

УДК 621.314+621.316

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

МЕТОД СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ СТРУКТУРОЙ И КОНФИГУРАЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ

***Аннотация.** Рассмотрены нетрадиционные конструкции планарной и пространственной радиальной статических электромагнитных систем, а также метод сравнительного анализа подобных систем, отличающихся положением в пространстве, конфигурацией образующих контуров и способами изготовления элементов, показана идентичность относительных коэффициентов показателей технического уровня и оптимальных геометрических соотношений одинаковых структур активной части трансформаторов и реакторов при соответственно идентичных критериях оптимизации, используемых материалах и технологиях производства.*

***Ключевые слова:** трансформатор, реактор, планарная, электромагнитная система, шихтованный магнитопровод, обмотка, показатель универсальный, целевая функция, управляемая переменная, оптимизация*

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

THE METHOD OF COMPARATIVE ANALYSES OF STATIC ELECTROMAGNETIC SYSTEMS THAT IS DIFFERENT IN STRUCTURE AND CONFIGURATION OF ELEMENTS

***Abstract.** Non-traditional constructions of planar and spatial radial static electromagnetic systems and the method of comparative analysis of such systems that are different in space position, configuration, forming counters and manufacturing methods of the elements are considered. The identity of the relative coefficients of a technical level and the optimal geometric conditions of identical structures of the active part of the transformers and reactors, respectively, at the same criteria optimization, materials and production technologies are shown.*

***Keywords:** transformer, reactor, planar, space, electromagnetic system, a laminated magnetic system, winding indicator of universality, objective function, controlled variable, optimization.*

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

МЕТОД ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ СТАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ, ЩО ВІДРІЗНЯЮТЬСЯ СТРУКТУРОЮ ТА КОНФІГУРАЦІЄЮ ЕЛЕМЕНТІВ

***Анотація.** Розглянуто нетрадиційні конструкції планарної і просторової радіальної статичних електромагнітних систем, а також метод порівняльного аналізу подібних систем, що відрізняються положенням у просторі, конфігурацією утворюючих контурів і способами виготовлення елементів, показана ідентичність відносних коефіцієнтів показників технічного рівня та оптимальних геометричних співвідношень однакових структур активної частини трансформаторів і реакторів при відповідно ідентичних критеріях оптимізації, використуваних матеріалах і технологіях виробництва.*

***Ключові слова:** трансформатор, реактор, планарна, електромагнітна система, шихтований магнітопровід, обмотка, показник універсальний, цільова функція, керована змінна, оптимізація*

Введение. Основные конфигурации сечений стержней магнитопроводов и витков катушек обмоток «традиционных» конструкций планарных и пространственных электромагнитных систем (ЭМС) индукционных статических устройств (ИСУ) [2, 5, 12] характеризуются прямоугольными и круговыми образующими контурами. В последние десятилетия повышается мощность

трансформаторов с прямоугольными сечениями стержней витых и шихтованных магнитопроводов. Актуально достижение ремонтпригодности, снижение потерь и материалоёмкости ЭМС ИСУ на основе витых разъемных (стыковых) магнитопроводов и использования новых разработок анизотропной и изотропной аморфной электротехнической стали (ЭТС) [4 – 6]. Использование аморфной ЭТС расширяется до производства трансформаторов мощностью 2500 кВА, однако из-за низкой механической прочности

© Ставинский А.А., Ставинский Р.А.,
Авдеева Е.А., 2014

магнитопроводы из аморфного «стеклянного металла» не могут выполнять функции несущей конструкции и крепятся к обмоткам с соответствующей изоляционно-опорной базой [4].

В связи с интенсификацией работ по освоению морского шельфа [14] и необходимостью развития подводных и космических исследований также актуальна разработка компактных пространственных ЭМС трансформаторов для встраивания в сферические оболочки ограниченного диаметра [9]. Для решения задач повышения компактности указанные выше традиционные конструкции и образующие контуры дополнены «нетрадиционными» структурами и конфигурациями элементов ЭМС, создающими предпосылки усовершенствования, кроме специальных трансформаторов, ИСУ распределительного назначения [1, 9, 10, 11].

