

УДК 621.314+621.316

А. А. Ставинский, д-р техн. наук,
Р. А. Ставинский, канд. техн. наук,
Е. А. Авдеева

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ОБРАЗУЮЩИХ КОНТУРОВ

Рассмотрены примеры формирования структур и возможности повышения компактности, надежности, а также снижения материалоемкости, трудоемкости производства и потерь активной мощности пространственных электромагнитных систем трансформаторов и реакторов на основе секторной и шестигранной конфигураций образующих контуров катушек обмоток и стержней вариантов шихтованных, витых и комбинированных стыковых магнитопроводов.

Ключевые слова: трансформатор, реактор, пространственная электромагнитная система, магнитопровод, обмотка, стержень, катушка, круговые, секторные, шестигранные, образующие контуры, компактность, надежность, материалоемкость, трудоемкость, потери

A. A. Stavinskiy, ScD.,
R. A. Stavinskiy, PhD.,
E. A. Avdieieva

THE STRUCTURAL CONVERSION OF STATIC ELECTROMAGNETIC SYSTEMS BASED ON NON-TRADITIONAL FORM OF CONTOURS

The examples of structure formation and the possibility of increasing the compactness, reliability and reducing the consumption of materials, labor intensity of production and active power losses of spatial electromagnetic systems of transformers and reactors on the basis of sectorian and hexagonal configurations of forming contours of coil windings and rods of laminated, twisted and combined butted magnetic cores variants are considered.

Keywords: transformer, reactor, spatial electromagnetic system, magnetic core, winding, rod, coil, circular, sectorian, hexagonal, forming contours, compactness, reliability, material consumption, labor intensity, losses

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

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР СТАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НЕТРАДИЦІЙНИХ УТВІРНИХ КОНТУРІВ

Розглянуто приклади формування структур і можливості підвищення компактності, надійності, а також зниження матеріаломісткості, трудомісткості виробництва і втрат активної потужності просторових електромагнітних систем трансформаторів і реакторів на основі секторної і шестигранної конфігурацій утворюючих контурів котушок обмоток і стрижнів варіантів шихтованих, кручених і комбінованих стикових магнітопроводів.

Ключові слова: трансформатор, реактор, просторова електромагнітна система, магнітопровід, обмотка, стрижень, катушка, кругові, секторні, шестигранні, утворюючі контури, компактність, надійність, матеріаломісткість, трудомісткість, втрати.

Конструктивные и структурные схемы планарных электромагнитных систем (ЭМС) большинства используемых в производстве трансформаторов, реакторов и дросселей [3, 5, 10, 11] являются практически неизменными на протяжении более столетия и характеризуются прямоугольными и круговыми образующими контурами (ОК) витков катушек обмоток и сечений стержней магнитопроводов (рис. 1). Некоторое снижение потерь холостого хода и материалоемкости указанных

индукционных статических устройств (ИСУ) достигнуто во второй половине прошедшего века применением взамен изотропной листовой анизотропной рулонной электротехнической стали (ЭТС), а также пространственных ЭМС с витыми и комбинированными (витые ярма, шихтованные стержни) магнитопроводами [3, 8, 10]. Однако реализованные практически пространственные ЭМС, как и их планарные аналоги, разработаны на основе «традиционных» ОК (рис. 1) [3, 5, 8], что снижает их эффективность.

© Ставинский А.А., Ставинский Р.А.,
Авдеева Е.А., 2013

В последние десятилетия использовались оставшиеся «резервы» усовершенствования ЭМС с ОК (рис. 1) и новейшие достижения электроматериаловедения. В шихтованных планарных магнитопроводах выполнена, невзирая на значительное усложнение производства, замена «прямых» стыков на «косые» стыки [1, 3, 5]. При изготовлении современных трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А, с целью обеспечения повышенной защиты от окружающей среды, электродинамической устойчивости и энергетической эффективности, применяются «вакуумная» и «ривинговая» технологии капсулирования витков и катушек обмоток [1]. Для замены «обычных» созданы транспонированные и ленточные обмоточные провода, осуществляется перевод производства магнитопроводов трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А на ленточную аморфную (нано-кристаллическую) ЭТС [1, 5]. В ближайшем будущем прогресс в развитии ИСУ планируется достигнуть также использованием новых материалов, в частности в трансформаторах с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками, «элегазовой», «кабельной» и «гибридной» изоляцией [4, 12].

