

МАССОСТОИМОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ АКСИАЛЬНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КРУГОВЫМИ И ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ СТЕРЖНЕЙ ВИТЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Отримані аналітичні залежності визначення оптимальних геометричних співвідношень за критеріями мінімуму маси та вартості активної частини, а також показані переваги використання шестигранних конфігурацій перерізів стержнів в просторовій аксіальній трифазній електромагнітній системі з двоконтурними фазними елементами витого стикового магнітопроводу.

Получены аналитические зависимости определения оптимальных геометрических соотношений по критериям минимумов массы и стоимости активной части, а также показаны преимущества использования шестигранных конфигураций сечений стержней в пространственной аксиальной трехфазной электромагнитной системе с двухконтурными фазными элементами витого стыкового магнитопровода.

ВВЕДЕНИЕ

Требования минимальных массогабаритных показателей оборудования объектов специальной техники обуславливают важность и актуальность разработки компактных трехфазных трансформаторов с конфигурациями электромагнитных систем (ЭМС), приближенными к цилиндрам и сферам [1].

Во второй половине прошедшего века разработаны технологии изготовления холоднокатаной электротехнической стали (ЭТС) и витых ленточных (рулонных) магнитопроводов с преимуществами относительной простоты автоматизации и снижения трудоемкости производства [2]. На основе таких технологий выпускаются трехфазные трансформаторы, в частности ТСЗМ и ТСЗМВ, отличающиеся пространственными аксиальными ЭМС и улучшенными, согласно [3], массогабаритными характеристиками. Структуры подобных ЭМС соответствуют рис. 1 и характеризуются двухконтурными фазными элементами стержней секционированного магнитопровода и "традиционными" круговыми образующими контурами (ОК) стержней и обмоточных катушек. Такие ОК обеспечивают круговую намотку и минимизацию средней длины витков обмоточных катушек. Однако указанные ОК увеличивают диаметр D_k окружности описанной вокруг поперечного сечения ЭМС (рис. 1) и не полностью заполняются сечениями стержней, которые выполняются из лент (рулонов) ЭТС различной или изменяющейся ширины [2, 4]. Поэтому круговые ОК при малом их заполнении сечением стержня повышают габариты и массу ЭМС, а при относительно высоком заполнении существенно усложняют технологию производства магнитопроводов.

Упрощение технологии изготовления пространственного витого секционированного магнитопровода и дополнительное повышение показателя компактности трехфазного трансформатора или реактора достигается заменой круговых ОК на шестигранные ОК катушек обмоток и стержней разрезного стыкового магнитопровода (рис. 2) [5].

Целью работы является сравнительный анализ массостоимостных показателей конструкций ЭМС (рис. 1 и рис. 2) с круговыми и шестигранными ОК, а также определение геометрических параметров, определяющих размерные соотношения технологической заготовки ЭТС секции ЭМС (рис. 2).

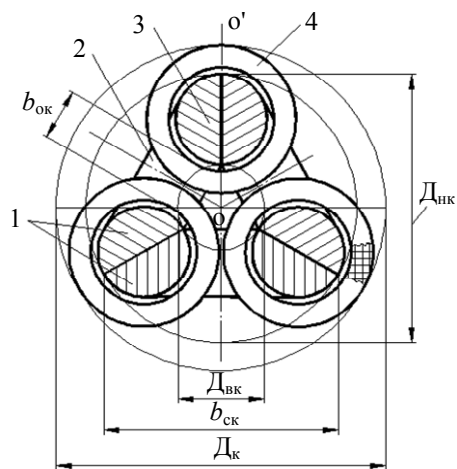


Рис. 1. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

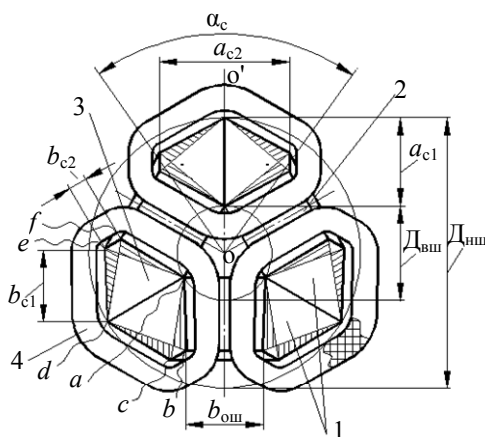


Рис. 2. Схема поперечной структуры пространственной трехфазной электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами стержней и катушек обмоток витого магнитопровода: 1 – стержень; 2 – яремный участок секции; 3 – стержневой участок секции; 4 – катушка обмотки

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУР СРАВНИВАЕМЫХ ВАРИАНТОВ

Формированию магнитопровода трехфазной пространственной аксиальной ЭМС с круговыми (рис. 1)

