МЕТОД АНАЛИЗА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СРАВНИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

В ЭМС (рис. 1, 2) магнитопроводы образуют двухконтурные фазные элементы (участки, охваченные обмоточными катушками) с независимыми (при отсутствии уравнивающего перераспределения магнитного поля в стержневых стыках на оси OO' рис. 1 и рис. 2) секционными магнитными потоками. Вследствие индивидуальности контуров замыкания силовых линий магнитного поля, амплитуды первых гармоник индукции и потоков каждой секции и стержней отличаются в $2/\sqrt{3}$, а магнитный режим характеризуется наличием секционных гармоник поля кратных трем, что приводит к возрастанию добавочных потерь холостого хода ТТ с ЭМС (рис. 1, 2) [1, 3]. При этом амплитуды потоков секций и стержней практически не отличаются, так как третьи гармоники снижают средние значения амплитуд индукции каждой секции B_c до средних значений амплитуды

индукции стержня B_c . Поэтому при расчетах основных потерь в стали ЭМС (рис. 1, 2) принимается $B_c = B'_c$ [1].

Замена круговых ОК на шестигранные ОК дополнительно к улучшению массогабаритных показателей снижает трудоемкость производства, а также массу и потери в стали магнитопровода и обеспечивает коэффициент заполнения ОК сечения стержня $K_{\text{шш}} \approx 1$, но повышаются средние длины витков катушек, а также материалоемкость и потери обмоток [8].

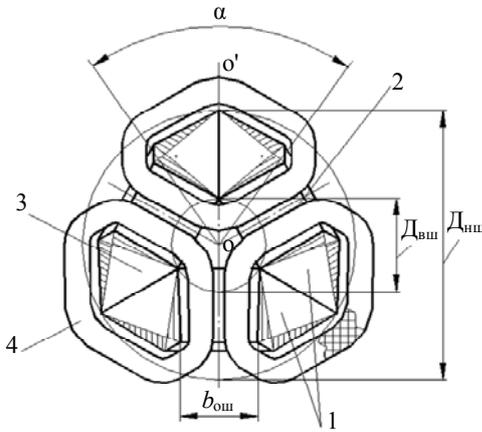


Рис. 2. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

При сравнительном анализе энергетической эффективности ЭМС (рис. 1, 2) принимаются следующие известные допущения [8, 10, 11]. Используется конструкция обмоток с чередующимися фазными катушками и средними витками, расположенными на четверти ширины $b_{\text{ок(ш)}}$ 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 ($j_{\text{ок}} = j_{\text{ш}} = j_0$) и средние (по сечению) значения амплитуд магнитной индукции в секциях магнитопроводов ($B'_{\text{ск}} = B'_{\text{сш}} = B'_c$) ЭМС с круговыми и шестигранными ОК. Также соответственно идентичными являются коэффициенты заполнения обмоточного окна ($K_{\text{зок}} = K_{\text{зш}} = K_{\text{зо}}$) и коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС ($K_{\text{зск}} = K_{\text{зсш}} = K_{\text{зс}}$).

Значение коэффициента полезного действия трансформатора определяется суммой потерь холостого хода и потерь короткого замыкания (нагрузочных) [1, 2]. Указанная сумма на основе метода относительных коэффициентов показателей технического уровня [10] представляется полной целевой унимодальной функцией потерь активной мощности $F_{\text{пк}}$ и $F_{\text{пш}}$ вариантов ЭМС соответствующих рис. 1 и рис. 2

$$F_{\text{пк(ш)}} = (\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}})^3 K_{\text{п}} \Pi_{\text{пк(ш)}}^* \quad (1)$$

где $\Pi_{\text{и}}$ – идентичный для сравниваемых ЭМС показатель исходных данных и ЭМН ТТ; $K_{\text{п}}$ и $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$ – коэффициент потерь холостого хода и относительный коэффициент потерь холостого хода и относительный коэффициент – показатель потерь активной мощности в номинальном режиме вариантов ТТ с ЭМС (рис. 1, 2).