Исходя из возможностей использования различных контуров и положений в пространстве элементов аксиальных и радиальных ЭМС возникает целесообразность аналитического сравнительного анализа их вариантов. Такой анализ предполагает решение задач структурной оптимизации ЭМС.

Оптимизация ИСУ выполняется на основе математических моделей с частными или интегральными критериями оптимизации и совокупностью независимых и зависимых управляемых переменных (УП). Оптимизационные УП включают электромагнитные нагрузки (ЭМН) и элементы геометрии, соответствующие конкретным конфигурациям катушек обмоток и стержней магнитопроводов [5 – 8]. Например, одними из взаимонеприемлемых геометрических УП оптимизации традиционных ЭМС являются соотношение сторон прямоугольного сечения и диаметр образующего контура секционированного «ступенчатого» сечения стержня. Указанное несоответствие затрудняет объективный сравнительный анализ различных структурных вариантов ЭМС.

Целью работы является продолжение и дополнение исследований, проведенных в [11], анализ возможности преобразования структур трехфазных планарной и пространственной радиальной ЭМС с прямоугольными сечениями стержней и обоснование иден-

тичности вида исходных уравнений и целевых функций (ЦФ), определяющих основные показатели технического уровня (ПТУ) трансформатора и реактора в относительных единицах.

Используемый в трехфазной планарной ЭМС витой стыковый магнитопровод традиционной конструкции формируется из трех заготовок двух вариантов геометрии с прямоугольными внутренними контурами [2, 12, 13]. Особенностью такой конструкции является двухконтурность фазных элементов с отсутствием магнитной связи между секциями – контурами и добавочные потери от не-синусоидальности секционных магнитных потоков [6, 12].

Снизить добавочные потери, массу и трудоемкость производства относительно традиционных конструкций с прямоугольным сечением стержней [2, 12] позволяет трехфазная ЭМС (рис.1, а) с комбинированным стыковым магнитопроводом (рис.1, б), содержащим симметричные боковые витые элементы и средний элемент. При прямоугольном ($\alpha_c < 90^\circ$, рис.1, а) и квадратном ($\alpha_c = 90^\circ$, рис.1, б) сечении каждого стержня, средний элемент магнитопровода соответственно набирается из идентичных пластин ЭТС и представляет часть витой заготовки. Квадратные сечения стержней позволяют собрать два практически идентичных магнитопровода (рис.1, б) из элементов, полученных разрезанием двух витых заготовок одинаковой ширины h_m и различными длинами l_1 и l_2 прямоугольных внутренних контуров (рис. 1, в и 1, г):

$$l_1 = h_m + 2b_o; \quad l_2 = 2b_o,$$

где b_o – ширина обмоточного окна.

При минимальной толщине ленты (аморфная ЭТС) технологические отклонения размеров заготовок (рис.1, в и 1, г) минимальны. Обмоточные катушки ЭМС (рис.1, а) наматываются на изоляционные каркасы, охватывающие средние стержневые участки элементов магнитопровода. В соответствии с [4] такие каркасы должны составлять несущую базу ЭМС с аморфной ЭТС. Стыковые сопряжения боковых и среднего элементов конструкции (рис.1, б) характеризуются взаимной перпендикулярностью плоскостей слоев ЭТС и должны изолиро-

ваться. Проблема изоляции стыков магнитопроводов трансформаторов должна решаться посредством прочных тонких термостойких покрытий, используемых для изоляции проката ЭТС.

