

А. А. СТАВИНСКИЙ, Е. А. АВДЕЕВА, О. О. ПЛАХТЫРЬ, Р. А. СТАВИНСКИЙ, А. Н. ЦЫГАНОВ

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО МАЛОМАГНИТНОГО КОМПАКТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Показано можливість зниження зовнішнього магнітного поля, контурного об'єму і трудомісткості виробництва просторових аксіальних електромагнітних систем спеціальних трифазних трансформаторів і реакторів. Удосконалення досягається симетруванням положень фазних елементів в просторі при паралельних поверхнях суміжних стрижнів і спрощенням конфігурацій розгортки секцій і перерізів стрижнів відповідно витих і навито-шихтованих магнітопроводів при нетрадиційних утворюючих контурах стрижнів і обмоткових катушок.

Ключові слова: трифазний трансформатор, зовнішнє магнітне поле, компактність, магнітопровід, симетрування.

Показана возможность снижения внешнего магнитного поля, контурного объема и трудоемкости производства пространственных аксиальных электромагнитных систем специальных трехфазных трансформаторов и реакторов. Усовершенствование достигается симметрированием положений фазных элементов в пространстве при параллельных поверхностях смежных стержней и упрощением конфигураций разверток секций и сечений стержней соответственно витых и навито-шихтованных магнитопроводов при нетрадиционных образующих контурах стержней и обмоточных катушек.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, внешнее магнитное поле, компактность, магнитопровод, симметрирование.

Elements of electrical equipment are subject to environmental and special norms for limiting the levels of the external magnetic field and contour volume. The basics of the designs of most power three-phase transformers are electromagnetic systems by planar magnetic cores. In this case, the three-phase transformers in production without external compensation devices do not respond the requirements of electromagnetic compatibility. The aim of the work is to analyze the possibility of developing low-magnetic three-phase transformers and reactors. The concept of the symmetrization and transformation of the structures of the magnetic circuit elements are used. The unconventional design and technological solutions of variants of axial spatial electromagnetic systems with twisted and combined butt magnetic cores are grounded. Traditional planar and spatial magnetic cores are characterized by circular forming contours of rods and winding coils. Such contours extremely complicate the solution of the problem of symmetry of structures and positions of the elements of rods and yokes in the space. The replacement of circular forming contours by polyhedral and sectoral contours forms sections of parallel lateral surfaces of adjacent rods. These contours make it possible to balance the masses and dimensions of the rods, as well as the positions of the elements of the axial spatial magnetic cores in the space, which is a condition of practical non-magnetism. Relatively to analogs with circular forming contours, the laboriousness of producing magnetic circuits and increasing the compactness of the spatial electromagnetic systems of transformers and reactors with reduced labor input are also reduced.

Keywords: three-phase transformer, external magnetic field, compactness, magnetic core, symmetrization.

Постановка задачі. Сучасні розподільні трансформатори повинні бути енергозберігаючими і виготовлятися на основі нових технічних рішень і матеріалів [1–3]. В доповнення к вказаним силовим розробляються спеціальні трансформатори, в частині маломагнітні і компактні, призначені для установки в напівпровідникові блоки і циліндричні і сферичні оболонки обмеженого діаметра об'єктів підводної і авіаційно-космічної техніки [4–7]. Умови проектування спеціального електрооборудування, наприклад корабельного, містять жорсткі обмеження зовнішнього магнітного поля (ВМП) [4, 5–9]. Змінні і постійні ВМП викликають сбой і відмови магнітометричних і електричних систем і регламентуються нормами електромагнітної сумісності [8]. Тому розробка конструкторсько-технологічних рішень зниження ВМП силового електрооборудування, в частині трифазних трансформаторів (ТТ) і реакторів (ТР), є актуальною задачею. Основні показники технічного рівня електричних машин і апаратів [10–12] доповнюються показником електромагнітної сумісності – рівнем ВМП [4, 8].

Аналіз основних досягнень. В світовому виробництві переважно ТТ використовується планарна структура електромагнітної системи (ЭМС) (рис. 1, а). Розроблені і виробляються також ТТ і ТР на основі симетричних просторових радіальних (рис. 1, б) і аксіальних (рис. 1, в, г) структур.

Конфігурації обмоточних катушок і сечень стержнів ЭМС варіантів структур (рис. 1) ТТ і ТР

малої, середньої і великої потужності утворюються прямокутними або криволінійними образуючими контурами (ОК) [2, 10–12]. Прямокутні ОК збільшують середню довжину витка і знижують електричну міцність ізоляції при малому радіусі округлення кутових частин катушок. Кругова форма катушок створює мінімальну середню довжину витка при умові повного заповнення електротехнічної сталлю (ЭТС) криволінійного ОК. Однак високий коефіцієнт заповнення кругового або еліптичного контура $K_{\text{кк}} = 0,927 \dots 0,931$ досягається розташуванням в сеченні стержня 28–32 пакетів ЭТС змінюючої ширини, що дуже удорожує виробництво.