Однако возможности энергоресурсосбережения на основе достижений металлургии, изоляционно-кабельной техники и нанотехнологий ограничены пределами физических свойств материалов и высоким коэффициентом полезного действия трансформаторов. Поэтому представляется [6, 7], что дальнейшее развитие ИСУ возможно преобразованиями конфигураций элементов ЭМС. Кроме производства эффективных распределительных ИСУ существует необходимость разработки и усовершенствования компактных, маломагнитных и виброударостойких «нетрадиционных» конструкций трансформаторов, предназначенных для встраивания в цилиндрические и сферические оболочки ограниченного диаметра [7, 9].

На основе изложенного поиск новых нетрадиционных конструктивных решений задач снижения потерь и материалоемкости, а также повышения компактности и надежности ИСУ различного назначения представляет особую актуальность.

Целью работы является анализ возможностей повышения технического уровня ИСУ преобразованием конфигураций элементов пространственных ЭМС на основе нетрадиционных ОК.

Традиционные ОК обмоточных катушек и сечений стержней (рис.1) обуславливают известные недостатки планарных и пространственных ЭМС [3, 5, 8]. Прямоугольная форма катушки (левая часть рис. 1) повышает среднюю длину витка и снижает прочность изоляции при малом радиусе округления в угловой части прямоуглольно изогнутого проводника [8]. Круговая кольцевая форма катушки (правая часть рис. 1) обеспечивает минимальную среднюю длину витка, но существенно усложняет технологию производства магнитопроводов, так как относительно высокий коэффициент заполнения кругового ОК сечения стержня $K_{ко} = 0,927 \dots 0,931$ достигается использованием 14 – 16 пакетов пластин (листов) или рулонов ЭТС различной ширины в половине окружности [3, 8]. При этом установлено [2], что деформации изгиба и внутренние остаточные напряжения, возникающие при намотке круговых витков обмоточных катушек, складываясь с напряжениями от электромагнитных сил, приводят к значительному снижению электродинамической устойчивости ИСУ.

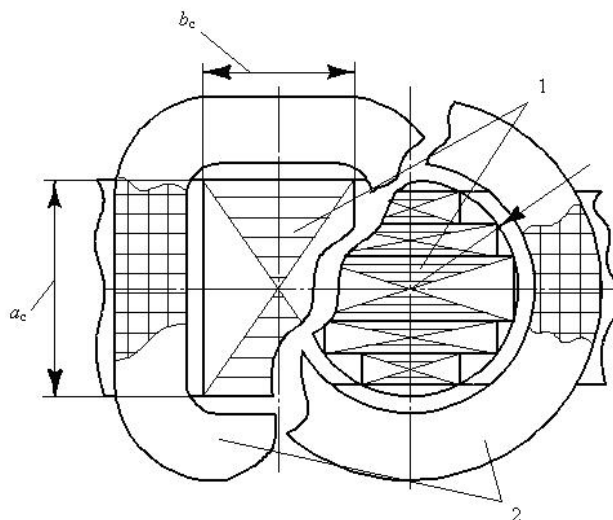


Рис. 1. Традиционные конфигурации стержней (1) и обмоточных катушек (2) индукционных статических устройств

На рис. 2, а представлена схема поперечного сечения пространственной аксиальной ЭМС с традиционными круговыми ОК, характеризующаяся тем, что каждая из трех секций поперечного сечения (рис. 2, б) [3, 8] сформирована из отдельных лент или сплошной ленты ЭТС изменяющейся ширины. При спиральной навивке каждой секции витки ленты смещаются в осевом направлении. В пределах половины ОК стержня формируются трапецеидальные – четырехугольные сечения участков секций с двумя сторонами, параллельными оси OO' (рис. 2, б). Коэффициент заполнения кругового ОК стержня $K_{ко}$ указанными участками для трансформаторов мощностью до 1000 кВ·А постоянен, составляет постоянное значение 0,904 [8].