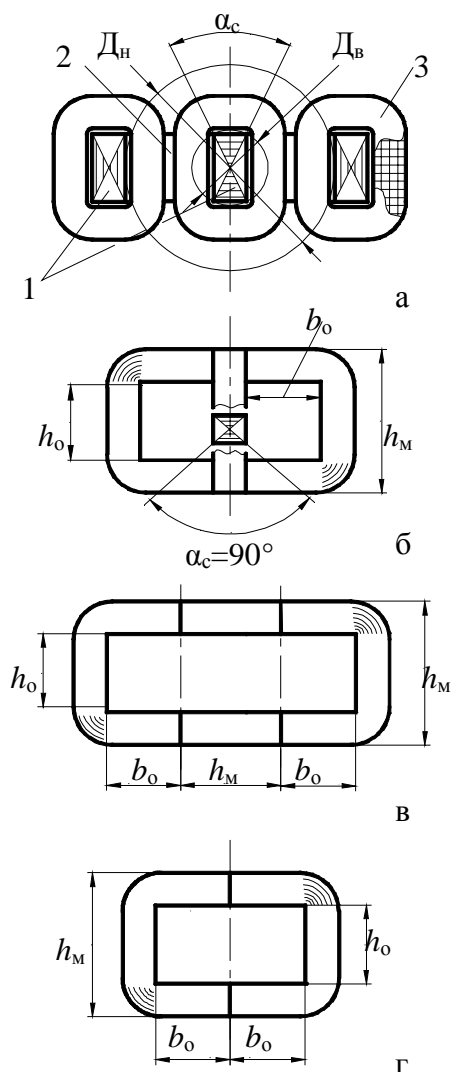


Рис. 1. Поперечная структура (а), конструктивная схема (б) и заготовки (в, г) элементов стыкового магнитопровода планарной электромагнитной системы:

1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Повышенным заполнением объема ограниченного сферической оболочкой отличается исходная конструкция трехфазного трансформатора с радиальной ЭМС [3]. В такой ЭМС стержни с обмоточными катушками расположены под углами 120 град, соединены в центре и состыкованы с кольцевым внешним ярмом шихтованного магнитопровода. Подобная конструкция практически не использовалась и не получила развития в связи со значительными

отходами ЭТС при изготовлении магнитопровода и последующей разработкой, после вариантов пространственных конструктивных схем, планарной ЭМС [3].

В «традиционной» планарной ЭМС с прямоугольными сечениями стержней и ярем слои шихтованного магнитопровода с «прямыми» стыками образуются из прямоугольных пластин (листов) ЭТС трех размеров, отличающихся длиной [2, 12, 13]. Использование в таком магнитопроводе анизотропной ЭТС с низкими удельными потерями приводит к значительному повышению потерь в зонах углов и стыков. Поэтому для снижения добавочных потерь и тока холостого хода каждый слой магнитопровода формируется из пластин четырех конфигураций с чередующимися прямыми и «косыми» стыками [12]. Максимальное снижение потерь угловых зон достигается использованием сложной технологии сборки планарного магнитопровода со всеми косыми стыками из большого числа типоразмеров пластин с обрезкой при их укладке так называемых «усов» и отходами формирования угловых зон [5, 6].

Практическое отсутствие отходов при разделении прямоугольной полосы (ленты) ЭТС на параллелограммные элементы и удобство встраивания радиальной ЭМС в сферический объем контурного диаметра D_k (рис. 2, а и 2, б) обеспечивает формирование шихтованного «впереплет» магнитопровода со всеми косыми стыками (рис. 2, в и 2 г) всего двумя параллелограммными конфигурациями ЭТС различной длины [1].

Задачи сравнительного анализа отличающихся структур ЭМС, например представленных на рис. 1, а и 1, б и рис.2, а и 2, б, требуют разработки математических моделей на основе ЦФ, отображающих ПТУ посредством УП, которые не зависят от исполнения («сухой», «масляный», «элегазовый», с принудительной вентиляцией, ...) и мощности, а также положения и конфигурации элементов ИСУ. Используемые при анализе конструкций и проектировании ЭМС удельные показатели, например массы и объема по отношению к номинальной мощности и ЭМН зависят от мощности, назначения и способа охлаждения ИСУ. Отображающие также индивидуальные структурные особенности геометрические УП

затрудняют объективное сравнение вариантов ЭМС и совместно с удельными показателями и УП в виде ЭМН не удовлетворяют условию универсальности использования.