и шестигранными (рис. 2) ОК из трех секций с вариантами поперечного сечения (рис. 3,а) и прямоугольным внутренним контуром (рис. 3,б) соответствует образованию сечений стержней соответственно из нескольких четырехугольных участков, вписанных в окружность [4] и из двух трапециевидальных участков, образующих симметричный шестигранник $abcdef$ с осью симметрии ограниченной центральным углом стержня α_c [5]. Секции (рис. 3) выполняются навивкой со смещением по оси OO' (рис. 3,а) смежных витков заготовок (разверток) ЭТС вида (рис. 4). Заготовка для формирования секции ЭМС (рис. 1) содержит четырехугольные участки с параллельными пунктирными и непараллельными сторонами, ограниченными сплошной и пересекающимися прямыми линиями (рис. 4). Коэффициент заполнения кругового ОК сечением стержня в стыке двух секций ЭМС (рис. 1), навитых из заготовок ЭТС с представленной пунктирной линией криволинейной образующей (рис. 4), составляет постоянное значение $K_{\text{кк}} = 0,904$ для трехфазных трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А [4]. Замена полукруглого ОК на трапециевидальный

в вариантах поперечного сечения секций (рис. 3,а) обеспечивает уменьшение контурного диаметра D_k (рис. 1) и упрощение конфигурации развертки ЭТС (рис. 4), а также коэффициент заполнения шестигранного ОК сечения стержня $K_{\text{кш}} \approx 1$, то есть важные конструктивно-технологические преимущества.

Упрощение изготовления секций магнитопровода и повышение коэффициента заполнения ОК сечения стержня до $K_{\text{кш}} \approx 1$ достигается заменой кусочно-линейной конфигурации заготовки ЭТС, представленной сплошными линиями на рис. 4 на более простую, ограниченную треугольным $gg'h$ и прямоугольным $abgg'$ участками. Заготовка $abgh$ выполняется разделением исходной прямоугольной ленты (рулона) ЭТС ширины ab на две идентичные части с треугольными $gg'h$ и прямоугольными $abgg'$ участками, а также длиной соответственно $l_{\text{ш1}}$ и $l_{\text{ш2}}$ (рис. 4) [5].

При увеличении угла α_c относительно значения, соответствующего равносоставленному шестиграннику, до соотношения сторон $b_{c1}/b_{c2}=3...4$, контурный объем ЭМС (рис. 2) снижается на 15...20 %.

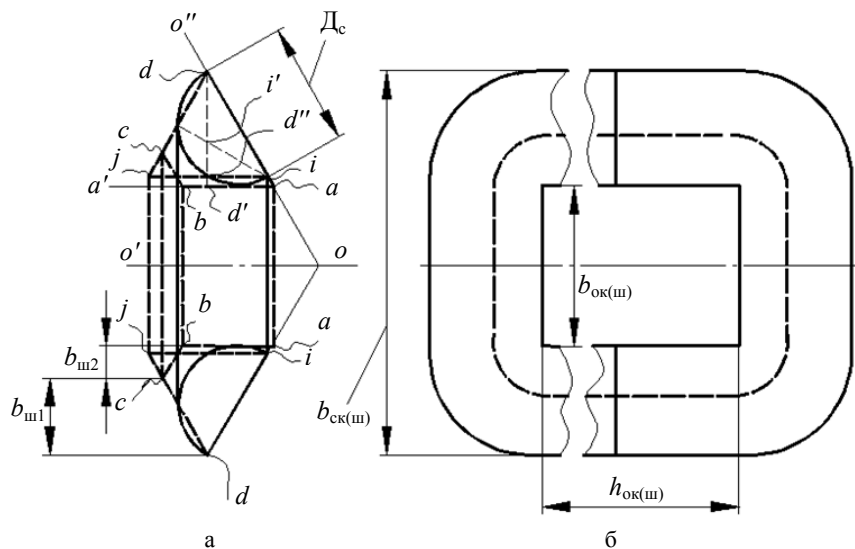


Рис. 3. Варианты конфигурации поперечного сечения (а) и вида сбоку (б) секции витого магнитопровода с двухконтурными фазными элементами стержней

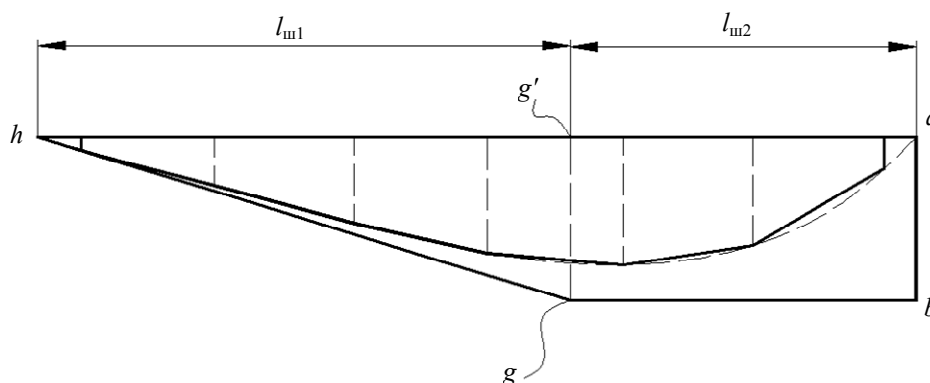


Рис. 4. Условная схема вариантов развертки электротехнической стали для навивки секции магнитопровода с двухконтурными фазными элементами

МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Сравнительный анализ двух различных вариантов ЭМС выполняется в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности и методом структурной оптимизации [6] на основе определения и

сравнения показателей технического уровня. В соответствии с поставленной целью в настоящей работе определяются целевые функции $F_{\text{цм}(с)}$ массы (стоимости) с относительными показателями массы (стоимости) активной части:

$$F_{\text{цм(с)}} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{\text{и}}}\right)^3 K_{\text{м(с)}} \Pi_{\text{м(с)а}}^* ; \quad (1)$$

$$\Pi_{\text{м(с)а}}^* = f(K_{\text{зо}}, a_{\text{м}}, \lambda_{\text{о}}, \alpha_{\text{с}}), \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{и}}$ – показатель исходных данных (технического задания на проектирование и электромагнитных нагрузок) трансформатора или реактора; $K_{\text{м(с)}}$ и $\Pi_{\text{м(с)а}}^*$ – коэффициент удельных характеристик электротехнических материалов и относительный коэффициент – показатель массы (стоимости) активной части; $K_{\text{зо}}$ – соответствующий классу напряжения коэффициент заполнения обмоточного окна проводящим материалом обмоточного провода; $a_{\text{м}}$ и $\lambda_{\text{о}}$ – основные относительные геометрические управляемые переменные; угол $\alpha_{\text{с}}$ – дополнительная геометрическая управляемая переменная, используемая в некоторых ЭМС.

Относительные управляемые переменные целевых функций (1) и (2) вариантов ЭМС (рис. 1, рис. 2) являются соотношениями их геометрических параметров [6]:

$$a_{\text{м}} = D_{\text{нк(ш)}}/D_{\text{вк(ш)}} ; \quad (3)$$

$$\lambda_{\text{о}} = h_{\text{ок(ш)}}/b_{\text{ок(ш)}} , \quad (4)$$

где $D_{\text{нк(ш)}}$ и $D_{\text{вк(ш)}}$ – наружный и внутренний расчетные диаметры (рис. 1, 2); $h_{\text{ок(ш)}}$ и $b_{\text{ок(ш)}}$ – высота и ширина обмоточного окна (рис. 3,б).

Определение относительных показателей массы $\Pi_{\text{мак(ш)}}^*$ и стоимости $\Pi_{\text{сак(ш)}}^*$ вариантов ЭМС с круговыми (рис. 1) и шестигранными (рис. 2) ОК выполняется на основе известных, например из [7], уравнений связи площади ЭТС поперечного сечения стержня $S_{\text{ск(ш)}}$ с площадью обмоточного окна $S_{\text{ок(ш)}}$, а также массы проводящего материала обмотки $m_{\text{ок(ш)}}$ трехфазного трансформатора:

$$S_{\text{ск(ш)}} = \Pi_{\text{и}} / (K_{\text{зо}} S_{\text{ок(ш)}}); \quad (5)$$

$$m_{\text{ок(ш)}} = 1,5\gamma_{\text{о}} K_{\text{зо}} S_{\text{ок(ш)}} l_{\text{вк(ш)}} , \quad (6)$$

где $\gamma_{\text{о}}$ – плотность обмоточного провода; $l_{\text{вк(ш)}}$ – средняя длина витка катушки чередующейся обмотки с круговыми (шестигранными) ОК.

При сравнительном анализе рассматриваемых вариантов ЭМС (рис. 1, 2) на основе (1) и (2) и в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности принимается, что средние значения амплитуд индукции магнитного поля, а также коэффициенты заполнения сечений секций магнитопровода ЭТС $K_{\text{зс}}$ [4] соответственно идентичны. Радиусы соответственно окружностей и кольцевых изгибов угловых зон средних витков чередующихся фазных катушек определяются четвертью ширины обмоточного окна $b_{\text{ок(ш)}}$. Пренебрегается радиусом углового изгиба внутреннего витка ЭТС секции (рис. 3,б). Показатели исходных данных сравниваемых ЭМС в определении оптимальных геометрических соотношений не используются, но в соответствии с указанным принципом принимаются идентичными $\Pi_{\text{нк}} = \Pi_{\text{ш}} = \Pi_{\text{и}}$.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

МАССОСТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ С КРУГОВЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ

Обоснование вида уравнений (1) и (2) соответствующих ЭМС (рис. 1) осуществляется с использова-

нием (3) и выражений диаметра $D_{\text{с}}$, а также площади ЭТС $S_{\text{ск}}$ сечения стержня с круговым ОК:

$$D_{\text{с}} = (D_{\text{нк}} - D_{\text{вк}})/2 = D_{\text{вк}}(a_{\text{м}} - 1)/2 ; \quad (7)$$

$$S_{\text{ск}} = \pi K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} D_{\text{к}}^2 / 4 = \pi K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} D_{\text{вк}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 / 16 . \quad (8)$$