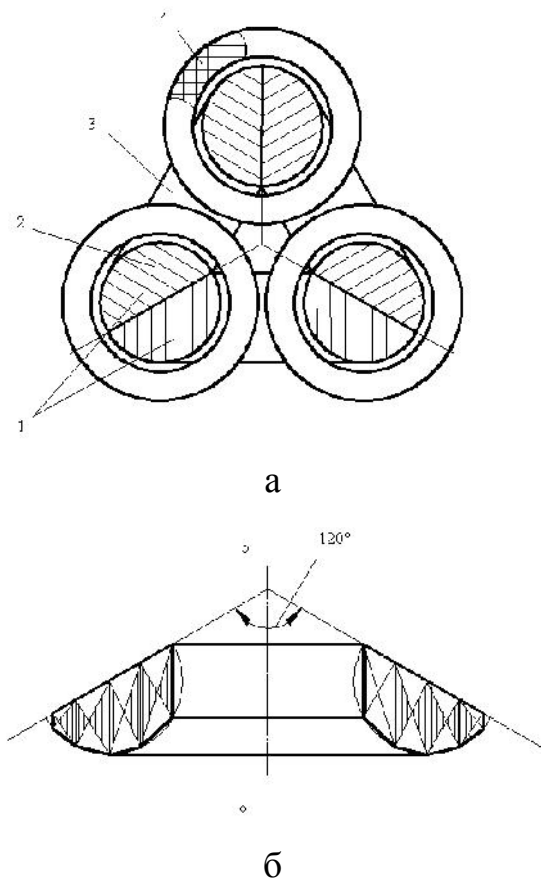


Рис. 2. Конструктивная схема аксиальной электромагнитной системы с круговыми образующими контурами стержней витого трехсекционного магнитопровода (а) и его секция (б):

1 – стержень; 2 – стержневой участок фазного элемента; 3 – яремный участок фазного элемента; 4 – катушка обмотки

Конкурентоспособность нетрадиционных конструкций и конфигураций ЭМС относительно их классических аналогов обеспечивается при исключении ухудшения технических и экологических показателей производства вновь разрабатываемых ИСУ. При этом должно обеспечиваться достижение хотя бы одного из возможных результатов преобразования ЭМС: снижение удельной материалоёмкости, массы и габаритных размеров ИСУ, снижение основных и добавочных потерь, снижение трудоёмкости и технологической энерго-и материалоёмкости производства.

Предложены нетрадиционные, в том числе отличающиеся удобством встраивания в цилиндрические и сферические объемы и оболочки ограниченного диаметра, варианты пространственных аксиальных и радиальных ЭМС однофазных и трехфазных ИСУ на основе секторных и $n \geq$ шестигранных ОК катушек обмоток и стержней шихтованных, витых и комбинированных магнитопроводов [6, 7].

Примеры преобразования конфигураций элементов аксиальных ЭМС трехфазных ИСУ на основе стыковых витых, а также комбинированных магнитопроводов представлены на рис. 3. В левой части рис. 3 показана схема ЭМС с секторными ОК и стержнями из разрезанных коаксиальных заготовок, образованных спиральной навивкой рулонной ЭТС. Такое конструкторско-технологическое решение обуславливает параллельность стенок обмоточных окон и совмещение периферийных контуров стержней с угловыми участками контуров витых ярем, что повышает компактность и создает высокое заполнение контурного объема диаметра D_k , а также удобство встраивания ИСУ в цилиндрические оболочки. В правой части рис. 3 показана схема ЭМС и магнитопровода с витыми ярями и шестигранными ОК сечений стержней из одинаковых прямоугольных слоев ЭТС. Такая идентичность обеспечивает снижение трудоёмкости производства указанного магнитопровода относительно магнитопровода традиционной ЭМС с криволинейными ОК стержней (правая часть рис. 1). Создается возможность производства ИСУ с улучшенными показателями компактности, массы, габаритов и маломаг-

нитности (рис. 4) предназначенных, например для использования в подводных и авиационно-космических аппаратах [9].

Конфигурация сечения стержня в виде равностороннего шестигранника из идентичных прямоугольных слоёв ЭТС может быть использована в трёхфазных ЭМС со стыковыми комбинированными магнитопроводами (рис. 5). Аналогичная конфигурация стержней может применяться в однофазных ЭМС с витыми броневыми трехконтурными магнитопроводами схемы (левая часть рис. 6), а также в однофазных и трехфазных ЭМС с шихтованными «впереплёт» броневыми магнитопроводами (правая часть рис. 6).