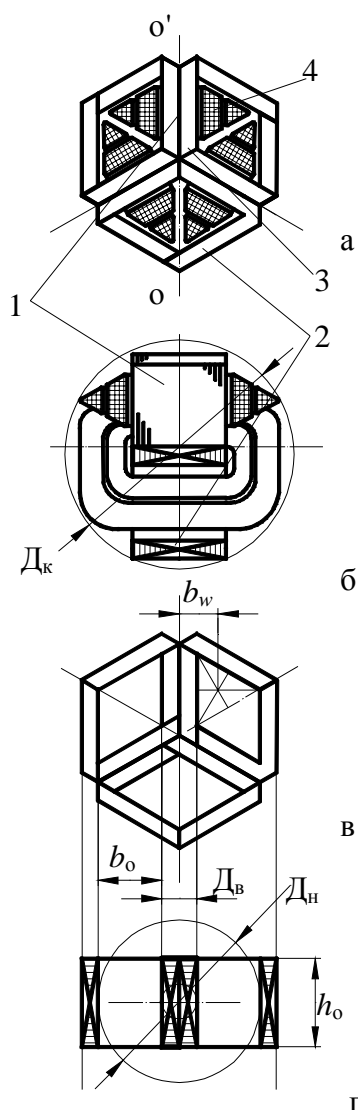


Рис. 2. Конфигурации сечений пространственной радиальной электромагнитной системы (а и б) и ее магнитопровода (в и г) во взаимно перпендикулярных плоскостях: 1 – стержень; 2 – внешнее ярмо; 3 – внутреннее ярмо; 4 – катушка обмотки

Структурная оптимизация вариантов ЭМС может быть выполнена на основе определения и сопоставления экстремумов «унимодальных» ЦФ соответствующих основным ПТУ и УП, которые должны быть универсальными, то есть приемлемыми и идентичными как для сравниваемых вариантов, так и для любых из различных существующих и возможных нетрадиционных кон-

струкций активной части ИСУ. Кроме того, для исключения зависимости от мощности и способа охлаждения, основные ПТУ ИСУ и основные УП должны быть представлены в относительных единицах. Изложенному условию универсальности соответствует метод оптимизации [10], согласно которому любая структура однофазной или многофазной ЭМС может быть представлена совокупностью полных ЦФ $F_{цi}$

$$F_{цi} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{и}} \right)^3 K_i \Pi_{ia}^*, \quad (1)$$

где $\Pi_{и}$ – показатель исходных данных и ЭМН ИСУ; K_i – коэффициент соответствующих Π_{ia}^* удельных характеристик используемых электротехнических материалов; Π_{ia}^* – относительная составляющая полной ЦФ одного из основных ПТУ ($i=1..4$) ЭМС в виде относительных коэффициентов-показателей соответственно массы Π_{1a}^* , стоимости Π_{2a}^* и потерь активной мощности Π_{3a}^* , а также контурного объема Π_{4a}^* сферы или цилиндра диаметра D_k окружности (рис. 2, б), описанной относительно ЭМС ИСУ компактного исполнения.

Показатель исходных данных и ЭМН, например для трехфазного двухобмоточного трансформатора, определяется выражением

$$\Pi_{итт} = \frac{S_n}{6,66 f_1 B_c} \left(\frac{K_{u1} \cos \varphi_2}{\Delta_1 \eta \cos \varphi} + \frac{K_{u2}}{\Delta_2} \right),$$

где S_n – номинальная мощность; f_1 – частота сети; B_c – среднее значение амплитуды индукции в стержне; $K_{u1(2)}$ – коэффициент изменения напряжения трансформатора под нагрузкой; $\cos \varphi_2$ и $\cos \varphi$ – энергетические коэффициенты нагрузки и трансформатора; $\Delta_{1(2)}$ – плотность тока первичной (вторичной) обмотки [10].