Минимальная ширина обмоточного окна $b_{\text{ок}}$ магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется через $D_{\text{вк}}$ и $a_{\text{м}}$ с использованием (3), (7) и уравнения:

$$(b_{\text{ок}} + D_{\text{с}})/2 = (D_{\text{нк}} - D_{\text{к}}) \sin(\pi/3)/2 ;$$

$$b_{\text{ок}} = 0,933 D_{\text{вк}} (1 - 0,0718 a_{\text{м}}) . \quad (9)$$

Ширина секции (рис. 3) магнитопровода ЭМС (рис. 1) выражается через $D_{\text{вк}}$ и (3) соотношением

$$b_{\text{ск}} = D_{\text{нк}} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} a_{\text{м}} D_{\text{вк}} / 2 . \quad (10)$$

Масса магнитопровода ЭМС с круговыми ОК пропорциональна сумме объемов стержневых, ярменных и угловых участков секции, представленной на рис. 3,а сплошными линиями. Суммарный объем стержневых и ярменных участков секции соответствует объему двух цилиндров с диаметром $D_{\text{с}}$ и высотами $h_{\text{ок}}$ и $b_{\text{ок}}$ (рис. 3,б). Суммарный объем четырех угловых участков секции образован вращением половины окружности диаметра $D_{\text{с}}$ относительно касательной прямой aa' (рис. 3,а). В идеализированном варианте с $K_{\text{кк}} = 1$ объем и масса ЭТС секции с полукруглым сечением определяется площадью заготовки ЭТС для ее навивки, ограниченной сплошной прямой и прерывистой кривой линиями. Площадь ЭТС реальной заготовки секции магнитопровода с $K_{\text{кк}} < 1$ образована суммарной площадью упомянутых выше четырехугольных участков, ограниченных сплошными прямыми линиями (рис. 4).

На основе геометрического моделирования установлена практическая идентичность объемов тел образованных вращением полуокружности диаметра $D_{\text{с}}$ и треугольника idj со сторонами равными $D_{\text{с}}$ относительно прямой aa' при условии совмещения id с $D_{\text{с}}$, а также положений aa' и ij под углом $\pi/3$ к оси OO'' (рис. 3,а).

Расстояние от вершины d треугольника idj до прямой aa' , определяется на основе (9) и (10)

$$dd' = (b_{\text{ск}} - b_{\text{ок}})/2 = 0,4665 D_{\text{вк}} (a_{\text{м}} - 1) . \quad (11)$$

Радиус вращения $d'd''$ стороны ij относительно линии aa' , центр тяжести $i'd''$ и площадь S_{idj} треугольника idj определяются с использованием (7) и (11):

$$d'd'' = dd' - D_{\text{к}} \sin(\pi/3) = 0,03249 D_{\text{вк}} (a_{\text{м}} - 1); \quad (12)$$

$$i'd'' = D_{\text{к}} \text{tg}(\pi/6)/2 = D_{\text{вк}} (a_{\text{м}} - 1) / (4\sqrt{3}); \quad (13)$$

$$S_{idj} = D_{\text{к}}^2 \sqrt{3} / 4 = 0,108253 D_{\text{вк}}^2 (a_{\text{м}} - 1)^2 . \quad (14)$$

Объем угловых зон секции магнитопровода ЭМС (рис. 1,а)

$$V_{\text{ук}} \approx 2\pi(d'd'' + i'd'') S_{idj} = 0,12028 D_{\text{вк}}^3 (a_{\text{м}} - 1)^3 . \quad (15)$$

Масса магнитопровода ЭМС (рис. 1) определяется, с учетом (4) и при подстановке (7), (9) и (15), уравнением

$$m_{\text{МК}} \approx 3\gamma_{\text{с}} K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} \left(\pi D_{\text{к}}^2 h_{\text{ок}} / 4 + \pi D_{\text{к}}^2 b_{\text{ок}} / 4 + V_{\text{ук}} \right) =$$

$$= 0,5496 \gamma_{\text{с}} K_{\text{зс}} K_{\text{кк}} D_{\text{вк}}^3 [(\lambda_{\text{о}} + 1)(1 - 0,0718 a_{\text{м}}) \times$$

$$\times (a_{\text{м}} - 1)^2 + 0,656544 (a_{\text{м}} - 1)^3] \quad (16)$$

Из равенства (5) и (8), с учетом (4) и (9), следует:

$$S_{СК} = \Pi_{И} / (K_{30} \lambda_0 b_{OK}^2) = \pi K_{3C} K_{KK} D_{BK}^2 (a_M - 1)^2 / 16;$$

$$D_{BK} = 1,555 \sqrt[4]{\Pi_{И} / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]}, \quad (17)$$

где $f_K(a_M, \lambda_0)$ – составляющая (17) в виде произведения,

$$f_K(a_M, \lambda_0) = \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 1)^2.$$

Подстановка (17) преобразует (16) к виду

$$m_{МК} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{МК}^*, \quad (18)$$