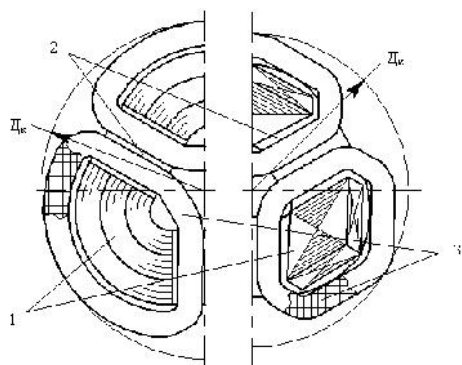


Рис. 3. Конфигурации элементов вариантов аксиальной компактной электромагнитной системы со стыковым магнитопроводом: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки



Рис. 4. Трёхфазный трансформатор с пространственным стыковым магнитопроводом мощностью 6,3 кВ·А

Повысить компактность ЭМС (рис. 2) формированием участков обмоточных окон с параллельными стенками и упростить технологию изготовления аксиального витка трехсекционного стыкового (разрезного) магнитопровода на основе шестигранных ОК

(рис. 7, а) возможно навивкой его симметричных секций из заготовок ЭТС (рис. 7, б). Такие заготовки выполняются «безотходным» разделением исходной ленты (рулона) ЭТС прямоугольной развертки $aa'e'e'a'$ на две идентичные части, содержащие прямоугольные $abda'$ и $b'ee'd'$, а также треугольные bcd и $b'c'd'$ участки. В процессе навивки секции каждый последующий виток ЭТС толщиной $\delta_{\text{ЭТС}}$ смещается тангенциально на постоянную величину $\Delta_{\text{см}} = \delta_{\text{ЭТС}} \text{tg } 30^\circ$.

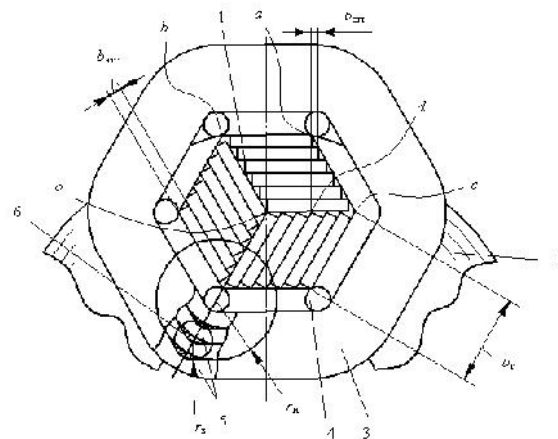


Рис. 5. Особенности конструкции электромагнитной системы с шестигранными конфигурациями стержней и обмоточных катушек:

1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – опорный изоляционный элемент; 5 – витковый элемент катушки; 6 – вертикальная изоляционная прокладка

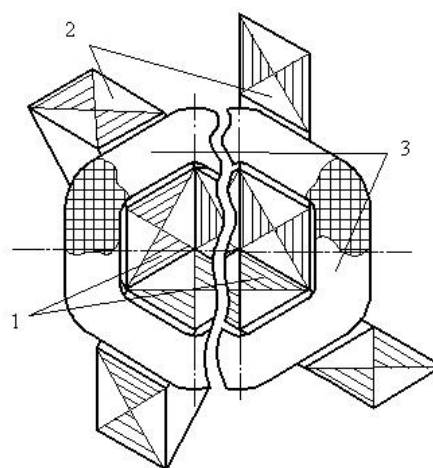


Рис. 6. Варианты аксиальной электромагнитной системы с шестигранными конфигурациями катушек обмоток и сечений стержней: 1–стержень; 2–элемент ярма; 3–катушка обмотки

На рис. 8, а изображена схема поперечного сечения радиальной ЭМС с трехсекционным витым разрезным магнитопроводом. Замена традиционных прямоугольных конфигураций катушек на симметричные шестигранные, соответствующие форме сечений стержней (рис. 8, б), уменьшает среднюю длину обмоточных витков и механическую деформацию угловых зон, что снижает материалоемкость и повышает надежность ИСУ. Стержни с сечением (рис. 8, б) могут быть сформированы выполнением магнитопровода в целом или его торцевых частей из витых элементов с поперечным сечением в виде прямоугольной трапеции. Такое сечение создается спиральной навивкой без осевого смещения витков двух элементов (рис. 8, в) или двух торцевых (крайних) элементов каждой секции магнитопровода из лент $abcd$ ($a'b'dc$), полученных «безотходным» разделением по прямой cd прямоугольной развертки $a'b'ba$ ЭТС (рис 8, в).

