

* * *

Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 1. Варианты и метод оценки преобразований

СТАВИНСКИЙ А.А., СТАВИНСКИЙ Р.А., АВДЕЕВА Е.А.

В последние десятилетия расширяется диапазон мощности использования прямоугольных сечений стержневых и витых элементов магнитопроводов индукционных статических устройств. Перспективным направлением решения задач новых разработок трехфазных трансформаторов является создание пространственных разъемных магнитопроводов с витыми элементами. Рассмотрены особенности нетрадиционных структур и конструкций трехфазных планарной и пространственных аксиальных, а также радиальной статической электромагнитных систем соответственно с прямоугольными, секторными и шестигранными образующими контурами стержневой стыковых магнитопроводов и обмоточных катушек. Планарный магнитопровод отличается от традиционных шихтованных и витых аналогов соответственно меньшими массой и потерями и исключением добавочных потерь от третьих гармоник секционных магнитных потоков. Пространственные структуры отличаются повышенной компактностью и пониженной трудоемкостью производства вариантов комбинированного и витых магнитопроводов. Рассмотрен метод оптимизационного сравнительного анализа электромагнитных систем, отличающихся положением в пространстве, конфигурацией образующих контуров и способами изготовления элементов. Метод использует целевые функции с относительными показателями технического уровня и относительными геометрическими управляемыми переменными. Показана идентичность относительных 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, магнитопровод, обмотка, образующие контуры, метод анализа, управляемые переменные

Основные конфигурации сечений стержней магнитопроводов и витков катушек обмоток «традиционных» конструкций планарных электромагнитных систем (ЭМС) трансформаторов, реакторов и дросселей образованы прямоугольными и круговыми контурами [1–6]. Электромагнитные системы с указанными образующими контурами (ОК) практически неизменны на протяжении многих лет, характеризуются известными недостатками [2, 4] и отсутствием потенциала дальнейшего конструктивно-структурного развития. Вопросы энергоресурсосбережения при разработке названных индукционных статических устройств (ИСУ) решались на основе усовершенствования электротехнических материалов и усложнения технологии изготовления элементов ЭМС [6–13]. Например, вместо традиционных применяются транспонированные обмоточные провода, а в передовых западноевропейских фирмах внедрен весьма затратный способ раскря электротехнической стали (ЭТС) и сборки «Step-lap» планарных шихтованных магнитопроводов с «косыми» стыками [6, 7].

В последние десятилетия повышается мощность трансформаторов с прямоугольными сечениями стержней витых и шихтованных магнитопроводов. Такие магнитопроводы используются взамен «ступенчатых» в сериях Tumetic (ФРГ) и ОСМ (Япония), что позволило снизить их массу и трудоемкость производства на 3,6% и 25,30% соответственно [7]. В трансформаторах серии ОСМ устанавливаются витые разрезные магнитопроводы с травлением и полировкой зон стыков. При изготовлении по типу «витых разрезных» разъемных магнитопроводов с косыми стыками компания AEM Coges (Австралия) применяет технологию и оборудование «Unicoge» набора и изгиба полос ЭТС различной длины [8]. Расширяется использование аморфной ЭТС при производстве трансформаторов мощностью до 2500 кВ·А [7, 11–13]. Однако из-за низкой механической прочности магнитопроводы из аморфного «стеклянного металла» не могут выполнять функции несущей конструкции и крепятся к опорно-изоляционной базе обмоток [13]. Также в [11] указывается, что применение аморфной ЭТС предполагает изменение формы обмоток и общей конструкции ЭМС. Известные проблемы прямоугольных ОК обмоточных витков решаются использованием ленточных проводников, а электродинамическая устойчивость обмоток с катушками прямоугольной формы обеспечивается отвердевающим при сушке клеящим покрытием межслоевой изоляции или капсулированием [7, 11].