где $\Pi_{МК}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 1),

$$\Pi_{МК}^* \approx 2,0665 K_{3C} K_{KK} \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times$$

$$\times \left[(\lambda_0 + 1) (1 - 0,0718 a_M) (a_M - 1)^2 + 0,65654 (a_M - 1)^3 \right] \quad (19)$$

Средняя длина витка каждой из фазных катушек ЭМС (рис. 1) определяется на основе (7) и (9)

$$l_{WK} = \pi (D_K + b_{OK} / 2) = 1,46555 D_{BK} (a_M - 0,07181). \quad (20)$$

С использованием (4) и (9), а также подстановки (20), уравнение (6) представляется в виде

$$m_{OK} = 1,5 \gamma_0 K_{30} \lambda_0 b_{OK}^2 l_{WK} = 1,91362 \gamma_0 K_{30} \lambda_0 \times$$

$$\times D_{BK}^3 (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181). \quad (21)$$

Подстановкой (17), (21) преобразуется

$$m_{OK} = \gamma_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{МОК}^*, \quad (22)$$

где $\Pi_{МОК}^*$ – относительный показатель массы обмоточного провода ЭМС (рис. 1),

$$\Pi_{МОК}^* = 7,1953 K_{30} \lambda_0 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \times$$

$$\times (1 - 0,0718 a_M)^2 (a_M - 0,07181). \quad (23)$$

Масса $m_{ак}$ и стоимость $C_{ак}$ активных материалов ЭМС (рис. 1) определяется на основе (18) – (19) и (22), (23) уравнениями вида (1):

$$m_{ак} = m_{МК} + m_{OK} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{мак}^*;$$

$$C_{ак} = C_{МК} + C_{OK} = \gamma_c C_0 \left(\sqrt[4]{\Pi_{И}} \right)^3 \Pi_{сак}^*,$$

где $\Pi_{мак}^*$ и $\Pi_{сак}^*$ – соответствующие (2) относительные показатели,

$$\Pi_{мак}^* \approx 2,0665 \left(\sqrt[4]{1 / [K_{3C} K_{30} K_{KK} f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3C} K_{KK} \times$$

$$\times [(\lambda_0 + 1) (1 - 0,0718 a_M) (a_M - 1)^2 + 0,65654 (a_M - 1)^3] +$$

$$+ 3,48188 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 \times$$

$$\times (a_M - 0,07181) \gamma_0 / \gamma_c \}; \quad (24)$$

$$\Pi_{сак}^* \approx 2,0665 \left(\sqrt[4]{1 / K_{3C} K_{30} K_{KK} [f_K(a_M, \lambda_0)]} \right)^3 \{ K_{3C} K_{KK} \times$$

$$\times [(\lambda_0 + 1) (1 - 0,0718 a_M) (a_M - 1)^2 + 0,65654 (a_M - 1)^3] +$$

$$+ 3,4819 K_{30} \lambda_0 (1 - 0,0718 a_M)^2 \times$$

$$\times (a_M - 0,07181) C_0 \gamma_0 / (C_c \gamma_c) \}.$$

Экстремальные значения $\Pi_{мак}^*$ и $\Pi_{сак}^*$ функциональных зависимостей (24), (25), полученные для трех значений K_{30} и двух (идеализированном и реальном) значений K_{KK} приведены в табл. 1, 2 в сравнении с аналогичными значениями $\Pi_{мап}^*$ и $\Pi_{сап}^*$ [7] традиционной конструкции планарной ЭМС с прямоугольным сечением стержней шихтованного магнитопровода [2, 4]. Показатели $\Pi_{мак}^*$, $\Pi_{сак}^*$ и $\Pi_{мап}^*$, $\Pi_{сап}^*$ определены при

использовании медного обмоточного провода и анизотропной ЭТС марки 3407 с соотношением плотностей ($кг/м^3$) $\gamma_0/\gamma_c = 8,9/7,65$ и стоимостей $C_0/C_c = 4$, а также $K_{3C} = 0,97$ [8].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССОСТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ С ШЕСТИГРАННЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ КОНТУРАМИ

Обоснование вида уравнений (1) и (2) соответствующих ЭМС (рис. 2) выполняется с представлением в виде функций от α_c и (3) размеров радиальной a_{c1} и угловой a_{c2} ширин, а также сторон b_{c1} и b_{c2} стержня магнитопровода:

$$a_{c1} = (D_{внш} - D_{внш}) / 2 = D_{внш} (a_M - 1) / 2; \quad (26)$$

$$a_{c2} = (D_{внш} + a_{c1}) \operatorname{tg}(\alpha_c / 2) = D_{внш} f_{ш1}(a_M, \alpha_c) / 2; \quad (27)$$

$$b_{c1} = a_{c2} / [2 \sin(\pi/3)] = D_{внш} f_{ш1}(a_M, \alpha_c) / (2\sqrt{3}); \quad (28)$$

$$b_{c2} = a_{c1} - 2b_{c1} \sin(\pi/6) = D_{внш} f_{ш2}(a_M, \alpha_c) / 2, \quad (29)$$