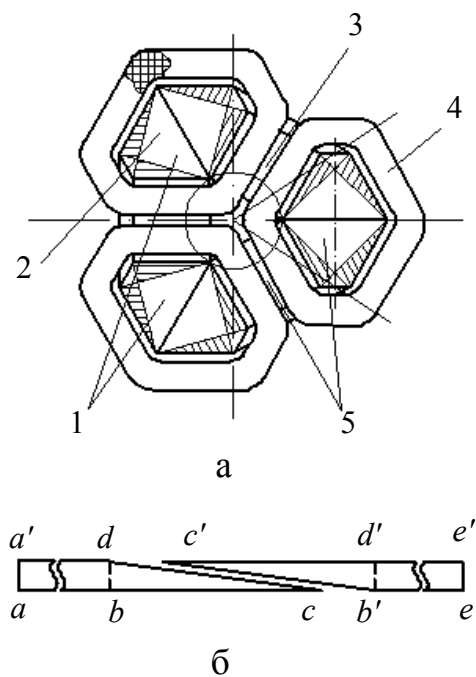


Рис. 7. Конструктивная схема компактной аксиальной электромагнитной системы с шестигранными конфигурациями стержней витого трехсекционного магнитопровода (а) и схема раздела ленты стали для навивки секций (б): 1 – стержень; 2 и 3 – стержневой и яремный участки фазного элемента; 4 – катушка обмотки; 5 – секция магнитопровода

Особенностью структур ЭМС (рис. 5 – рис. 8) является наличие участков витков и катушек обмоток образованных прямыми линиями пересекающимися в ОК под углами 120° . В этих участках исключаются (возникающие по всей длине витков ЭМС с криволинейными ОК) деформации изгиба и остаточные механические напряжения волокон проводников [2]. Возможные повреждения изоляции, зоны деформации и механические напряжения витков катушек (рис. 5 – рис. 8) концентрируются в местах изгиба проводников на осях вершин шестигранника [6]. Однако в этих зонах электрическая и механическая прочность катушек обмотки усиливается дополнительной изоляцией и опорно – изоляционными элементами (прокладками и прошивными рейками). Для повышения надежности обмоток прошивные рейки и вертикальные опорно – изоляционные прокладки должны выполняться с формой поперечного сечения, которая соответствует внутреннему r_v и наружному r_n радиусам округлений витков (рис. 5) [6].

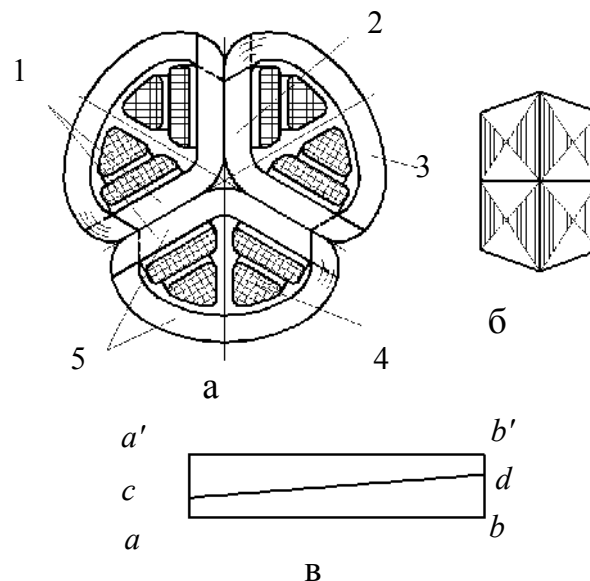


Рис. 8. Конструктивная схема радиальной электромагнитной системы с шестигранными конфигурациями стержней витого трехсекционного магнитопровода (а), поперечное сечение стержня (б) и схема заготовки ленты стали для навивки элементов секции (в): 1 – стержень; 2 – стержневой участок секции; 3 – яремный участок секции; 4 – катушка обмотки; 5 – секция магнитопровода

Средние длины витков и материалоемкость обмоток ИСУ определяются периметром ОК сечения стержня. Для возможности сравнения периметров стержней традиционных (рис. 1) и нетрадиционных шестигранных конфигураций необходимо определить степень заполнения ЭТС ОК стержня (рисунки 5 и 6).