Показатели $\Pi_{1(2)a}^*$ определяются без учета массы (стоимости) конструктивных элементов вариантов ИСУ. Также не учитывается главная изоляция обмоток, которая незначительно увеличивает общую массу (стоимость) ЭМС относительно входящих в нее электротехнических материалов и приблизительно одинакова у сравниваемых вариантов. Указанные показатели являются функциями коэффициента заполнения обмоточного окна проводящим материалом обмоток (класса напряжения) K_{30} и двух основных универ-

сальных относительных геометрических УП a_m и λ_o , а также используемой в некоторых ЭМС третьей дополнительной геометрической УП α_c (рис.1, а и 1, б). Показатель Π_{3a}^* также является функцией K_{3o} , a_m и λ_o , но дополнительно зависит от коэффициента K_y соотношения удельных характеристик электротехнических материалов в заданном диапазоне изменения соотношения ЭМН:

$$\Pi_{1(2)a}^* = f(K_{3o}, a_m, \lambda_o, \alpha_c); \quad (2)$$

$$\Pi_{3a}^* = f(K_{3o}, a_m, \lambda_o, \alpha_c, K_y). \quad (3)$$

Геометрические УП a_m и λ_o определяются отношениями наружного D_n и внутреннего D_b расчетных диаметров (рис. 1, а, и рис. 2, г) и высоты h_o и ширины b_o обмоточного окна (рис.1, б, и 2, г) магнитопровода:

$$a_m = D_n / D_b; \quad (4)$$

$$\lambda_o = h_o / b_o. \quad (5)$$

Необходимость введения координаты α_c возникает, например, при решении задачи анализа и оптимизации планарной (рис. 1, а) и пространственных аксиальных ЭМС повышенной компактности. В планарной ЭМС при уменьшении угла α_c относительно значения, соответствующего квадрату (рис.1, б), увеличивается средняя длина витка и масса обмоточных катушек и снижается масса магнитопровода [2]. Габаритные размеры пространственной аксиальной ЭМС с комбинированным стыковым магнитопроводом уменьшаются заменой образующих контуров в виде окружности или равностороннего шестигранника на симметричные шестигранные контуры [9 – 11]. При этом с увеличением α_c также увеличивается масса обмоточных катушек и снижается масса магнитопровода.

Кроме того, Π_{ia}^* зависят от соотношений удельных характеристик электротехнических материалов. Π_{1a}^* и Π_{4a}^* зависят от соотношения плотностей γ_o/γ_c , Π_{2a}^* зависит от соотношений указанных плотностей и стоимостей C_o/C_c активного материала обмоток и ЭТС магнитопровода, а Π_{3a}^* совместно с K_y зависит от плотностей и удельных потерь обмоток и ЭТС магнитопровода и известных коэффициентов добавочных потерь холостого хода и нагрузки [2, 6, 12].

Плоскости структурного положения геометрических параметров D_n , D_b и h_o , b_o , α_c при разработке математической модели любого из существующих и возможных вариантов ЭМС выбираются исходя из обеспечения функциональной унимодальности, т.е. возможности определения явного экстремума (минимума) Π_{iamin}^* относительной ЦФ ПТУ.

Структурная оптимизация ЭМС методом относительных коэффициентов ПТУ [10] заключается в определении и сравнении, вне зависимости от составляющих Π_{ia} (1), экстремумов Π_{iamin}^* относительных ЦФ Π_{ia}^* . Показатель Π_{ia} в структурной оптимизации не используется и принимается, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, идентичным для сравниваемых вариантов ЭМС одинакового назначения и исполнения. ЦФ (1) в целом может использоваться в поэтапной параметрической оптимизации конкретной разработки ИСУ по одному из Π_{ia}^* с варьированием, в последующих этапах и итерациях, ЭМН при заданных проектных ограничениях (превышение температуры обмоток, напряжение короткого замыкания и пр.). На основе Π_{ia}^* может быть составлена также ЦФ интегрального ПТУ, например функция полной капитализированной стоимости трансформатора, учитывающая стоимость ЭМС, потерь холостого хода и нагрузочных потерь [5], или обобщенная функция многокритериального ПТУ ИСУ и обобщенного «веса» коэффициента в относительных единицах [8].