где $f_{ш1}(a_M, \alpha_c)$ и $f_{ш2}(a_M, \alpha_c)$ – сомножители,

$$f_{ш1}(a_M, \alpha_c) = (a_M + 1) \operatorname{tg}(\alpha_c / 2); \quad (30)$$

$$f_{ш2}(a_M, \alpha_c) = a_M - 1 - f_{ш1}(a_M, \alpha_c) / \sqrt{3}. \quad (31)$$

Площадь ЭТС сечения $abcdef$ (рис. 2) определяется, с учетом (26) – (31), уравнением

$$S_{сш} = K_{3C} [b_{c1} a_{c2} \sin(\pi/6) + b_{c2} a_{c2}] =$$

$$= K_{3C} D_{внш}^2 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c) / 4, \quad (32)$$

где $f_{ш3}(a_M, \alpha_c)$ – сомножитель,

$$f_{ш3}(a_M, \alpha_c) = a_M - 1 - f_{ш1}(a_M, \alpha_c) / (2\sqrt{3}). \quad (33)$$

Ширина обмоточного окна ЭМС (рис. 2)

$$b_{ош} = D_{внш} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{внш} / 2. \quad (34)$$

Геометрические параметры $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ секции (рис. 3,а) магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяются на основе (28), (29):

$$b_{ш1} = b_{c1} \sin(\pi/3) = D_{внш} f_{ш1}(a_M, \alpha_c) / 4; \quad (35)$$

$$b_{ш2} = b_{c2} \sin(\pi/3) = \sqrt{3} D_{внш} f_{ш2}(a_M, \alpha_c) / 4. \quad (36)$$

Число витков ЭТС толщиной δ_c в участках ширины $b_{ш1(2)}$ (рис. 3,а)

$$n_{вш1(2)} = b_{ш1(2)} / \delta_c. \quad (37)$$

Средние длины витков ЭТС секции магнитопровода $l_{вш1(2)}$ ЭМС (рис. 2) на участках $b_{ш1(2)}$ находятся исходя из (4) и (34) – (36):

$$l_{вш1} = 2(h_{ош} + b_{ош}) + 2\pi(b_{ш2} + b_{ш1}/2) =$$

$$= \sqrt{3} D_{внш} F_{ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_c); \quad (38)$$

$$l_{вш2} = 2(h_{ош} + b_{ош}) + \pi b_{ш2} =$$

$$= \sqrt{3} D_{внш} F_{ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_c), \quad (39)$$

где $F_{ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)$ и $F_{ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_c)$ – сомножители,

$$F_{ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{ш3}(a_M, \alpha_c) / 2; \quad (40)$$

$$F_{ш2}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) = 1 + \lambda_0 + \pi f_{ш2}(a_M, \alpha_c) / 4. \quad (41)$$

Длины треугольного $l_{ш1}$ и прямоугольного $l_{ш2}$ участков заготовки ЭТС (рис. 4) для навивки секций магнитопровода ЭМС (рис. 2) представляются на основе (37) – (41) выражениями:

$$l_{ш1} = n_{вш1} l_{вш1} = \sqrt{3} D_{внш}^2 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) \times$$

$$\times F_{ш1}(a_M, \lambda_0, \alpha_c) / (4\delta_c); \quad (42)$$

$$l_{ш2} = n_{вш2} l_{вш2} = 3 D_{вш}^2 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) \times (43) \\ \times F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) / (4 \delta_c).$$

Масса ЭТС магнитопровода ЭМС (рис. 2) определяется с использованием (28) и (42), (43)

$$m_{мш} = 3 \gamma_c K_{3c} \delta_c (b_{c1} l_{ш2} + b_{c1} l_{ш1} / 2) = \\ = 0,1875 \gamma_c K_{3c} D_{вш}^3 [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + (44) \\ + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)].$$

Из равенства (5) и (32), с учетом (4), (30) и (32) – (34) следует:

$$S_{сш} = \Pi_{и} / (K_{3o} \lambda_o b_{ош}^2) = \\ = K_{3c} D_{вш}^2 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c) / 4; \\ D_{вш} = 2 \sqrt{\Pi_{и} / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]}. (45)$$

Подстановка (45) преобразует (44) к виду

$$m_{мш} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{мш}^*, (46)$$

где $\Pi_{мш}^*$ – относительный показатель массы магнитопровода ЭМС (рис. 2),

$$\Pi_{мш}^* = \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times 1,5 K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + (47) \\ + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)].$$

Средняя длина витка фазной катушки ЭМС (рис. 2) представляется, исходя из (28), (29) и (34) выражением

$$l_{вш} = 4 b_{c1} + 2 b_{c2} + \pi b_{ош} / 2 = 1,1547 D_{вш} \times \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] (48)$$

После подстановки (4), (34) и (48) уравнение (6) принимает вид

$$m_{ош} = 1,5 \gamma_o K_{3o} \lambda_o b_{ош}^2 l_{вш} = 1,299 \gamma_o K_{3o} \lambda_o D_{вш}^3 \times \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] (49)$$

С использованием (45), (49) преобразуется

$$m_{ош} = \gamma_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{мош}^*, (50)$$