Число элементарных слоёв $n_{эс}$ ЭТС в сечении стержня ограничено шестью равными гранями b_r (рис. 5)

$$n_{эс} = 3ad / (K_{зс} \delta_{эс}) = 1,5\sqrt{3}b_r / (K_{зс} \delta_{эс}), \quad (1)$$

где ad , $K_{зс}$ и $\delta_{эс}$ – соответственно высота образующего ромба $aboc$ сечения стержня, коэффициент заполнения сталью [8] и толщина элементарного слоя ЭТС магнитопровода,

$$ad = ao \sin(\pi/3) = \sqrt{3}b_r / 2. \quad (2)$$

Величина смещения элементарного слоя ЭТС в пределах ромба $aboc$ определяется соотношением

$$b_{см} = K_{зс} \delta_{эс} \operatorname{tg}(\pi/6) = K_{зс} \delta_{эс} / (\sqrt{3}). \quad (3)$$

Часть площади шестигранника, незаполненная слоями ЭТС, определяется с использованием (1) и (3) соотношением

$$\Delta S_{ш} = n_{эс} \delta_{эс} b_{см} = 1,5b_r \delta_{эс}. \quad (4)$$

Площадь равностороннего образующего шестигранника стержня определяется, с учетом (2), соотношением

$$S_{ш} = 6oc \cdot ad / 2 = 3b_r ad = 1,5\sqrt{3}b_r^2. \quad (5)$$

Составляющая площади контура сечения стержня магнитопровода $S_{мш}$ в шестигранном ОК (рис. 5) и коэффициент заполнения указанного контура сечением стержня $K_{кш}$ определяются, на основе (4) и (5) так:

$$S_{мш} = S_{ш} - \Delta S_{ш} = 1,5\sqrt{3}b_r^2 - 1,5b_r \delta_{эс} = 1,5b_r (\sqrt{3}b_r - \delta_{эс}); \quad (6)$$

$$K_{кш} = S_{мш} / S_{ш} = 1 - \delta_{эс} / (\sqrt{3}b_r). \quad (7)$$

Из (7) следует, что при $\delta_{эс} = 0,35$ мм и $b_c = (0,1 \dots 1)$ м коэффициент $K_{кш} = 0,998 \dots 0,9998 \approx 1$.

При соотношении $\lambda_{п}$ сторон a_c и b_c площадь сечения ЭТС стержня прямоугольной конфигурации

$$S_{сп} = K_{зс} a_c b_c = K_{зс} \lambda_{п} b_c^2. \quad (8)$$

В качестве базового аналога сравнения периметров ОК вариантов конфигурации стержней (рисунки 1, 5 и 6) принимается

стержень с эффективной площадью (площадью ЭТС) S_c в квадратном сечении S_k ,

$$S_c = K_{зс} S_k = K_{зс} a^2, \quad (9)$$

где a – сторона квадратного сечения.

Из условия равенства площади ЭТС (9) и площади ЭТС сечения каждого из вариантов стержня с шестигранной, прямоугольной и круговой образующими, через сторону квадрата, a выражаются, на основе (6) – (8), величина грани b_r (рис.5), а также сторона b_c (рис. 1) прямоугольника и радиус r_0 окружности вписанного ступенчатого сечения:

$$S_{сш} = K_{зс} S_{мш} = K_{зс} K_{кш} 1,5\sqrt{3}b_r = K_{зс} a^2;$$

$$b_r = a \sqrt{1 / (1,5\sqrt{3}K_{кш})} = 0,6204a \sqrt{1 / K_{кш}}; \quad (10)$$

$$S_{сп} = K_{зс} \lambda_{п} b_c^2 = K_{зс} a^2;$$

$$b_c = a \sqrt{1 / \lambda_{п}}; \quad (11)$$

$$S_{со} = K_{зс} K_{ко} \pi r_0^2 = K_{зс} a^2;$$

$$r_0 = a \sqrt{1 / (\pi K_{ко})}, \quad (12)$$

где $S_{сш(о)}$, $S_{сп}$ и $S_{со}$ – площади ЭТС стержня с шестигранным, прямоугольным и круговым ОК.

Величины периметров $\Pi_{сш}$, $\Pi_{сп}$ и $\Pi_{со}$ стержней соответственно шестигранного, прямоугольного и кругового сечений определяются с учетом (10) – (12):

$$\Pi_{сш} = 6b_r = 3,7224a \sqrt{1 / K_{кш}}; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{сп} &= 2(a_c + b_c) = 2b_c(1 + \lambda_{п}) = \\ &= 2a(1 + \lambda_{п}) \sqrt{1 / \lambda_{п}}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Pi_{со} = 2\pi r_0 = 2\pi a \sqrt{1 / (\pi K_{ко})}. \quad (15)$$