Освоєння во другій половині минулого століття випуску анізотропної ЭТС сприяло організації виробництва ТТ і ТР структурних схем (рис. 1, в, г). При розробці конструкції їх ЭМС також використані кругові ОК, які в комбінованому стыковом (шихтованні стержні, витіє ярма на рис. 2, а) і витом (рис. 2, б) варіантах заповнюються ЭТС з коефіцієнтом $K_{\text{кк}} \leq 0,9$. Такі ОК створюють порожнини між катушками і збільшують металоемкість магнітопроводів і габаритні діаметри $D_{\text{кк(в)}}$ просторових ЭМС. Зразок (со знятою кришкою) складається в виробництві ТТ [13, 14] со стержневими і ярмними частинами витих нероз'єднаних секцій магнітопровода (рис. 2, б) і вмотованими катушками обмоток показан на рис. 2, в. Згідно [2] найбільший ефект застосування високопрониканих анізотропних і нових аморфних ЭТС досягається в просторових ЭМС і перспективним напрямком розробки нових серій транс-

© А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Плахтырь, Р.А. Ставинский, А.Н. Цыганов, 2018

форматоров является создание витых пространственных стыковых магнитопроводов.

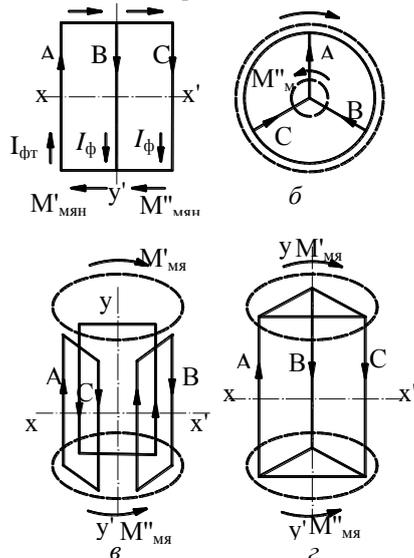


Рис. 1 – Структурные схемы статических электромагнитных систем: а – планарной; б – радиальной пространственной; в – аксиальной пространственной с двухконтурными фазными элементами; г – аксиальной пространственной с разделением фазного потока в ярмах

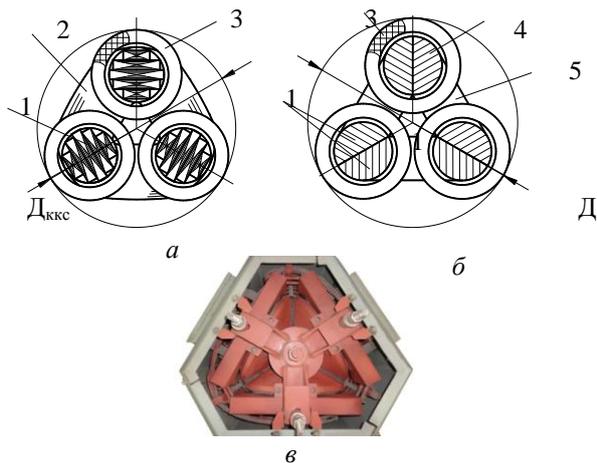


Рис. 2. – Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трехфазных пространственных электромагнитных систем с комбинированным (а) и витым (б) магнитопроводами, а также вид сверху со снятой крышкой (в) трехфазного трансформатора ТСЗМ-40-74.ОМ5 мощностью 40 кВ·А: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – стержневой участок секции магнитопровода; 5 – ярменный участок секции магнитопровода.

В дополнение к отмеченным выше недостаткам круговых ОК теоретически и экспериментально установлено [15], что деформации изгиба и внутренние остаточные напряжения, возникающие при криволинейной намотке витков, складываются с напряжениями от электромагнитных сил при коротком замыкании ТТ. Наложение деформаций от двух упомянутых факторов создает суммарное напряжение по всей длине окружности каждого витка. Такие напряжения могут превышать допустимые значения. Поэтому криволинейные ОК снижают электродинамическую устойчивость ТТ и ТР.

Также установлено [4], что использование в ЭМС структуры (рис. 1, в) витого секционированного магнитопровода не позволяет решить задачу обеспечения электромагнитной совместимости. Поэтому необходимы новые подходы к разработке маломагнитных ТТ и ТР.

Цель работы. Анализ результатов исследований возможности разработки и обоснование вариантов решений ЭМС маломагнитных и компактных ТТ и ТР.

Изложение основного материала исследования. Замена круговых ОК элементов ЭМС на $n \geq 6$ -гранные (рис. 3) позволяет упростить производство стыковых и витых магнитопроводов и повысить электродинамическую устойчивость индукционных статических устройств [10–12].

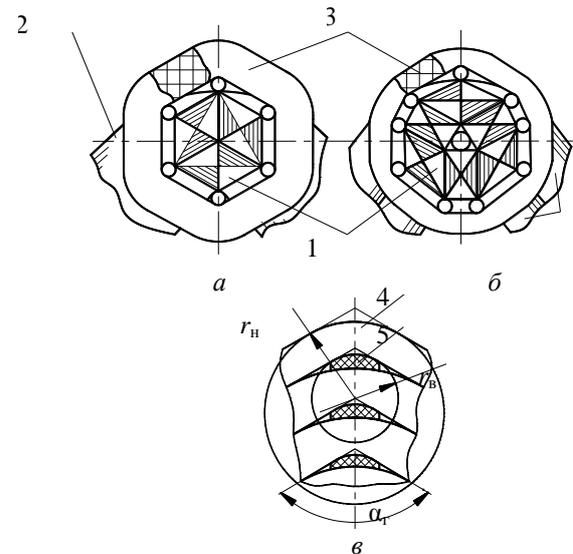


Рис. 3 – Фрагменты схем вариантов пространственных стыковых электромагнитных систем (а, б) и особенности конструкции обмотки (в) с многогранными образующими контурами: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – виток; 5 – опорный элемент