Перспективным направлением решения задач новых разработок трехфазных трансформаторов (ТТ) мощностью 25,630 кВ·А определено создание

пространственных ЭМС с разъемными витыми магнитопроводами, в которых достигается наибольший эффект применения новых высокопроницаемых анизотропных и аморфных ЭТС [7]. Согласно [14] при проектировании распределительных ТТ блочного исполнения представляется целесообразным использование пространственных ЭМС. Конфигурации таких ЭМС обеспечивают конструктивное соответствие цилиндрической форме генераторов и направлениям потоков принудительного охлаждения. Поэтому возможно улучшение массогабаритных и энергетических показателей генерирующих агрегатов. Кроме того, известные варианты конструктивных схем пространственных аксиальных ЭМС [2, 4] отличаются наличием свободного пространства в зонах внутренних контуров ярм и обмоток. Указанная особенность позволяет интегрировать с целью энергоресурсосбережения комплексное оборудование принудительной циркуляции хладагента, например трансформаторного масла, в единый погружной электронасос с трубопроводами и масляными коллекторами из прессующих элементов магнитопровода [15].

В ближайшем будущем для усовершенствования ИСУ планируется также использоваться новые разработки электромагнитоведения, в частности, высокотемпературные сверхпроводящие обмотки, «элегазовую», «кабельную» и «гибридную» изоляцию [9, 10]. Однако возможности энергоресурсосбережения посредством развития металлургии, изоляционно-кабельной техники и нанотехнологий ограничены пределами физических свойств материалов и высоким коэффициентом полезного действия трансформаторов. Поэтому вне зависимости от используемых материалов резервом дальнейшего развития ИСУ представляется преобразование структур и конфигураций элементов планарных, а также аксиальных и радиальных пространственных ЭМС [14–19].

Кроме производства эффективных распределительных ИСУ существует необходимость разработки и усовершенствования компактных, маломощных и виброударостойких «нетрадиционных» конструкций трансформаторов, предназначенных для встраивания в цилиндрические и сферические оболочки ограниченного диаметра [16, 17].

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

Исходя из возможностей использования различных ОК, положений в пространстве и особенно

стей замыкания магнитного поля элементов ЭМС [14–19], целесообразно аналитически провести сравнительный анализ 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 [4–7, 20]. Например, одним из взаимонеприемлемых геометрических УП оптимизации традиционных ЭМС является соотношение сторон прямоугольного сечения и диаметр образующего контура секционированного «ступенчатого» сечения стержня. Указанное несоответствие затрудняет объективный сравнительный анализ различных структурных вариантов ЭМС. В связи с этим предложены целевые функции (ЦФ) структурной оптимизации ЭМС с относительными коэффициентами – показателями технического уровня (ПТУ) и универсальными геометрическими УП [16].

В статье приводится обзор и анализ различных нетрадиционных конструкторско-технологических решений ЭМС ИСУ, и, кроме того, в первой части приводится обоснование идентичности вида исходных уравнений и ЦФ, определяющих основные ПТУ трансформатора и реактора (в отн. ед.) на основе универсального метода аналитического оптимизационного сравнительного анализа различных структур ЭМС.

Со второй половины прошлого века вместо изотропной листовой используется анизотропная рулонная ЭТС [1–7]. Это способствовало освоению в дополнение к шихтованным виткам из ленты (рулона) ЭТС планарных магнитопроводов, а также пространственных аксиальных магнитопроводов [4, 7].

Трехфазные планарные витые магнитопроводы характеризуются отсутствием магнитной связи двухконтурных фазных элементов (стержневых участков), повышенной магнитной несимметрией и добавочными потерями от третьих гармоник магнитных потоков независимых секций [4, 7]. Снизить массу и основные потери угловых зон трехфазных планарных магнитопроводов шихтованных из прямоугольных пластин анизотропной ЭТС или исключить потери от третьей гармоники витых магнитопроводов позволяет трехфазная ЭМС [19]. Магнитопровод такой ЭМС (рис. 1,а) содержит симметричные боковые 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 соответственно набирается из идентичных пластин ЭТС или 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 с различной длиной l_1 и l_2 прямоугольных внутренних контуров (рис. 1,в и г):

$$l_1 = h_M + 2b_0; \quad l_2 = 2b_0,$$

где b_0 – ширина обмоточного окна.