На основе (13) – (15) можно определить, что при величине периметра квадрата $\Pi_k = 4a$ соотношения $K_{пш}$, $K_{пп}$ и $K_{по}$ периметров стержней эквивалентных площадей ЭТС с шестигранной, прямоугольной и круговой образующими и периметра Π_k составляют:

$$\begin{aligned} K_{пш} &= \Pi_{сш} / \Pi_k = 3,7224a \sqrt{1 / K_{кш}} / (4a) = \\ &= 0,9306 \sqrt{1 / K_{кш}}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} K_{пп} &= \Pi_{сп} / \Pi_k = 2a(1 + \lambda_{п}) \sqrt{1 / \lambda_{п}} / (4a) = \\ &= 0,5(1 + \lambda_{п}) \sqrt{1 / \lambda_{п}}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} K_{по} &= \Pi_{со} / \Pi_k = 2\pi a \sqrt{1 / (\pi K_{ко})} / (4a) = \\ &= 0,5\pi \sqrt{1 / (\pi K_{ко})}. \end{aligned} \quad (18)$$

Соотношения (16) – (18) характеризуют возможности снижения материалоемкости и

потерь активной мощности обмоток ИСУ.

При $K_{кш}=0,998$ и $K_{кш}=0,9998$ соотношения периметров (16) характеризуются значениями $K_{пш}=0,9315$ и $K_{пш}=0,9307$. В трансформаторах малой мощности и дросселях используются магнитопроводы с прямоугольным сечением стержней (левая часть рис. 1), для которых $\lambda_{п}=1,2\dots 1,3$ и, согласно (17), $K_{пш}=1,004\dots 1,0086$. При $K_{ко}=0,861$ и $K_{ко}=0,922$, что соответствует четырём и одиннадцати ступеням в половине круга и диапазону мощности трансформатора до 16000 кВ·А [8], соотношения периметров (18) составляют $K_{по}=0,9551$ и $K_{по}=0,923$.

Полученные значения коэффициентов (16) – (18) показывают, что замена, при условии идентичности площади ЭТС, квадратной конфигурации на шестигранную и круговую уменьшает величину периметра соответственно на 6,85...6,93 % и 4,49...7 %. Это означает, что шестигранные ОК витков катушек и сечений стержней создают предпосылки снижения материалоемкости и потерь обмоток ИСУ относительно их аналогов с прямоугольными и круговыми ОК стержней, характеризующимися $K_{ко} < 0,922$.

Однако в целом, для оценки возможностей усовершенствования ИСУ на основе преобразований элементов ЭМС в соответствии с конструкциями и конфигурациями (рисунки 3 – 8) [6, 7], необходимы аналитические обоснования на основе разработки математических моделей структурной оптимизации ЭМС.

Выводы

1. Трёхфазные пространственные симметричные ЭМС, содержащие магнитопроводы с секторными и шестигранными ОК, повышают компактность ИСУ, а также объектов с комплексами встраиваемого электрооборудования, в частности морского, авиационного и космического назначений.

2. Использование пространственных ЭМС с шестигранными ОК катушек обмоток и сечений стержней снижает трудоемкость производства, а также создает предпосылки повышения надежности и снижения материалоемкости и потерь активной мощности ИСУ с шихтованными, комбинированными и витыми стыковыми магнитопроводами.

Список использованной литературы

1. Кравченко А. Сухие энергосберегающие трансформаторы [Текст] / А. Кравченко, В. Метельский // Электрик. Международный электротехнический журнал. – К. : Радиоаматор, 2013. – № 4. – С. 12 – 15.

2. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов [Текст] / В. И. Лазарев // Техн. электродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 53 – 60.

3. Майорец А. И. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) [Текст] / [А. И. Майорец, Г. И. Пшеничный, Я. З. Чечелюк и др.] – М. : Энергия, 1973. – 272 с.

4. Белкин Г. О первых шагах в реформированной электроэнергетике [Текст] / [Г. Белкин, А. Дробышев, В. Ивакин и др.] // Электроцех. – 2008. – № 9. – С. 13 – 16.

5. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы. Справочная книга [Текст] : под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.

6. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) [Текст] / А. А. Ставинский // Электротехніка і Електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 43 – 47.

7. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (системы с шихтованными и витыми магнитопроводами) [Текст] / А. А. Ставинский // Электротехніка і Електромеханіка. – 2011. – № 6. – С. 33 – 38.

8. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

9. Блинцов В. С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования [Текст] / [В. С. Блинцов, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева и др.] // Электротехніка і Електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 16 – 21.