Коэффициенты $K_{\text{п}}$ и $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$ определяются выражениями:

$$K_{\text{п}} = K_{\text{дх}} \gamma_c P_{1/50} (f/50)^{1,5} (B'_c)^2;$$

$$\Pi_{\text{пк}}^* = f(K_{\text{зо}}, K_{\text{y}}, a_{\text{м}}, \lambda_0); \quad (2)$$

$$\Pi_{\text{пш}}^* = f(K_{\text{зо}}, K_{\text{y}}, \alpha_c, a_{\text{м}}, \lambda_0), \quad (3)$$

где $K_{\text{дх}}$ – коэффициент добавочных потерь холостого хода [1]; γ_c – плотность ЭТС; $P_{1/50}$ – удельные потери ЭТС магнитопровода при частоте $f = 50$ Гц и значении индукции 1,0 Тл; K_{y} – коэффициент удельных показателей и ЭМН; α_c – центральный угол стержня магнитопровода ЭМС (рис. 2); $a_{\text{м}}$ – отношение наружного $D_{\text{нк(ш)}}$ и внутреннего $D_{\text{вк(ш)}}$ диаметров расчетных окружностей магнитопровода; λ_0 – отношение высоты $h_{\text{ок(ш)}}$ и ширины $b_{\text{ок(ш)}}$ обмоточного окна,

$$a_{\text{м}} = D_{\text{нк(ш)}} / D_{\text{вк(ш)}}; \quad (4)$$

$$\lambda_0 = h_{\text{ок(ш)}} / b_{\text{ок(ш)}}. \quad (5)$$

Входящий в (2) и (3) относительный коэффициент K_{y} для рассматриваемых ЭМС определяется соотношением

$$K_{\text{y}} = K_{\text{дк}} \gamma_0 P_{\text{yo}} j_0^2 / [K_{\text{дх}} \gamma_c P_{1/50} (f/50)^{1,5} (B'_c)^2], \quad (6)$$

где γ_0 и P_{yo} – плотность и коэффициент удельных потерь активного материала обмотки; $K_{\text{дк}}$ – коэффициент добавочных потерь короткого замыкания [1].

Диапазон изменения значений $K_{\text{п}}$ и K_{y} является идентичным для сравниваемых ЭМС, а по величинам $\Pi_{\text{пк(ш)}}^*$, а также относительным показателям массы $\Pi_{\text{мк(ш)}}^*$ и стоимости $\Pi_{\text{ск(ш)}}^*$ [8] можно определить целесообразность замены в ЭМС с витым симметричным трехсекционным магнитопроводом круговых ОК (рис. 1) на шестигранные ОК (рис. 2).

При принятых допущениях потери холостого хода $P_{\text{ххк(ш)}}$ и потери короткого замыкания $P_{\text{кзк(ш)}}$ ЭМС ТТ определяются известными, например из [11], уравнениями:

$$P_{\text{ххк(ш)}} = K_{\text{дх}} P_{1/50} (f/50)^{1,5} (B'_c)^2 m_{\text{мк(ш)}}; \quad (7)$$

$$P_{\text{кзк(ш)}} = 1,5 K_{\text{дк}} \gamma_0 P_{\text{yo}} j_0^2 K_{\text{зо}} \lambda_0 l_{\text{вк(ш)}} b_{\text{ок(ш)}}^2, \quad (8)$$

где $m_{\text{мк(ш)}}$, $l_{\text{вк(ш)}}$ и $b_{\text{ок(ш)}}$ – соответственно масса ЭТС магнитопровода, средняя длина витка катушки и ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 1, рис. 2).

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТЕРЬ СРАВНИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Входящие в (7), (8) технико-геометрические характеристики определяются полученными в [8] уравнениями:

$$m_{\text{мк}} \approx 2,0665 \gamma_c K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}} / [K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} K_{\text{кк}} f_{\text{к}} (a_{\text{м}}, \lambda_0)]} \right)^3 \times \left[(\lambda_0 + 1)(1 - 0,0718 a_{\text{м}})(a_{\text{м}} - 1)^2 + 0,65654 (a_{\text{м}} - 1)^3 \right] \quad (9)$$