При минимальной толщине ленты (аморфная ЭТС) технологические отклонения размеров заготовок (рис. 1,в и г) минимальны. Обмоточные катушки ЭМС (рис. 1,а) наматываются на изоляционные каркасы, охватывающие средние стержневые участки элементов магнитопровода. В соответствии с [11, 13] такие каркасы должны составлять

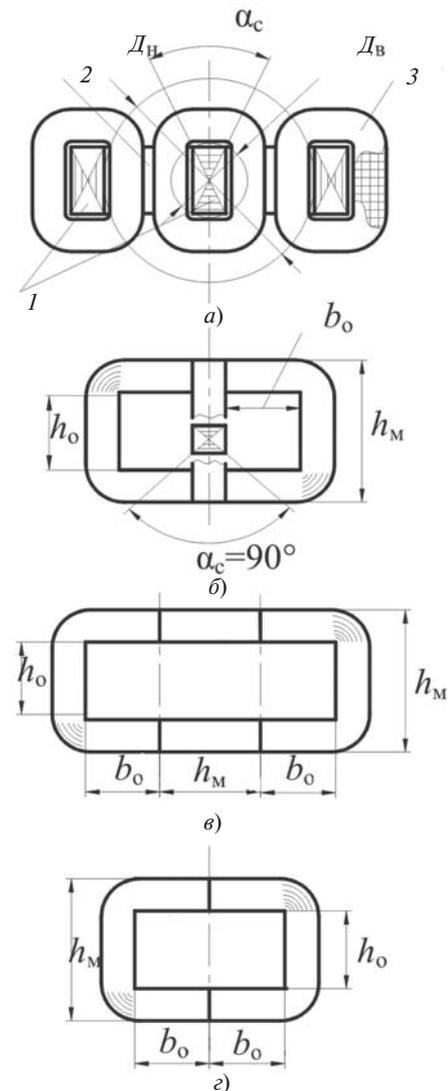


Рис. 1. Поперечная структура (а), конструктивная схема (б) и заготовки (в, г) элементов стыкового магнитопровода планарной электромагнитной системы: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

несущую базу ЭМС с аморфной ЭТС. Стыковые сопряжения боковых и среднего элементов конструкции (рис. 1,б) характеризуются взаимной перпендикулярностью плоскостей слоев ЭТС и должны изолироваться. Проблема изоляции стыков магнитопроводов трансформаторов должна решаться посредством прочных тонких термостойких покрытий, используемых для изолирования проката ЭТС.

Симметричные пространственные ЭМС более приспособлены к применению в объектах специального, например подводного или авиационно-космического назначения [17]. Однако реализованные практически ЭМС (рис. 2) разработаны на основе понижающих компактность круговых ОК с их неполным заполнением сечениями стержней из пакетов пластин ЭТС разной ширины (рис. 2,а) или стержневых участков секций (рис. 2,б) из разверток ленты ЭТС изменяющейся ширины (рис. 2,в). Заполнение круговых ОК сечениями стержней в ЭМС (рис. 2) мощностью до 1000 кВ·А характеризуется контурным коэффициентом $K_{кк} \approx 0,9$ [4].

В [15–19] представлены варианты структурных преобразований планарных и пространственных, аксиальных и радиальных ЭМС однофазных и трехфазных ИСУ на основе секторных, ромбических и n -гранных ($n > 6$) ОК обмоточных окон, катушек обмоток и стержней шихтованных, витых и комбинированных магнитопроводов. Указанные преобразования и использование технологии навивки рулона ЭТС позволяет разрабатывать отличающиеся удобством встраивания в сферические и цилиндрические оболочки ограниченного диаметра трехфазные трансформаторы с совмещенными фазными элементами пространственных аксиальных