10. Flanagan W. M. Handbook of transformers design and applications [Text] / W. M. Flanagan. – Boston : Mc Graw Hill, 1993. – 232 p.

11. La Ferve M. S. The core issues; Understanding output transformers / M. S. La Ferve // Part 1 of series Sound Practices foll 1992. – P. 22 – 24.

12. Sissimatos E. Design rules for high-temperature superconducting power transformers / E. Sissimatos, G. Harms, B.R. Oswald // Phisica C. – Vol. 354. – Iss. 1 – 4. – P. 23 – 26.

Получено 26.07.2013

References

1. Kravchenko A. Dry Energy Saving Transformers [Text] / A. Kravchenko, V. Metelskiy // Electric. International Journal of Electrical Engineering. – Kyiv : Radioamator, 2013. – № 4. – P. 12 – 15 [in Russian].

2. Lazarev V. I. Summary of the Studies on the Problem of Electrodynamical Stability of Power Transformers [Text] / V. I. Lazarev // Tech. Elektrodynamika. – 2005. – № 1. – P. 53 – 60 [in Russian].

3. Mayorets A. I. Magnetic Cores of Power Transformers (Technology and Equipment) [Text] / [A. I. Mayorets, G. I. Pshenichniy, Y. Z. Chechelyuk and others]. – Moscow : Energiya, 1973. – 272 p. [in Russian].

4. Belkin G. The First Steps in a Reformed Electricity [Text] / [G. Belkin, A. Drobyshev, V. Ivakin and others] // Electrotseh. – 2008. – № 9. – P. 13 – 16 [in Russian].

5. Lizunova S. D. Power Transformers [Text] : handbook; edited by S. D. Lizunova, A. K. Lohanina. – Moscow : Energoatomizdat, 2004. – 616 p. [in Russian].

6. Stavinskiy A. A. Evolution of Structures and Preconditions for Transformers and Reactors Improvement via Electromagnetic System Circuits Transformation (Electrodynamical Stability and Systems with Combined butt Magnetic Cores) [Text] / A. A. Stavinskiy // Electrical Engineering and Electromechanics. – 2011. № 5. – P. 43 – 47 [in Russian].

7. Stavinskiy A. A. Evolution of Structures and Preconditions for Transformers and Reactors Improvement via Electromagnetic System Circuits Transformation (Systems with Laminated and Twisted Magnetic Circuits) [Text] / A. A. Stavinskiy // Electrical Engineering and Electro-

mechanics. – 2011. № 6. – P. 33 – 38 [in Russian].

8. Tikhomirov P. M. The Calculation of Transformers: Studies. Manual for high Schools. [Text] / P. M. Tikhomirov. – Moscow : Energoatomizdat, 1986. – 528 p. [in Russian].

9. Blintsov V. S. Transformers for Embedding to Limited Diameter Shells for Special Equipment Objects and the aim Formulation of the Improvement [Text] / [V. S. Blintsov, R. A. Stavinskiy, E. A. Avdieieva and others] // Electrical Engineering and Electromechanics. – 2012. – № 2. – P. 16 – 21 [in Russian].

10. Flanagan W. M. Handbook of Transformers Design and Applications [Text] / W. M. Flanagan. – Boston : Mc Graw Hill, 1993. – 232 p. [in English].

11. La Ferve M. S. The Core Issues; Understanding Output Transformers [Text] / M. S. La Ferve // Part 1 of series Sound Practices foll 1992. – P. 22 – 24 [in English].

12. Sissimatos E. Design Rules for High-temperature Superconducting Power Transformers [Text] / E. Sissimatos, G. Harms, B. R. Oswald // Phisica C. – Vol. 354. – Iss. 1 – 4. – P. 23 – 26 [in English].



Ставинский Андрей Андреевич, д.т.н., проф, зав. каф. судовых электроэнергетических систем Нац. ун-та кораблестроения (НУК) им. адм. Макарова, 54025 г. Николаев, пр. Героев Сталинграда 9, т. (0512) 36-02-27.



Ставинский Ростислав Андреевич, к.т.н., доц. каф. электрооборудования судов и информационной безопасности НУК им. адм. Макарова, т. (0512) 39-94-54.



Авдиеева Елена Андреевна, аспирант каф. электрооборудования судов и информационной безопасности НУК им. адм. Макарова, т. (0512) 39-94-54, e-mail: e.avdeeva@ukr.net.