Сборкой стержней (рис. 3, а) [16] из пластин толщиной 0,35 мм и шириной (0,1...1) м достигается заполнение шестигранного ОК с коэффициентом $K_{\text{кш}} = 0,997...0,999 \approx 1$. Конструкция (рис. 3, б) с центральными отверстиями стержней [17] обеспечивает возможность снижения массы магнитопровода схемы (рис. 1, г) формированием двухконтурных ярем. Создается возможность снижения материалоемкости и потерь ТТ и ТР относительно аналогов с круговыми ОК [10–12]. Линии прямых сторон витков между углами ОК катушек обмоток ЭМС (рис. 3, а, б) пересекаются под тупыми углами $\alpha_r = 120^\circ$ (рис. 3, в). В углах α_r выполняются округления проводников. Между стержнями и катушками, а также проводниками, устанавливаются вертикальные опорно-изоляционные элементы. Устраняются (возникающие по всей длине витков цилиндрических катушек) деформации изгиба и остаточные механические напряжения волокон проводников в прямых участках витков. Зоны деформаций и напряжений концентрируются в местах изгиба проводников на осях вершин многогранника. Однако в этих зонах усиливается изоляция и устанавливаются опорные элементы. Для повышения электрической

прочности и динамической устойчивости опорные элементы должны выполняться с формой поперечного сечения, соответствующей внутреннему r_b и наружному r_n радиусам округлений проводников (рис. 3, в) [18].

В общем случае ВМП обусловлено концентрацией в активной части функционирующего объекта электрооборудования проводящих сред. Эти среды характеризуются вектором плотности тока $\bar{\delta}(\chi)$ и вектором намагниченности $\bar{j}(\chi)$ во всех точках χ активного объема V концентратора. Концентратор – ЭМС объекта создает ВМП, напряженность которого в любой точке пространства определяется уравнением [19]

$$\bar{H}(p) = \text{rot} \left[\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\bar{\delta}(\chi)}{r} dV \right] - \text{grad} \left[\frac{1}{4\pi} \int_V \left(\bar{j}(\chi) \text{grad} \left(\frac{1}{r} \right) \right) dV \right], \quad (1)$$

где r – расстояние от точки пространства P до координат интегрирования $\chi \in V$.

На основе (1) сосредоточенный (дипольный) источник магнитного поля определяется составляющими векторного магнитного момента (ВММ) ЭМС [19]

$$\bar{M}_\delta = \int_V [\bar{r}, \bar{\delta}(\chi)] dV; \quad \bar{M}_j = \int_V [j(\chi)] dV, \quad (2)$$

где \bar{M}_δ – дипольный ВММ, созданный всеми токами обмоток ЭМС; \bar{M}_j – дипольный ВММ созданный всеми элементами магнитопровода.

Из (1), (2) следуют известные способы снижения ВМП в источнике. Такими способами являются уменьшение модулей $\delta(\chi)$ и $j(\chi)$ и соответственно электромагнитных нагрузок, уменьшение объема V и структурирование его элементов с целью компенсации или минимизации действия $\bar{\delta}(\chi)$ и $\bar{j}(\chi)$ [19].

Условие снижения плотности тока обмоток и индукции магнитопровода соответствует ухудшению массо-стоимостных показателей и противоречит условию повышения компактности ЭМС. Более эффективно преобразование структур и симметрирование ЭМС [10–12]. Преобразование заключается в построении такой пространственной топологии дислокаций $\bar{\delta}(\chi)$ и $\bar{j}(\chi)$, при которых достигается пространственная симметрия положений и конфигураций активных элементов. В случае заданной конструктивной асимметрии ЭМС снижение ВМП возможно только внесенными (компенсационными) источниками магнитного поля [19] с конструктивно-системным усложнением и увеличением потерь.

Результирующий ВММ ТТ состоит из обмоточной, стержневой и яремной компонент ЭМС. При условии фазной симметрии источника энергии, обмотки вариантов структур ЭМС (рис. 1) образуют на комплексной плоскости симметричную звезду фазных ВММ с результирующим нулевым значением. Однако пространственные положения фазных ВММ, обуслов-

ленных $\bar{\delta}(\chi)$, зависят от степени фазной симметрии магнитопровода. Также уровень ВМП зависит от пространственной симметрии фазных элементов магнитопровода идентичного назначения.