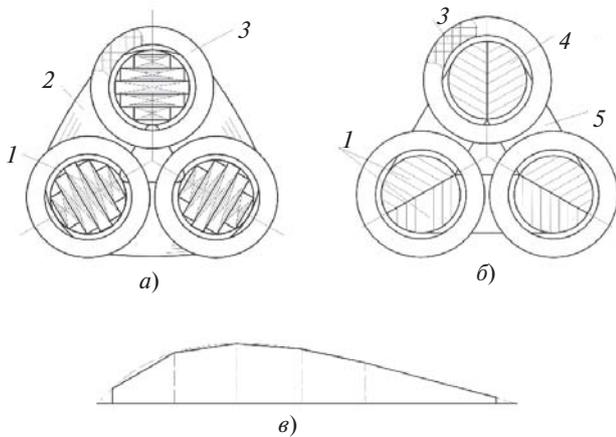


Рис. 2. Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трехфазных пространственных электромагнитных систем с комбинированным (а) и витым (б) магнитопроводами, а также условная схема развертки электротехнической стали секции магнитопровода (в): 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки; 4 – стержневой участок секции магнитопровода; 5 – яремный участок секции магнитопровода

ЭМС (рис. 3,а). Такие ЭМС могут быть реализованы на основе нескольких вариантов нетрадиционных ОК стержней стыковых магнитопроводов и обмоточных катушек, в том числе показанных на рис. 3,б и в. Также возможна разработка ИСУ с представленными в конструктивных схемах аксиальной (рис. 4) и радиальной ЭМС (рис. 5) с двухконтурными фазными элементами разрезных трехсекционных магнитопроводов. Конструкторско-технологические решения ЭМС (рис. 2–5) соответствуют изложенному предложению [7] усовершенствования ИСУ на основе пространственных разъемных магнитопроводов.

В ЭМС с секторными ОК (рис. 3,б) стержни выполняются разрезанием коаксиальных витых заготовок, что обуславливает параллельность стенок обмоточных окон и совмещение периферийных контуров стержней с угловыми участками витых ярм треугольной формы. Этим достигается снижение на 15–20% габаритных размеров ЭМС (рис. 3,б) относительно традиционных пространственных аналогов (рис. 2) и удобство встраивания в сферический контурный объем диаметра D_k (рис. 3,а). Однако конструктивные и технологические особенности магнитопровода (рис. 3,б) обуславливают ортогональность магнитного потока стержней направлению проката ЭТС, что предусматривает использование для навивки разрезных заготовок только изотропной или новой дорого-

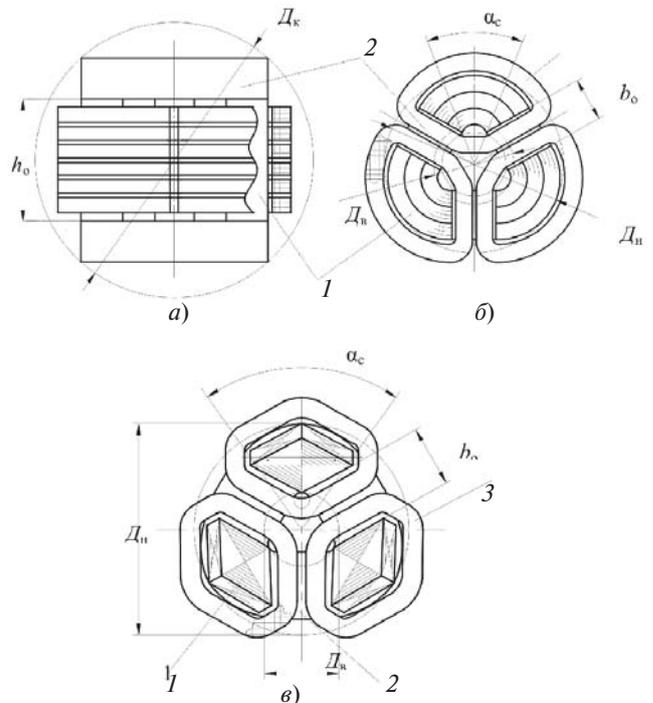


Рис. 3. Особенности структур аксиальной электромагнитной системы (а) с витым (б) и комбинированным (в) стыковыми магнитопроводами: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