$$l_{\text{вк}} = 1,46555 D_{\text{вк}} (a_{\text{м}} - 0,07181); \quad (10)$$

$$b_{\text{ок}} = 0,933 D_{\text{вк}} (1 - 0,0718 a_{\text{м}}); \quad (11)$$

$$m_{\text{мш}} = 1,5 \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}} / [3 K_{\text{зс}} K_{\text{зо}} \lambda_0 f_{\text{ш1}} (a_{\text{м}}, \alpha_c) f_{\text{ш3}} (a_{\text{м}}, \alpha_c)]} \right)^3 \times \left[f_{\text{ш1}}^2 (a_{\text{м}}, \alpha_c) F_{\text{ш1}} (a_{\text{м}}, \lambda_0, \alpha_c) + 3,4641 f_{\text{ш1}} (a_{\text{м}}, \alpha_c) \times \right. \quad (12)$$

$$\left. \times f_{\text{ш2}} (a_{\text{м}}, \alpha_c) F_{\text{ш2}} (a_{\text{м}}, \lambda_0, \alpha_c) \right] \gamma_c K_{\text{зс}}.$$

$$l_{\text{вш}} = 1,1547 D_{\text{вш}} [f_{\text{ш1}} (a_{\text{м}}, \alpha_c) + 0,866 f_{\text{ш2}} (a_{\text{м}}, \alpha_c) + 1,1781]; \quad (13)$$

$$b_{\text{ош}} = \sqrt{3} D_{\text{вш}}/2, \quad (14)$$

где $K_{\text{кк}}$ – коэффициент заполнения кругового ОК поперечным сечением стержня, составляет постоянное значение $K_{\text{кк}} = 0,904$ для трехфазных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А [1]; $f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})$, $f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})$, $F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}})$, $F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}})$ – функциональные множители,

$$f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}) = \lambda_{\text{о}}(1 - 0,0718a_{\text{м}})^2(a_{\text{м}} - 1)^2;$$

$$f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = (a_{\text{м}} + 1)tg(\alpha_{\text{с}}/2);$$

$$f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = a_{\text{м}} - 1 - f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/\sqrt{3};$$

$$f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) = a_{\text{м}} - 1 - f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/(2\sqrt{3});$$

$$F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) = 1 + \lambda_{\text{о}} + \pi f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/2;$$

$$F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) = 1 + \lambda_{\text{о}} + \pi f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})/4.$$

Диаметры $D_{\text{вк}}$ и $D_{\text{вш}}$ связаны с $\Pi_{\text{и}}$ выражениями [8]:

$$D_{\text{вк}} = 1,555\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}/[K_{\text{зс}}K_{\text{з0}}K_{\text{кк}}f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})]}; \quad (15)$$

$$D_{\text{вш}} = 2\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}/[3K_{\text{зс}}K_{\text{з0}}\lambda_{\text{о}}f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})]}. \quad (16)$$

Суммарные потери рассматриваемых ЭМС определяются, на основе (6) – (8) уравнением

$$P_{\Sigma\text{к(ш)}} = P_{\text{хкк(ш)}} + P_{\text{кзк(ш)}} = K_{\text{дх}} P_{1/50} (f/50)^{1,5} \times (1,1547B_{\text{с}})^2 [m_{\text{МК(ш)}} + 1,5K_{\text{з0}}\lambda_{\text{о}}l_{\text{МК(ш)}}b_{\text{ОК(ш)}}^2 K'_{\text{у}}] \quad (17)$$

где $K'_{\text{у}}$ – коэффициент,

$$K'_{\text{у}} = \gamma_{\text{с}} K_{\text{у}}.$$

После подстановки (9) – (11) и (12) – (14), а также (15) и (16), соответствующие рис. 1 и рис. 2 варианты уравнения (17) преобразуются к виду (1) с показателями:

$$\Pi_{\text{ПК}}^* = 2,0665 \left(\sqrt[4]{1/[K_{\text{зс}}K_{\text{з0}}K_{\text{кк}}f_{\text{к}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}})]} \right)^3 \times \left\{ K_{\text{зс}}K_{\text{кк}} \left[(\lambda_{\text{о}} + 1)(1 - 0,0718a_{\text{м}})(a_{\text{м}} - 1)^2 + 0,65654(a_{\text{м}} - 1)^3 \right] + 3,482K_{\text{у}}K_{\text{з0}}\lambda_{\text{о}} \times \right. \quad (18)$$