В [4] анализируются результаты разработки ТТ маломагнитного исполнения структурных систем (рис. 1, а, в). В связи с отличием контуров и длин замыкания силовых линий поля в различные моменты времени, в известных вариантах планарных ЭМС, намагниченности элементов, в частности стержневого магнитопровода (рис. 1, а), несимметричны. Намагниченности и ВММ ярем $M'_{\text{мяв}}$, $M''_{\text{мяв}}$ и $M'_{\text{мян}}$, $M''_{\text{мян}}$, при максимуме потоков одного из боковых стержней отличаются от их значений при максимуме потока среднего стержня. Поэтому возникает разностный ВММ, определяющийся в соответствии с обозначениями (рис. 1, а) выражением [4]

$$\Delta \bar{M} = I_{\text{фт}} W_{\text{ф}} \bar{S}_b (K_{\text{умд}(C)} - K_{\text{умб}}), \quad (3)$$

где $I_{\text{фт}}$ и $W_{\text{ф}}$ – амплитуда фазного тока и число витков обмотки; \bar{S}_b – вектор, численно равный средней площади витка в плоскости, перпендикулярной оси стержня; $K_{\text{умд}}$, $K_{\text{умб}}$, $K_{\text{умс}}$ – коэффициенты усиления магнитного поля системы обмоток стержневыми и яремными участками магнитопровода $K_{\text{умд}} = K_{\text{умс}} \neq K_{\text{умб}}$.

Разность (3) достигает больших величин даже при малом отличии $K_{\text{умд}(C)}$ и $K_{\text{умб}}$ при значительных $I_{\text{фт}}$ и $W_{\text{ф}}$. Поэтому разработка маломагнитных ТТ и ТР на основе схемы (рис. 1, а) без компенсационных обмоток или короткозамкнутых колец на стержнях невозможна [4].

В ЭМС (рис. 1, б) составляющая ВММ, обусловленная намагниченностью наружного ярма $M'_я$ не уравновешена составляющей намагниченности внутреннего ярма $M''_я \neq M'_я$ и разработка маломагнитного ТТ радиальной структуры без средств магнитной компенсации также невозможна.

В соответствии с (1)–(3) очевидным решением задачи обеспечения маломагнитности ТТ является использование симметричных аксиальных пространственных структур ЭМС (рис. 1, в, г).

Выполненная разработка ТТ схемы (рис. 1, в) и конструкции (рис. 2, б) с вмотанными обмотками (неразъемные секции магнитопровода) показала близкую к нулю компоненту ВММ и ВМП в направлении оси yy' . Однако радиальные компоненты в направлении xx' достигли существенных величин. Анализ опытных образцов указанного ТТ показал, что традиционная вмотанная конструкция ЭМС (рис. 2, б) в значительной степени подвержена влиянию различных технологических отклонений от полной симметрии [4]. В идеальном случае технологические отклонения от симметричных положений трех секций и элементарных слоев ЭТС витого магнитопровода и фазных катушек обмоток в пространстве должны отсутствовать. Также конфигурации и массы секций и сечений стержней должны быть идентичными. Согласно [4], технология изготовления ЭМС (рис. 2, б) обеспечивает критичные

величины указанных отклонений ± 2 мм. При формировании магнитопровода ЭМС (рис. 2, б) практическую симметричность и идентичность секций (рис. 4, а) из разверток (рис. 4, б) или отдельных рулонов ЭТС различной ширины обеспечить весьма сложно.

Снизить на 15...20% габаритные размеры и трудоемкость производства ЭМС структуры (рис. 1, в) относительно аналога (рис. 2, б, в) из секций и разверток ЭТС (рис. 4, а, б) возможно на основе шестигранных ОК (рис. 4, в) [10–12]. Достигается контурный коэффициент заполнения ЭТС шестигранного ОК $k_{кш} \approx 1$. Создается возможность решения задачи симметрирования секций (рис. 4, з) магнитопровода ЭМС (рис. 4, в) и разработки маломагнитного ТТ изменением и упрощением конфигурации развертки (рис. 4, б) до вида (рис. 4, д). Секционные развертки (рис. 4, д) выполняются разделением прямоугольной полосы ЭТС на две идентичные части с прямоугольными $abda'$ и $b'ee'd'$, а также треугольными bcd и $b'c'd'$ участками [20]. При намотке секций образуются участки параллельных боковых поверхностей смежных стержней (обмоточных окон), что повышает компактность.

Замена (для повышения компактности ЭМС) вмотанной конструкции на стыковую (составные секции на рис. 4, з), позволяет снизить массу и основные потери магнитопровода, а также центрировать сборку витых частей относительно параллельных плоскостей xx' (рис. 1, в) и торцов магнитопровода.

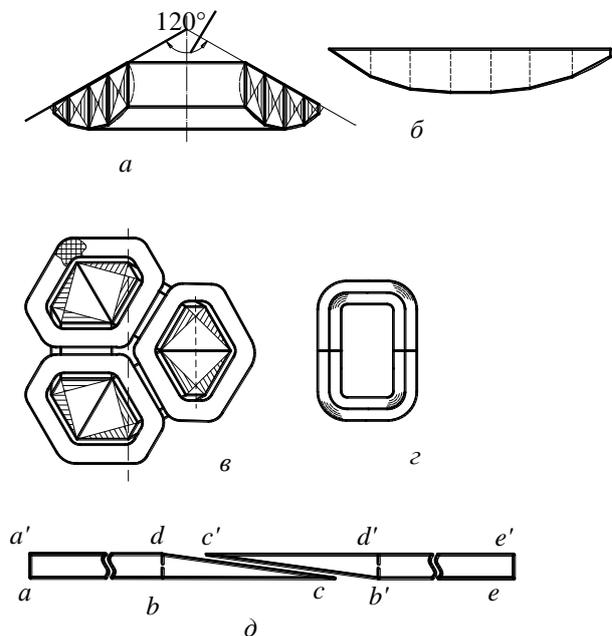


Рис. 4 – Схема (а) и развертка (б) секции витого магнитопровода с круговыми образующими контурами, схема (в), секция (з) и развертка (д) электротехнической стали двух секций электромагнитной системы с шестигранными образующими контурами