Различие существующих структур обмоток [2, 12, 13] усложняет процесс анализа вариантов ЭМС ИСУ. Поэтому для упрощения решения задачи структурной оптимизации ЭМС реальные обмотки заменяются эквивалентными. В вариантах ЭМС с прямоугольными обмоточными окнами, например изображенных на рис.1, а, концентрические обмотки заменяются эквивалентными чередующимися с одинаковой средней длиной витка катушек высокого и низкого напряжений [10]. При этом возникает необходимость замены реальных обмоток трансформатора в обмоточных окнах нетрадиционной конфигурации, например ромбической в радиальной ЭМС (рис. 2, а), эквивалентной (по мощности, занимаемой площади обмоточно-

го окна и материалоемкости, а также потерям) расчетной обмоткой [7].

Сравнительный анализ вариантов структуры ЭМС выполняется, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, при следующих допущениях [1, 10]. Принимается, что средние значения амплитуд индукции в стержнях и прямых участках ярем, а также известные коэффициенты заполнения магнитопровода ЭТС [2, 5, 12] каждой из ЭМС соответственно одинаковы. Используются чередующиеся или эквивалентные обмотки с одинаковыми плотностями токов и с радиусами изгиба угловых зон внутренних витков равными величине изоляционного промежутка между катушкой и стержнем. При этом разработка математической модели анализа массо-стоимостных показателей, компактности или энергетической эффективности ЭМС выполняется на основе формул (1) – (5) и использования двух базисных уравнений зависимостей площади ЭТС поперечного сечения стержня S_c от площади обмоточного окна S_o , а также массы активного материала чередующейся или эквивалентной обмотки от S_o и средней длины витка l_w . Для трехфазного трансформатора указанные уравнения имеют известный вид [1]:

$$S_c = \Pi_{итт} / (K_{30} S_o); \quad (6)$$

$$m_{отт} = 1,5 \gamma_o K_{30} S_o l_w. \quad (7)$$

Для определения аналогичных (6) и (7) уравнений реактора (дресселя) с замкнутым магнитопроводом используются выражения электродвижущей силы одного витка обмотки E_b и линейного тока I_p трехфазного реактора [2]:

$$E_b = 4,44 f_1 B_c S_c; \quad (8)$$

$$I_p = Q_n / (\sqrt{3} U_1), \quad (9)$$

где Q_n и U_1 – номинальная мощность реактора и линейное напряжение сети.

Эффективное сечение витка $S_{в\Delta(Y)}$ и число витков фазы реактора $w_{p\Delta(Y)}$ при соединении обмотки по схеме треугольник (звезда) определяются соотношениями с учётом [8]:

$$S_{в\Delta} = I_p / (\sqrt{3} \Delta_p); \quad (10)$$

$$S_{вY} = I_p / \Delta_p; \quad (11)$$

$$w_{p\Delta} = U_1 / E_b = U / (4,44 f_1 B_c S_c); \quad (12)$$

$$w_{pY} = U_1 / (\sqrt{3} E_b) = U / (7,69 f_1 B_c S_c), \quad (13)$$

где Δ_p – плотность тока обмотки реактора.

Площадь обмоточного окна магнитопровода реактора представляется, на основе (10) – (13), уравнением

$$S_o = \frac{2 S_{в\Delta} w_{p\Delta}}{K_{30}} = \frac{2 S_{вY} w_{pY}}{K_{30}} = \frac{I_p U_1}{3,845 \Delta_p f_1 B_c S_c K_{30}}. \quad (14)$$

После подстановки в последнюю формулу выражения (9) оно преобразуется к виду, аналогичному (6):

$$S_o = Q_n / (6,66 f_1 B_c \Delta_p S_p K_{30}) = \Pi_{итр} / (K_{30} S_c), \quad (15)$$

где $\Pi_{итр}$ – показатель исходных данных и ЭМН трехфазного реактора,

$$\Pi_{итр} = Q_p / (6,66 f_1 B_c \Delta_p).$$

Масса обмотки трехфазного реактора со схемой соединения фаз Δ (Y) определяется, с использованием формул (9) – (13):

$$m_{отр} = m_{тр\Delta} = m_{трY} = 3 \gamma_o S_{в\Delta(Y)} w_{p\Delta(Y)} l_w = 1,5 \Pi_{итр} \gamma_o l_w / S_c. \quad (16)$$