$$\left. \times (1 - 0,0718a_{\text{м}})(a_{\text{м}} - 0,0718)^2 \right\} \times \left(\sqrt[4]{1/[3K_{\text{зс}}K_{\text{з0}}\lambda_{\text{о}}f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш3}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})]} \right)^3 \times \left\{ K_{\text{зс}} \left[f_{\text{ш1}}^2(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})F_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) + 3,4661f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}})F_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}) \right] + \right. \quad (19)$$

$$\left. + 6,9282K_{\text{у}}K_{\text{з0}}\lambda_{\text{о}} \left[f_{\text{ш1}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 0,866f_{\text{ш2}}(a_{\text{м}}, \alpha_{\text{с}}) + 1,178 \right] \right\}.$$

Согласно [2-5] в современных ТТ используются анизотропные ЭТС марок 3406 – 3409 с $K_{\text{зс}} = 0,96 \dots 0,97$ при толщине $\delta_{\text{с}} = 0,27 \dots 0,35$ мм и $\gamma_{\text{с}} = 7650$ кг/м³, а также склеенная из пяти слоев толщиной 0,024 мм аморфного сплава *FeSiB* ленточная ЭТС с $K_{\text{зс}} = 0,8 \dots 0,85$ при $\delta_{\text{с}} = 0,15$ мм и $\gamma_{\text{с}} = 7320$ кг/м³. Наибольший эффект дает применение новых высокопроницаемых анизотропных и аморфных ЭТС в ЭМС с витыми пространственными магнитопроводами для которых $K_{\text{дх}}$ не зависит от характеристик применяемой ЭТС [3]. Добавочные потери магнитопроводов ЭМС (рис. 1, 2) обусловлены, как указано выше, несинусоидальностью магнитных потоков секций и учитываются $K_{\text{дх}} = 1,33 \dots 1,35$ [1, 3]. В расчетах "сухих" и "масляных" ТТ мощностью 10...160 кВ·А, а также 160...630 кВ·А используются соответственно значения $K_{\text{дх}} \leq 1,04$ и $K_{\text{дх}} \leq 1,075$ и диапазон индукции $B_{\text{с}} = 1,35 \dots 1,65$ Тл [1].

Для определения $K_{\text{у}}$ и расчетов $\Pi_{\text{ПК(ш)}}^*$ в настоящей работе принимаются значения $B'_{\text{с}} = 1,45 \dots 1,65$ Тл, $P_{1,0/50} = 0,47$ Вт/кг и $K_{\text{зс}} = 0,97$ (сталь 3407, $\delta_{\text{с}} = 0,35$ мм [2]), а также $B'_{\text{с}} = 1,4$ Тл, $P_{1,4/50} = 0,13$ Вт/кг и $K_{\text{зс}} = 0,8$ (аморфная сталь с рабочей индукцией $B_{\text{с}} \leq 1,4$ Тл [3, 5]), принимаются $K_{\text{дх}} = 1,04$ и $K_{\text{дх}} = 1,34$. При использовании медных обмоточных проводов с $\gamma_{\text{о}} = 8900$ кг/м³ и $P_{\text{у}} = 2,4 \cdot 10^{-12}$ Вт·м⁴/(кг·А²), а также частоте сети $f = 50$ Гц, в диапазоне номинальной мощности $S_{\text{н}} = 0,3 - 1$ кВ·А и $S = 1 - 2,5$ кВ·А, плотность тока соответствует значениям: $j_{\text{о}} = 2,4 - 1,7$ А/мм² и $j_{\text{о}} = 1,7 - 1,4$ А/мм² [12]. При аналогичных частоте и активных материалах, согласно [1], в масляных ТТ при $S_{\text{н}} = 2,5 - 63$ кВ·А, $j_{\text{о}} = 1,8 - 2,2$ А/мм² и при $S_{\text{н}} = 63 - 630$ кВ·А, $j_{\text{о}} = 2,2 - 3,5$ А/мм², а в "сухих" ТТ с $S_{\text{н}} = 10 - 1600$ кВ·А полусумма плотностей тока первичной и вторичной концентрических обмоток составляет $j_{\text{о}} = 1,7 - 2,4$ А/мм².