Задача пространственного симметрирования положений катушек обмоток и элементов магнитопровода также может быть решена при использовании структуры ЭМС (рис. 1, з). Использование в подоб-

ной ЭМС традиционных круговых ОК (рис. 2, а) и выполнение стержней из пластин ЭТС различной ширины предельно затрудняют решение задачи обеспечения практических идентичности и симметричного положения элементов стержней в пространстве. Названные недостатки устраняются в вариантах симметричной ЭМС с минимальным контурным диаметром $D_{кш(ш)}$ стыковых витого [21] и комбинированного [16] магнитопроводов соответственно с секторными и шестигранными ОК (рис. 5, а, б), позволяющих создать компактную конструкцию ТТ (рис. 5, в) с параллельными участками поверхностей смежных стержней и повышенной точностью сборки (рис. 5, з–жс).

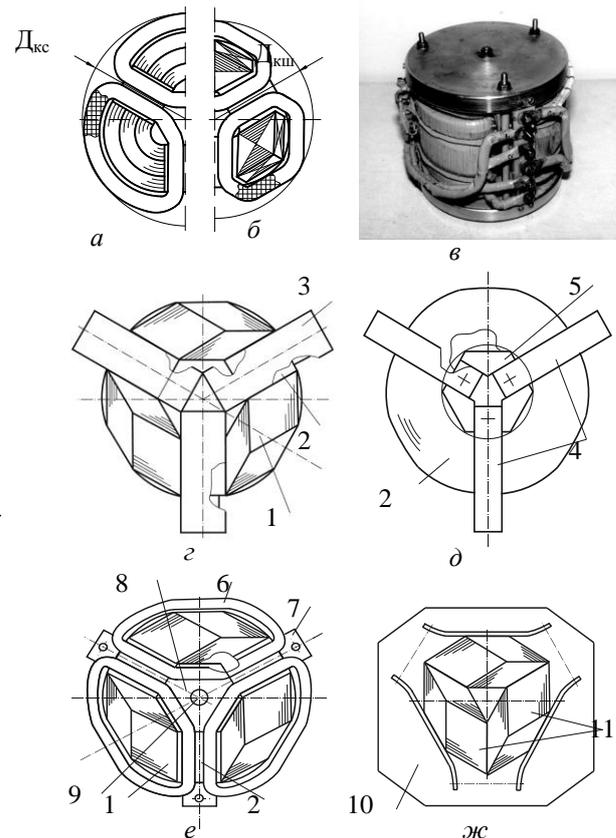


Рис. 5 – Конфигурации элементов аксиальной электромагнитной системы со стыковыми витым (а) и комбинированным (б) магнитопроводами, трехфазный трансформатор (в) и установка стержней, ярем и обмоточных катушек (з) – (жс) с использованием оправки (д) и основания (ж) при сборке:

- 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – прокладка; 4 – оправка;
- 5 – выступ; 6 – обмоточная катушка; 7 – основание;
- 8 – выступ основания; 9 – отверстие; 10 – технологическое основание; 11 – стыковые поверхности стержней.

В табл. 1 приведены массогабаритные характеристики понижающих ТТ морского назначения мощностью 6,3 кВ·А с обмотками высокого напряжения 660 В – планарного ТСЗМ [13] и встраиваемого компактного ТПК (рис. 5, в) [5, 23] системы электрооборудования подводного самоходного спускаемого аппарата МТК – 200 [7].

Существенное различие масс трансформаторов обусловлено наличием стальных кожуха и стяжного остова магнитопровода в ТСЗМ и конструктивных

элементов из немагнитного легкого сплава АМГ – 5М в ТПК, а также лучшими показателями технического уровня пространственной ЭМС относительно эквивалентной планарной [11, 12].

Стержни витого стыкового магнитопровода ЭМС (рис. 5, а) выполняются симметричным разрезанием кольцевых концентрических витых заготовок, а варианты конструкции комбинированного магнитопровода (рис. 5, б, в) отличаются от схемы (рис. 2, а) идентичностью размеров пластин ЭТС стержней, что упрощает симметрирование и технологию изготовления.

Таблица 1 – Массогабаритные показатели вариантов трехфазного трансформатора

Тип трансформатора	Характеристика	
	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
ТСЗМ – 6,3 – 74.ОМ5	73	554x355x405 (по выступающим элементам крепления)
ТПК – 6,3 – 660/230/16	47	330x330x390

Нетрадиционные ОК создают параллельность боковых поверхностей смежных стержней (обмоточных окон). Такие поверхности обеспечивают возможность практического симметрирования активных элементов ЭМС способом сборки [22] и технологической оснастки (рис. 5, г–ж).

Перед установкой стержней на осях ярем и обмоточных окон располагаются идентичные технологические прокладки (рис. 5, з) с параллельными сторонами и шириной, равной ширине окна. Стержни устанавливаются с совмещением боковых плоских поверхностей с поверхностями сторон прокладок. Прокладки устанавливаются, в соответствии с положением осей обмоточных окон, на технологическую оправку (вид с внешнего торца ярма) с центральным выступом (рис. 5, д).