С учётом выражения (15) последняя формула упрощается до вида, аналогичного (7),

$$m_{отр} = 1,5 \gamma_o K_{30} S_o l_w. \quad (17)$$

В связи с идентичностью УП и исходных выражений соответственно (6) и (15), а также (7) и (17), ЦФ (1) трансформатора и реактора с ЭМС одинаковой структуры содержат идентичные составляющие K_i Π_{ia}^* и отличаются только показателями исходных данных и ЭМН соответственно $\Pi_{итт}$ и $\Pi_{итр}$. Из последнего следует практический вывод об упрощении решения задач определения оптимальных геометрических соотношений ЭМС трансформатора со сложной конфигурацией обмоточного окна. Среднюю длину витка и массу обмоток трансформатора в относительных единицах можно определять на основе замены системы обмоток высокого и низкого напряжений расчетной обмоткой структурно эквивалентного реактора с замкнутым магнитопроводом.

Выводы

1. Использование квадратной конфигурации сечений стержней и шестигранной образующей внешнего контура вариантов витого стыкового и шихтованного впереплет с косыми стыками магнитопроводов создает возможности усовершенствования и упрощения производства соответственно планарной и

пространственной радиальной трехфазных ЭМС.

2. У идентичных структур активные части трансформаторов и реакторов с замкнутыми магнитопроводами одинаковы. При идентичных критериях оптимизации в относительных единицах средние длины витков и массы расчетных обмоток, а также основные ПТУ и оптимальные геометрические соотношения ЭМС по критериям минимумов массы, стоимости, потерь активной мощности и контурного объема также одинаковы.

Список использованной литературы

1. Авдеева Е. А. Модель массы и стоимости трехфазной радиальной электромагнитной системы с ромбическими обмоточными окнами и прямоугольным сечением двухконтурных стержневых частей шихтованного магнитопровода [Текст] / Е. А. Авдеева // *Электротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2012. – № 7(83). – С. 53 – 57.

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

3. Веселовский О. Н. У истоков электро-механики. Столетие трансформатора [Текст] / О. Н. Веселовский, И. П. Копылов // *Электротехника*. – 1984. – № 11. – С. 62 – 63.

4. Кравченко А. Масляные энергосберегающие трансформаторы [Текст] / А. Кравченко, В. Метельский // *Электрик. Международный электротехнический журнал*. – К. : Радиоаматор, 2013. – № 5. – С. 14 – 17.

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

6. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий [Электронный ресурс] / В. А. Бормосов, М. Н. Костоусова, А. Ф. Петренко, Н. Е. Смольская.

Режим доступа <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (13.09.2004).

7. Пуйло Г. В. Обобщенная математическая модель для синтеза и анализа силовых трансформаторов [Текст] / Г. В. Пуйло, Е. В.

Трищенко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – № 2. – С. 42 – 45.

8. Пентегов И. В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов [Текст] / И. В. Пентегов, С. В. Рымар // *Электричество*. – 2006. – № 3. – С. 35 – 47.

9. Ставинский А. А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин [Текст] / А. А. Ставинский // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 1. – С. 44 – 48.

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

11. Ставинский А. А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров [Текст] / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский, Е. А. Авдеева // *Электротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2013. – № 11(87). – С.74 – 81.

12. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

13. Flanagan W.M. (1993), *Handbook of Transformers Design and Applications*, Boston, *Mc Graw Hill*, 232 p.

14. Moore S., Harry Bohm, and Vickie Jensen. *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*, (2010), *Publisher: Marine Advanced Technology Education (MATE) Center*, 770 p.

Получено 07.04.2014

References

1. Avdieieva E.A. Sravnitelnyi analiz planarnoi i pronstranstvennoi aksialnoi trehfaznih elektromagnitnih sistem s parallelnimi obrazuyuschimi poverhnostjami stergnei i obmotochnih okon (massostoimostnie pokazateli) [The Comparative Analysis of Planar and Spatial Axial three-phase Electromagnetic Systems with Parallel Forming Surfaces of Rods and coil Windows (mass and cost Indicators)], (2012), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ.*, Vol 4, pp.15 – 20 (in Russian).