Для рекомендуемых значений и диапазонов изменения ЭМН расчетные величины коэффициента (6) с характеристиками изотропной ЭТС составляют:

$$K_{\text{уmin1}} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,65^2} = 3,319;$$

$$K'_{\text{уmax1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,65^2} = 9,755;$$

$$K''_{\text{уmax1}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7650 \cdot 0,47 \cdot 1,45^2} = 44,77.$$

Аналогичные величины коэффициента (6) с характеристиками аморфной ЭТС составляют:

$$K_{\text{уmin2}} \geq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (1,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 34,145;$$

$$K'_{\text{уmax2}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (2,4 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 100,345;$$

$$K''_{\text{уmax2}} \leq \frac{1,04 \cdot 8900 \cdot 2,4 \cdot 10^{-12} (3,5 \cdot 10^6)^2}{1,34 \cdot 7320 \cdot 0,13} = 213,41.$$

Принимаются минимальные $K_{\text{уmin1(2)}}$ и максимальные $K_{\text{уmax1(2)}}$ величины коэффициента удельных показателей и ЭМН

$$3 = K_{\text{уmin1}} \leq K_{\text{у1}} \leq K'_{\text{уmax1}} = 10 \quad (45); \quad (20)$$

$$34 = K_{\text{уmin2}} \leq K_{\text{у2}} \leq K'_{\text{уmax2}} = 100 \quad (214). \quad (21)$$

Результаты расчетов экстремальных значений (минимумов) показателей энергетической эффективности (18) и (19) ЭМС (рис. 1) при $K_{\text{кк}} = 0,904$ [1, 8] и ЭМС (рис. 2) для принятых значений $K_{\text{зс}}$ и величин $K_{\text{у}}$ (20) и (21) приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Минимальные значения показателя потерь активной мощности трехфазной пространственной аксиальной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней витого секционированного магнитопровода

K _{зс} , о.е.	Показатель Π _{ПКэ} [*] , о.е. при значениях K _у , о.е.					
	анизотропная сталь			аморфная сталь		
	3	10	45	34	100	214
0,3	40,80	79,01	200,13	181,01	372,97	633,59
0,25	42,65	81,51	204,7	184,43	377,46	539,02
0,2	45,15	84,91	209,75	189,05	383,53	646,38

Таблица 2

Минимальные значения показателя потерь активной мощности трехфазной пространственной аксиальной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней витого секционированного магнитопровода

K _{эо} , о.е.	Показатель $\Pi_{\text{штэ}}$, о.е. при значениях K _y , о.е.					
	анизотропная сталь			аморфная сталь		
	3	10	45	34	100	214
0,3	40,33	77,91	197,91	178,14	366,68	623,90
0,25	42,17	80,41	201,56	181,54	371,25	628,02
0,2	44,67	83,79	206,51	186,14	377,18	635,33

ВЫВОДЫ

1. Замена в трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с двухконтурными фазными элементами витого магнитопровода круговых ОК на шестигранные ОК сечений стержней и катушек медных обмоток в дополнение к существенному повышению компактности, снижению трудоемкости производства и некоторому улучшению массосстоимостных показателей, позволяет в диапазоне мощности 0,3 – 1000 кВ·А, на 1...1,5 % и 1,5...1,7 % повысить энергетическую эффективность ТТ с магнитопроводом соответственно из анизотропной и аморфной ЭТС.

2. Потери активной мощности пространственных аксиальных ЭМС при $f = 50$ Гц повышаются с повышением соотношения плотностей тока обмоток и индукции стержня.

3. Энергетическая эффективность ЭМС с шестигранными сечениями стержней повышается относительно электромагнитно эквивалентной ЭМС с круговыми ОК при увеличении индукции стержня (секции).