где $\Pi_{мош}^*$ – относительный показатель массы обмоточного провода ЭМС (рис. 2),

$$\Pi_{мош}^* = 10,392 K_{3o} \lambda_o \times \\ \times \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times (51) \\ \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781].$$

Масса $m_{аш}$ и стоимость $C_{аш}$ активных материалов ЭМС (рис. 2) определяется на основе (46), (47) и (50), (51) уравнениями вида (1):

$$m_{аш} = m_{мш} + m_{ош} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{аш}^* ;$$

$$C_{аш} = C_{мш} + C_{ош} = \gamma_c C_o \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 \Pi_{саш}^* ,$$

где $\Pi_{аш}^*$ и $\Pi_{саш}^*$ – относительные показатели массы и стоимости, определяющиеся соответствующими (2) выражениями:

$$\Pi_{аш}^* = 1,5 \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) \times (52) \\ \times f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928 K_{3o} \lambda_o \times \right. \\ \left. \times [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] \gamma_o / \gamma_c \right\} ;$$

$$\Pi_{саш}^* = 1,5 \left(\sqrt[4]{1 / [3 K_{3c} K_{3o} \lambda_o f_{ш1}(a_M, \alpha_c) f_{ш3}(a_M, \alpha_c)]} \right)^3 \times \\ \times \left\{ K_{3c} [f_{ш1}^2(a_M, \alpha_c) F_{ш1}(a_M, \lambda_o, \alpha_c) + 3,4641 f_{ш1}(a_M, \alpha_c) \times (53) \\ \times f_{ш2}(a_M, \alpha_c) F_{ш2}(a_M, \lambda_o, \alpha_c)] + 6,928 K_{3o} \lambda_o [f_{ш1}(a_M, \alpha_c) + \right. \\ \left. + 0,866 f_{ш2}(a_M, \alpha_c) + 1,1781] C_o \gamma_o / (C_c \gamma_c) \right\} .$$

Экстремальные значения $\Pi_{аш}^*$ и $\Pi_{саш}^*$ функциональных зависимостей (52), (53) при удельных характеристиках, K_{3c} , K_{3o} и соотношении C_o/C_c , аналогичных ЭМС (рис. 1), приведены в табл. 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

В табл. 1, 2 приведены минимальные значения показателей $\Pi_{аш}^*$, $\Pi_{саш}^*$ в сравнении с аналогичными значениями показателей массы $\Pi_{мак}^*$, $\Pi_{сак}^*$ и $\Pi_{саш}^*$, $\Pi_{саш}^*$. Показатели $\Pi_{аш}^*$ и $\Pi_{саш}^*$ ЭМС (рис. 2) определены при удельных характеристиках, K_{3c} , K_{3o} и соотношении C_o/C_c , аналогичных ЭМС (рис. 1).

Таблица 1

Оптимальные значения показателей массы вариантов электромагнитных систем с анизотропными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель массы, о.е.			
	$\Pi_{аш}^*$	$\Pi_{мак}^*$		$\Pi_{саш}^*$
		$K_{кк}=1$	$K_{кк}=0,904$	
0,3	27,765	25,282	25,802	25,555
0,25	29,319	26,736	27,256	27,006
0,2	31,424	28,704	29,225	28,972

Таблица 2

Оптимальные значения показателей стоимости вариантов электромагнитных систем с анизотропными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель стоимости, о.е.			
	$\Pi_{аш}^*$	$\Pi_{сак}^*$		$\Pi_{саш}^*$
		$K_{кк}=1$	$K_{кк}=0,904$	
0,3	55,501	49,928	51,393	50,745
0,25	57,699	51,993	53,458	52,804
0,2	60,677	54,787	56,253	55,591

Анализ зависимостей (19), (23), (47), (51) и результаты определения минимумов унимодальных функций (24), (25) и (52), (53), а также расчетов зависимостей минимумов (25) и (53) от соотношения C_o/C_c (табл. 3) показывает, что структурное преобразование ЭМС (рис. 1) до вида (рис. 2) сопровождается снижением и повышением массы и стоимости соответственно ЭТС магнитопровода и медного обмоточного провода. При этом достигается некоторое снижение результирующих оптимизированных значений массы и стоимости активной части.

В настоящее время важной составляющей прогресса в разработках трансформаторов продолжает оставаться фактор усовершенствования ЭТС. Наибольший эффект от применения новых анизотропных ЭТС с уменьшенной толщиной проката и повышенной рабочей индукцией, а также ленточных аморфных ЭТС достигается в ЭМС с витой пространственной конструкцией магнитопровода [8].

В табл. 4 приведены соответствующие $K_{кк}=0,904$ минимальные значения показателей $\Pi_{мак}^*$, а также минимальные значения $\Pi_{аш}^*$, $\Pi_{саш}^*$, которые определены при использовании медного обмоточного провода и аморфной ЭТС с $\gamma_o/\gamma_c = 8,9/7,32$ и $K_{3c}=0,8$ [8].