Для возможности центрирования выступ оправки содержит участки внешней поверхности, предназначенные для установки ярма и совпадающие с поверхностью его внутреннего контура. Ярмо с установленными стержнями и обмоточными катушками и второе аналогичное ярмо закрепляются на несущих основаниях остова ТТ с центральными выступами и отверстиями, которые содержат поверхности с осями, совпадающими и соосными с участками поверхностей внутренних контуров ярем (рис. 5, е). При сборке ЭМС в отверстия выступов несущих оснований устанавливается технологический осевой направляющий элемент. Перед сборкой ЭМС заготовки стержней располагаются на технологическом основании с совмещением боковых плоских поверхностей и временно скрепляются (рис. 5, ж). Обрабатываются торцевые поверхности такой сборки для обеспечения идентичности высот всех стержней. Для симметричного положения обмоточных катушек устанавливаются горизонтальные и вертикальные дистанционные изолирующие прокладки.

Выводы. 1. Дальнейшее усовершенствование и обеспечение электромагнитной совместимости ТТ и

ТР без средств электромагнитной компенсации достигается структурными преобразованиями активных элементов пространственных ЭМС.

2. Решение задачи достижения практической маломагнитности, повышения компактности и снижения трудоемкости производства пространственных конструкций ТТ и ТР возможно на основе вариантов нетрадиционных аксиальных структур ЭМС с параллельными участками боковых поверхностей смежных стержней.

Список литературы

1. Мельникова Е. В. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов / Е.В. Мельникова // Энергосбережение. – 2004. – №1. – с. 61–66.
2. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В.А. Бормосов, М.Н. Костоусова, А.Ф. Петренко, И.Е. Смольская. Режим доступа: [www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article\(13.09.2004\)](http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article(13.09.2004)).
3. Коновалов О.А. Основные требования к трансформаторно-реакторному оборудованию в современных условиях / О.А. Коновалов, В.И. Подъячев // Энергетик. – 2010. – №8. – с. 29–31.
4. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломагнитном исполнении / В.С. Лутиков, А.А. Середа, А.В. Ерисов, Н.В. Крюкова, О.А. Гелярская // Электротехника и электромеханика. – 2004. – №2. – с. 26–33.
5. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин / А.А. Ставинский // Электротехника и электромеханика. – 2008. – №2. – с. 53–58.
6. Moore S. / Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. – Marine Advanced Technology Education (NATE) Center, 2010. – 770 p.
7. Блинов В. С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования / В.С. Блинов, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, А.С. Садовой // Электротехника и электромеханика. – 2012. – №2. – с. 16–21.
8. IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring. – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p.
9. Weston D. A. Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits and Measurement, Third Edition, Third Edition / D. A. Weston. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, CRC Press. – 2016. – 184 p.
10. Ставинский А.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Электричество. – 2014. – №9. – с. 34–43.
11. Ставинский А.А. Универсальный метод обоснованного выбора технических решений активной части электрических машин и аппаратов / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Пальчиков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електроμηχανічне перетворення енергії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №11(1183). – с. 70–79.
12. Ставинский А.А. Обобщенный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч.1. Результаты сравнительного анализа вариантов трехфазных электромагнитных систем трансформаторов / А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Пальчиков, Р.А. Ставинский // Электричество. – 2017. – №4. – с. 39–49.
13. Трансформаторы серий ОСМ, ОСВМ, ОСВМС, ОСЗМ, ОСЗМВ, ТСВМ, 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.
14. Материалы информационного сайта «ОАО Электрозавод» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elektrozawod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/PK_5_8.pdf.
15. Лазарев В.И. Обобщение результатов исследования по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов