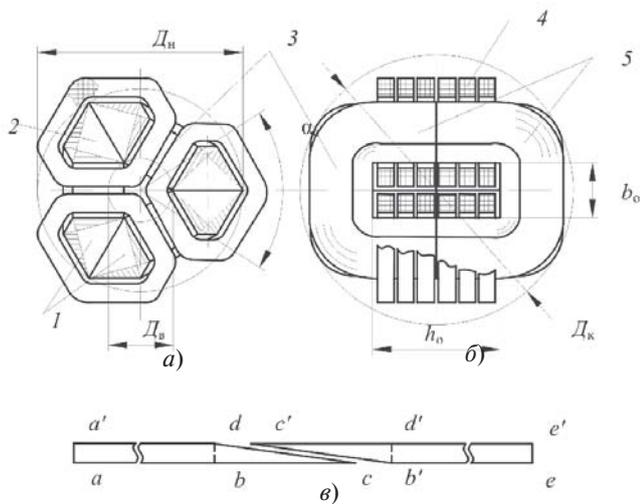


Рис. 4. Конструктивная схема в поперечном сечении (а) и общий вид (б) аксиальной электромагнитной системы с трехсекционным витым магнитопроводом: 1 – стержень; 2 – стержневой участок секции; 3 – яремный участок секции; 4 – катушка обмотки; 5 – секция магнитопровода

стоящей аморфной ЭТС. Также на наружном контуре стержней витки катушек обмоток ЭМС (рис. 3,б), как и в планарных структурах ИСУ малой мощности, отогнуты под прямыми углами, что снижает надежность.

Использование шестигранных ОК несколько снижает механическую деформацию угловых зон и среднюю длину витков катушек обмоток в ЭМС (рис. 3,в, рис. 4,а и б и рис. 5,а) относительно наружных угловых зон катушек ЭМС (рис. 3,б) и катушек традиционных ЭМС с прямоугольными сечениями стержней. Создается возможность формирования стержней или стержневых участков секций магнитопроводов ЭМС (рис. 3,а и в, рис. 4,а и б) с контурным коэффициентом заполнения $K_{\text{кш}} \gg 1$ [18] соответственно из идентичных прямоугольных пластин (рис. 3,в) и секционных заготовок (рис. 4,в) более простых (относительно стержней аналогов из пакетов пластин или лент изменяющейся ширины [2, 4]) форм и с текстурой ЭТС вдоль направления потока. Секционные заготовки (рис. 4,в) выполняются разделением прямоугольной развертки ЭТС $aee'f'c$ на две идентичные части с прямоугольными $abda$ и $b'oe'd'$, а также треугольными bcd и $b'c'd'$ участками. Это упрощает изготовление заготовок (рис. 4,в) навивки секций (рис. 4,а и б) относительно заготовок (рис. 2,в) и аналогично конструкциям (рис. 3) на 15, 20% повышает показатель компактности ЭМС.

В радиальной ЭМС (рис. 5,а) намотка витков и формирование обмоточных катушек должны соответствовать секторным формам обмоточных окон. Стержни с шестигранными сечениями вида (рис. 5,б) навиваются без осевого смещения витков

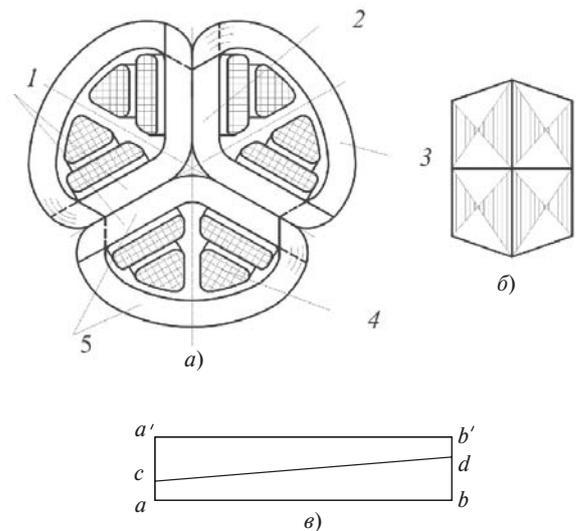


Рис. 5. Конструктивная схема радиальной электромагнитной системы с трехсекционным витым магнитопроводом (а), поперечное сечение стержня (б) и схема раздела ленты стали для навивки секций (в): 1 – стержень; 2 – стержневой участок секции; 3 – яремный участок секции; 4 – катушка обмотки; 5 – секция магнитопровода

из заготовок $abdc$, $a'f'd'c$, полученных разделением по прямой cd развертки ЭТС $abb'f'c$ прямоугольной формы (рис. 5,в).