Таблица 3

Оптимальные значения показателей стоимости электромагнитной системы (рис. 1) с $K_{\text{кк}}=0,904$ и электромагнитной системы (рис. 2) с анизотропными магнитопроводами

Показатель стоимости, о.е.	Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Соотношение стоимостей обмоточной меди и электро-технической стали, о.е.		
		3,5	4,5	5,5
$P_{\text{сакз}}^*$	0,3	51,652	59,19	66,171
	0,25	53,778	61,454	68,551
	0,2	56,658	64,52	71,776
$P_{\text{сакэ}}^*$	0,3	47,847	54,787	61,21
	0,25	49,843	56,914	63,448
	0,2	52,545	59,794	66,479
$P_{\text{сашз}}^*$	0,3	47,256	54,084	60,401
	0,25	49,247	56,204	62,632
	0,2	51,942	59,076	65,653

Таблица 4

Оптимальные значения показателей массы вариантов электромагнитных систем с аморфными магнитопроводами

Коэффициент заполнения обмоточного окна, о.е.	Показатель массы, о.е.		
	$P_{\text{мап}}^*$	$P_{\text{мак}}^*$	$P_{\text{маш}}^*$
0,3	29,531	27,437	27,159
0,25	31,103	28,908	28,627
0,2	33,231	30,899	30,615

ВЫВОДЫ

1. Выполненные оптимизационные расчеты показывают, что варианты пространственной аксиальной трехфазной ЭМС с витым стыковым трехсекционным магнитопроводом отличаются от традиционной планарной ЭМС с прямоугольным внешним контуром и прямоугольным сечением стержней улучшенными на 7...8 % и 7,8...8,6 % показателями массы и стоимости.

2. Замена круговых ОК стержней и катушек обмоток на шестигранные ОК на 0,86...0,95 % и 1,14...1,32 % улучшает показатели массы и стоимости аксиальной пространственной ЭМС с медными обмотками и пространственным витым трехсекционным магнитопроводом при использовании для изготовления секций анизотропной ЭТС, а также на 0,92...1 % улучшает показатель массы при использовании аморфной ЭТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В.С. Блинцов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовой // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – № 2. – С. 16-21.
2. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
3. Трансформаторы серий ОСМ, ОСВМ, ОСВМС, ОСЗМ, ОСЗМВ, ТСМВ, ТСЗМ и ТСЗМВ (мощностью от 0,063 до 100 кВ·А). Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОБТ. 140. 240. – М.: Информэлектро, Зак. 1265. – 21 с.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
5. 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.

6. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 79-82.
7. Авдеева Е.А. Сравнительный анализ планарной и пространственной аксиальной трехфазных электромагнитных систем с параллельными образующими стержней и обмоточных окон (массо-стоимостные показатели) // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 4. – С. 15-20.
8. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В.А. Бормосов, М.Н. Костюсова, А.Ф. Петренко, Н.Е. Смольская // Режим доступа: www.trans.-form.ru: 13.09.2004.

Bibliography (transliterated): 1. Blincov V.S., Stavinskij R.A., Avdeeva 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. 2. Majorec A.I., Pshenichnyj G.I., Chcheljuk Ja.Z. i dr. *Magnitoprovody silovyh transformatorov (tehnologija i oborudovanie)*. Moscow, Jenergija Publ., 1973. 272 p. 3. *Transformatory serij OSM, OSVM, OSVMS, OSZM, OSZMV, TSMV, TSZM i TSZMV (moshhnost'ju ot 0,063 do 100 kV·A)*. *Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluataciji OBТ. 140. 240*. Moscow, Informjelektro Publ. 21 p. 4. Tihomirov P.M. *Raschet transformatorov*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 528 p. 5. Stavinskij 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. 6. Stavinskij A.A., Plahtry' O.O., Stavinskij R.A. The quality parameters at structural optimization of spatial electromagnetic systems for tree-phase transformers, reactors and throttles. *Electrical engineering & electromechanics*, 2003, no.4, pp. 79-82. 7. Avdeeva E.A. Comparative analysis of planar and spatial axial three-phase electromagnetic systems with parallel forming surfaces of cores and coil windows (mass and price indexes). *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 15-20. 8. 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).

Поступила (received) 25.08.2013

Авдеева Елена Андреевна¹,
Ставинский Ростислав Андреевич¹, к.т.н., доц.,
¹ Национальный 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

E.A. Avdieieva¹, R.A. Stavinskij¹
¹National University of Shipbuilding after Admiral Makarov
9, Heroes of Stalingrad Avenue, Nikolaev, 54025, Ukraine
**Mass and cost figures for spatial axial three-phase
electromagnetic systems with circular and hexagonal
forming contours of twisted magnetic core rods.**
For a spatial three-phase axial electromagnetic system with double-contour phase elements of the twisted butt-end magnetic core, analytical dependences for optimal geometrical relations determination over minimum active part weight and cost criteria are obtained, advantages of the core elements hexagonal cross-section configuration shown.
Key words – three-phase electromagnetic system, twisted spatial magnetic core, circular and hexagonal forming contours, weight and cost minimum.