- / В.И. Лазарев // Технічна електродинаміка.–2005.– №1.– с.53–60.
16. Пат. 88883 України МПК НО1F 27/28 НО1F 27/24, НО1F 21/00. Просторова електромагнітна система / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. – №а200604817; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
 17. Пат. 91755 України МПК НО1F3/00, НО1F27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. – №а200813522; Заявл. 24.11.2008; Опубл. 25.08.2010, Бюл. №16.
 18. Пат. 39631 України МПК НО1F27/28; НО1F27/30; НО1F27/32. Обмотка статичного індукційного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. – №u200809425; Заявл. 18.07.2008; Опубл. 10.03.2009. Бюл. №5.
 19. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения / В.Ю. Розов. – Киев: 1995. – 42 с. – (препр. / НАН Украины. Ин-т Электродинамики; №772).
 20. Пат. 99330 України МПК НО1F27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу трифазного статичного індукційного пристрою / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.А. Авдєєва. – №U201414188; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 25.05.2015, Бюл. №10.
 21. Пат. 51437 України МПК НО1F27/24, НО1F29/14, НО1F27/26. Просторова магнітна система / А.А. Ставинський, В.І. Крайнюк, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтур. – №2002042583; Заявл. 02.04.2002; Опубл. 17.01.2005, Бюл. №1.
 22. Пат. 120851 України МПК НО1F27/24. Спосіб виготовлення магнітопроводу багатofазного індукційного статистичного пристрою / А.А. Ставинський, О.А. Авдєєва, Д.О. Жук, О.О. Плахтур, Р.А. Ставинський. – №u201703887 Заявл. 19.04.2017, Опубл. 27.11.2017, Бюл. №22.
 23. Ставинський А.А. Розрахунок трифазних трансформаторов з просторовим магнітопроводом: Навчальний посібник / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтур. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.
- References (transliterated)**
1. Mel'nikova E. V. Energosberezhenie v Evrope: primeneniye energoefektivnykh transformatorov [Energy saving in Europe: application of energy-efficient transformers] / E.V. Mel'nikova // *Energosberezhenie*. – 2004. – №1. – s. 61–66.
 2. Perspektivy i sostoyaniye razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh seriy [Perspectives and state of development of distribution transformers of mass series] [Elektronnyy resurs] / V.A. Bormosov, M.N. Kostousova, A.F. Petrenko, I.E. Smol'skaya. Rezhim dostupa: www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article(13.09.2004).
 3. Konovalov O.A. Osnovnye trebovaniya k transformatorno-reaktornomu oborudovaniyu v sovremennykh usloviyakh [Basic requirements for transformer-reactor equipment in modern conditions] / O.A. Konovalov, V.I. Pod'yachev // *Energetik*. – 2010. – №8. – s. 29–31.
 4. Analiz tipichnykh oshibok proektirovaniya transformatorov v malomagnitnom ispolnenii [Analysis of typical errors in the design of transformers in a low-magnetic version] / V.S. Lupikov, A.A. Sereda, A.V. Erisov, N.V. Kryukova, O.A. Gelyarovskaya // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2004. – №2. – s. 26–33.
 5. Stavinskiy A. A. Osobennosti naznacheniya i ispol'zovaniya spetsial'nykh elektricheskikh mashin [Features of the destination and use of special electric machines]. / A. A. Stavinskiy // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2008. – №2. – S. 53–58.
 6. Moore S. / Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication / S. Moore, H. Bohm, V. Jensen. – *Marine Advanced Technology Education (NATE) Center*, 2010. – 770 p.
 7. Blintsov V. S. Transformatory dlya vstraivaniya v obolochki ogranicennogo diametra ob'ektov spetsial'noy tekhniki i postanovka zadachi ikh usovershenstvovaniya [Transformers for embedding in shells of limited diameter objects of special equipment and setting the task of their improvement] / V.S. Blintsov, R.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva, A.S. Sadovoy // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. – 2012. – №2. – s. 16–21.
 8. IEC 1000-4-8: 1993. "Electromagnetic compatibility. Part 4: Testing and measuring. – Section 8: Power frequency magnetic field immunity test. Basic EMC Publication". Edition 1.1. – 2001. – 61 p.
 9. Weston D. A. Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits and Measurement, Third Edition, Third Edition / D. A. Weston. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, *CRC Press*. – 2016. – 184 p.
 10. Stavinskiy A.A. Optimizatsionnyy sravnitel'nyy analiz struktur staticheskikh elektromagnitnykh sistem. Ch. 1. Varianty i metod otsenki preobrazovaniy [Optimization comparative analysis of the structures of static electromagnetic systems. Part 1. Variants and method for evaluating transformations] / A.A. Stavinskiy, R.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva // *Elektrichestvo*. – 2014. – №9. – s. 34–43
 11. Stavinskiy A.A. Universal'nyy metod obosnovannogo vybora tekhnicheskikh resheniy aktivnoy chasti elektricheskikh mashin i apparatov [The universal method for the reasonable selection of technical solutions for the active part of electrical machines and apparatus] / A.A. Stavinskiy, R.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva, O.O. Pal'chikov // *Visnik natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu "KhPI". Zbirnik naukovikh prats'. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorenniya energii*. – Kh.: NTU "KhPI". – 2016. – №11(1183). – s. 70–79.
 12. Stavinskiy A.A. Obobshchennyy metod strukturo-parametricheskogo sinteza elektromagnitnykh sistem elektricheskikh mashin i induktsionnykh apparatov. Ch.1. Rezul'taty sravnitel'nogo analiza variantov tekhnicheskikh elektromagnitnykh sistem transformatorov [Generalized method of structural-parametric synthesis of electromagnetic systems of electric machines and induction devices. Part 1. Results of a comparative analysis of variants of three-phase electromagnetic systems of transformers] / A.A. Stavinskiy, E.A. Avdeeva, O.O. Pal'chikov, R.A. Stavinskiy // *Elektrichestvo*. – 2017. – №4. – s. 39–49.
 13. Transformatory seriy OSM, OSVM, OSVMS, OSZM, OSZMB, TSVM, TSZM i TSZMV (moshchnost'yu ot 0,063 do 100 kV·A). Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii OBT. 140.240. – M.: *Informelektro*, Zak. 1265. – 21 s.
 14. Materialy informatsionnogo sayta "OAO Elektrozavod" [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/PK_5_8.pdf
 15. Lazarev V.I. Obobshchenie rezul'tatov issledovaniya po probleme elektrodinamicheskoy stoykosti silovykh transformatorov [Generalization of the research results on the problem of the electrodynamic stability of power transformers] / V.I. Lazarev // *Tekhnichna elektrodinamika*. – 2005. – №1. – s. 53–60.
 16. Pat. 88883 Ukrayiny MPK НО1F 27/28 НО1F 27/24, НО1F 21/00. Просторова електромагнітна система [Spatial electromagnetic system] / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. – №а200604817; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
 17. Pat. 91755 Ukrayiny MPK НО1F3/00, НО1F27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою [Magnetic conductor of a three-phase static induction device] / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Тсьханов. – №а200813522; Заявл. 24.11.2008; Опубл. 25.08.2010, Бюл. №16.
 18. Pat. 39631 Ukrayiny MPK НО1F27/28; НО1F27/30; НО1F27/32. Обмотка статичного індукційного пристрою [Winding of static inductive device] / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Тсьханов. – №u200809425; Заявл. 18.07.2008; Опубл. 10.03.2009, Бюл. №5.
 19. Rozov V.Yu. Vneshnie magnitnye polya silovogo elektrooborudovaniya i metody ikh umen'sheniya [External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them] / V.Yu. Rozov. – Kiev: 1995. – 42s. – (prepr. / NAN Ukrainy. In-t Elektrodinamiki; №772).
 20. Pat. 99330 Ukrayiny MPK НО1F27/24. Sposib vyhotovlennya mahnitoprovodu tryfaznogo statychnoho induktsiynoho prystroyu [Method for manufacturing a magnetic conductor of a three-phase static induction device] / A.A. Stavyns'kyy, R.A. Stavyns'kyy, O.A. Avdyeyeva. – №U201414188; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 25.05.2015, Бюл. №10.
 21. Pat. 51437 Ukrayiny MPK НО1F27/24, НО1F29/14, НО1F27/26. Просторова магнітна система [Spatial magnetic system] / А.А. Ставинський, В.І. Крайнюк, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтур. – №2002042583; Заявл. 02.04.2002; Опубл. 17.01.2005, Бюл. №1.
 22. Pat. 120851 Ukrayiny MPK НО1F27/24. Sposib vyhotovlennya mahnitoprovodu bahatofaznogo induktsiynoho statychnoho prystroyu [Method of manufacturing a magnetic core of multiphase inductive statistical device] / A.A. Stavyns'kyy, O.A. Avdyeyeva, D.O. Zhuk, O.O. Plakhtyr, R.A. Stavyns'kyy. – №u201703887 Заявл. 19.04.2017, Опубл. 27.11.2017, Бюл. №22.
 23. Stavyns'kyy A.A. Rozrakhunok tryfaznykh transformatorov z prostorovym mahnitoprovodom [Calculation of three-phase transformers with spatial magnetic core: Training manual]:

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технічні рішення трифазного маломагнітного компактного трансформатора / А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. О. Плахтир, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 116-122. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

Технические решения трехфазного маломагнитного компактного трансформатора / А. А. Ставинский, Е. А. Авдеева, О. О. Плахтырь, Р. А. Ставинский, А. Н. Цыганов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 116-122. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

Technical solutions of three-phase low-magnetic compact transformer / A. A. Stavinskiy, O. A. Avdieieva, O. O. Plakhtir, R. A. Stavinskiy, A. N. Tsiganov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 116-122. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ставинський Андрій Андрійович – доктор технічних наук, професор, Миколаївський національний аграрний університет, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; тел.: (0512) 36-49-63.

Ставинский Андрей Андреевич – доктор технических наук, профессор, Николаевский национальный аграрный университет, заведующий кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; тел.: (0512) 36-49-63.

Stavinskiy Andrei Andreevich – doctor of technical sciences, full professor, Mykolayiv national agrarian university, head of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; tel.: (0512) 36-49-63.

Авдєєва Олена Андріївна – кандидат технічних наук, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем; тел.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Авдеева Елена Андреевна – кандидат технических наук, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем; тел.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Avdieieva Elena Andrievna – candidate of technical sciences (Ph. D.), Admiral Makarov national university of shipbuilding, docent at the department of the shipboard electrical power systems; tel.: (0512) 36-05-15; e-mail: e.avdeeva@ukr.net.

Плахтир Олег Олегович – кандидат технічних наук, доцент, Миколаївський національний аграрний університет, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; e-mail: slygy78@mail.ru.

Плахтырь Олег Олегович – кандидат технических наук, доцент, Николаевский национальный аграрный университет, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; e-mail: slygy78@mail.ru.

Plakhtyr Oleg Olegovich – candidate of technical sciences (Ph. D.), Mykolayiv national agrarian university, docent of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; e-mail: slygy78@mail.ru.

Ставинський Ростислав Андрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем; тел.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Ставинский Ростислав Андреевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, доцент кафедры судовых электроэнергетических систем; тел.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Stavinskiy Rostislav Andreevich – candidate of technical sciences (Ph. D.), docent, Admiral Makarov national university of shipbuilding, docent at the department of the shipboard electrical power systems; tel.: (0512) 36-97-81; e-mail: strostand@mail.ru.

Циганов Олександр Миколайович – магістр, Миколаївський національний аграрний університет, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки і електромеханіки; e-mail: potomkinske@gmail.com.

Цыганов Александр Николаевич – магистр, Николаевский национальный аграрный университет, ассистент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики; e-mail: potomkinske@gmail.com.

Tsiganov Aleksandr Nikolaevich – master, Mykolayiv national agrarian university, assistant of the department of electric power industry, electrical engineering and electromechanics; e-mail: potomkinske@gmail.com.