2. Belopol'skii I.I., Karetnikova E.I., and Pikalova L.G. Raschet transformatorov i dros-selej maloj moschnosti [Calculation of Transformers and Inductors with low Capacity], (1973), *Energiya Publ.*, 2nd ed., Moscow, Russian Federation (in Russian).

3. Veselovskiy O.N., and Kopylov I.P. U istokov elektromechaniki. Stoletie transformatora [At the Root of Electromechanics. Century of Transformer], (1984), *Electrotechnika Publ.*, Vol. 11, pp. 62 – 63 (in Russian).

4. Kravchenko A., and Metelskiy V. Masljanje energosberegajuschie transformatori [Oil Energy Saving Transformers], (2013), *Electric. International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 5, pp. 14 – 17 (in Russian).

5. Lizunova S.D., and Lohanina A.K. Silovie transformatori. Spravochnaja kniga [Power Transformers. Handbook], (2004), *Energoatomizdat Publ.*, Moscow, Russian Federation (In Russian).

6. Bormosov V.A., Kostousov M.N., Petrenko A.F., and Smolskaya N.E. Perspektivi i sostojanie razrabotok raspredelitelnih transformatorov massovih serij [Prospects and Status of Development of Mass Series Distribution Transformers], (2004), (In Russian), available at: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (accessed: 13 September 2004).

7. Puylo G.V., and Trishchenko E.V. Obobshchennaja matematicheskaja model dlja sinteza i analiza silovih transformatorov, [A Generalized Mathematical Model for the Synthesis and Analysis of Power Transformers], (2005), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ.*, Vol. 2, pp. 42 – 45 (in Russian).

8. Pentegov I.V., and Rymar S.V. Optimizatsija matematicheskikh modelej transformatorov i reaktorov [Optimization of Mathematical Models of Transformers and Reactors], (2006), *Elektrichestvo Publ.*, Vol. 3, pp. 35 – 47 (in Russian).

9. Stavinskiy A.A. Osobennosti naznachenija i ispolzovaniya spetsialnih elektricheskikh mashin [Assignment and Application Features of Special Electrical Machines], (2008), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ.*, Vol. 1. pp. 44 – 48 (in Russian).

10. Stavinskiy A.A., Plahtir O.O., and Stavinskiy R.A. Pokazateli kachestva i strukturnoj optimizatsii prostranstvennih elektromagnitnih sistem trehfaznih transformatorov, reaktorov i drosselej [Quality Indicators and Structural Optimization of

Spatial Electromagnetic Systems of three-phase Transformers, Reactors and Chokes, (2003), *Elektrotehnika i Elektromehanika Publ.*, Vol. 4, pp.79 – 82 (in Russian).

11. Stavinskiy A.A., Stavinskiy R.A., and Avdieieva E.A. Formirovanie struktur staticheskikh elektromagnitnih sistem na osnove netraditsionnih obrazujuschih konturov [The Structural Conversion of Static Electromagnetic Systems Based on Non-traditional form of Contours], (2013), *Electromechanic and Computer systems Publ.*, Vol. 11(87), pp. 74 – 81 (in Russian).

12. Tikhomirov P.M. Raschet transformatorov: uchebnoe posobie dlja vuzov [The Calculation of Transformers: Studies Manual for high Schools], (1986), *Energoatomizdat Publ.*, Moscow, Russian Federation (In Russian).

13. Flanagan W.M. Handbook of Transformers Design and Applications, (1993), *McGraw Hill*, Boston, USA (in English).

14. Moore S., Bohm H., and Jensen V. Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication, (2010), *Marine Advanced Technology Education (MATE) Center Publ.*, Monterey, USA (in English).



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



Ставинский Ростислав Андреевич, канд. техн. наук, доц. каф. электрооборудования судов и информационной безопасности НУК им. адм. Макарова, тел. (0512) 39-94-54, e-mail: stostand@mail.ru



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