4. Величины экстремальных значений α_m , λ_o , и α_c зависят от конкретных соотношений ЭМН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
3. Бормосов В.А., Костоусова М.Н., Петренко А.Ф., Смольская Н.Е. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий. Режим доступа: www.trans-form.ru (13.09.2004).
4. Кравченко А., Метельский В. Сухие энергосберегающие трансформаторы // Электрик. – 2013. – №4. – С. 12-15.
5. Кравченко А., Метельский В. Масляные энергосберегающие трансформаторы // Электрик. – 2013. – №5. – С. 14-17.
6. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромагнитических и статических преобразователей // Електротехніка та комп'ютерні системи. – 2011. – №1(77) – С. 64-69.
7. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 33-38.
8. Авдеева Е.А., Ставинский Р.А. Массосстоимостные показатели пространственных аксиальных трехфазных электромагнитных систем с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых магнитопроводов // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №1. – С. 15-20.
9. Блинцов В.С., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А., Садовой А.С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограни-

ченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 16-21.

10. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 79-82.

11. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими стержней и обмоточных окон (потери активной мощности) // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 13-17.

12. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tihomirov P.M. *Raschet transformatorov*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 528 p. 2. *Power transformers. Reference book* / pod red. S.D. Lizunova, A.K. Lohanina. – Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 2004. 616 p. 3. Bormosov V.A., Kostousova M.N., Petrenko A.F., Smol'skaja N.E. *Perspektivy i sostojanie razrabotok raspredelitel'nyh transformatorov massovyh serij*. Available at: www.trans-form.ru (accessed 13 September 2004). 4. Kravchenko A., Metel'skij V. *Suhie jenergosberegajushhie transformatory*. *Jelektrik*, 2013, no.4 pp. 12-15. 5. Kravchenko A., Metel'skij V. *Masljanje jenergosberegajushhie transformatory*. *Jelektrik*, 2013, no.5, pp. 14-17. 6. Stavinskiy A.A., Tishhenko I.A., Zelenyj N.I. *Perspektivy i osobennosti dal'nejshego usovershenstvovaniya indukcionnyh jelektromehaničeskikh i statičeskikh preobrazovatelej*. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni sistemi*, 2011, no.1(77), pp. 64-69. 7. Stavinskiy A.A. Evolution of structures and premises of improvement of transformers and reactors transformation of circuits of electromagnetic systems (system with laminated and twisted magnetic circuits). *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.6, pp. 33-38. 8. Avdieieva E.A., Stavinskiy R.A. Mass and cost figures for spatial axial three-phase electromagnetic systems with circular and hexagonal forming contours of twisted magnetic core rods. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.1, pp. 15-20. 9. Blincov V.S., Stavinskiy R.A., Avdieieva E.A., Sadovoj A.S. Transformers for specialized engineering objects embedding into limited-diameter shells and their improvement problem formulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 16-21. 10. Stavinskiy A.A., Plahytr' O.O., Stavinskiy R.A. The quality parameters at structural optimization of spatial electromagnetic systems for three-phase transformers, reactors and throttles. *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.4, pp. 79-82. 11. Avdieieva E.A. Comparative analysis of planar and spatial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (watt loss). *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.5, pp. 13-17. 12. Belopol'skij I.I., Karetnikova E.I., Pikalova L.G. *Raschet transformatorov i drossel'ej maloj moshhnosti*. *Izd. 2-e, pererab. i dop.* Moscow, Jenergija Publ., 1973. 400 p.

Поступила (received) 25.08.2013

Авдеева Елена Андреевна¹,
Ставинский Ростислав Андреевич¹, к.т.н., доц.,
¹Национальный университет кораблестроения
им. Адмирала Макарова,
кафедра электрооборудования судов и информационной
безопасности,
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9,
тел/phone +38 0512 399454, e-mail: e.avdeeva@ukr.net

Е.А. Авдеева¹, Р.А. Ставинский¹
¹National University of Shipbuilding after Admiral Makarov
9, Heroes of Stalingrad Avenue, Nikolaev, 54025, Ukraine

Watt loss in three-phase transformers with circular and hexagonal forming contours of twisted spatial magnetic core rods.

For spatial three-phase axial electromagnetic systems with circular and hexagonal cross-section configurations of twisted butt-end magnetic core rods, analytical dependences for optimal geometrical relations determination over the transformer minimum watt loss criterion are obtained, comparative analysis of the systems energy efficiency made.

Key words – three-phase electromagnetic system, twisted spatial magnetic core, circular and hexagonal forming contours, watt loss minimum.