Задачи сравнительного анализа отличающихся структур ЭМС, например представленных на рис. 1,а, рис. 4,а и б и рис. 5, 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 конфигураций элементов ИСУ. Используемые при анализе конструкций и проектировании ЭМС удельные показатели, например массы и объема, а также ЭМН зависят от мощности, назначения и способа охлаждения ИСУ. Кроме того, отображающие 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.

Структурная оптимизация вариантов ЭМС может быть выполнена при соблюдении принципа электромагнитной эквивалентности на основе определения и сопоставления экстремумов «униформальных» ЦФ, соответствующих основным ПТУ и УП, которые должны быть универсальными, т.е. приемлемыми и идентичными как для сравниваемых вариантов, так и для любых из различных существующих и возможных нетрадиционных конструкций 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. Изложенным условиям электромагнитной эквивалентности и универсальности соответствует метод оптимизации [16], согласно которому любая структура однофазной или многофазной ЭМС, в частности трехфазного трансформатора (ТТ) или трехфазного реактора (ТР), может быть представлена совокупностью полных ЦФ:

$$F_{\text{ТТ(Р)}i} = (\sqrt[4]{P_{\text{ТТ(Р)}}})^3 K_i P_{\text{ТТ(Р)}i}^* \quad (1)$$

где $P_{\text{ТТ(Р)}}$ – показатель исходных данных и ЭМН ТТ (ТР); K_i – коэффициент соответствующих $P_{\text{ТТ(Р)}i}^*$ удельных характеристик используемых электротехнических материалов; $P_{\text{ТТ(Р)}i}^*$ – относительная составляющая полной ЦФ одного из основных ПТУ ($i = 1, \dots, 4$) ЭМС в виде относительных коэффициентов – показателей соответственно массы $P_{\text{ТТ(Р)1}}^*$, стоимости $P_{\text{ТТ(Р)2}}^*$ и потерь активной мощности $P_{\text{ТТ3}}^*$, а также контурного объема $P_{\text{ТТ4}}^*$ цилиндра или сферы диаметра D_k окружности (рис. 3,а, рис. 4,б), описанной относительно ЭМС ИСУ компактного исполнения.

Показатели $P_{\text{ТТ(Р)}i}^*$ определяются без учета массы (стоимости) конструктивных элементов, которая снижается при повышении компактности 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) $K_{3,0}$ и двух основных универсальных относительных геометрических УП a_m и l_o , а также используемой в некоторых ЭМС третьей дополнительной геометрической УП a_c (рис. 1,а, рис. 3,в, рис. 4,а). Показатель $P_{\text{ТТ3}}^*$ также является функцией $K_{3,0}$, a_m и l_o , но дополнительно зависит от коэффициента $K_{y,т(Р)}$ соотношения удельных характеристик электротехнических материалов в заданном диапазоне изменения соотношения ЭМН ТТ(Р):

$$P_{\text{ТТ(Р)1(2)}i}^* = f(K_{3,0}, a_m, l_o, a_c); \quad (2)$$

$$P_{\text{ТТ(Р)3}}^* = f(K_{3,0}, a_m, l_o, a_c, K_{y,т(Р)}). \quad (3)$$

Геометрические УП a_m и l_o определяются отношениями наружного D_H и внутреннего D_B расчетных диаметров (рис. 1,а, рис. 3,б и в, рис. 4,а), а

также высоты h_o и ширины b_o обмоточного окна (рис. 1,б, рис. 3, рис. 4,а и б) магнитопровода:

$$a_m = D_H / D_B; \quad (4)$$

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

Необходимость введения координаты a_c возникает, например, при решении задачи анализа и оптимизации планарных и пространственных аксиальных ЭМС соответственно с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней [19]. В планарной ЭМС (рис. 1,а) при уменьшении угла a_c относительно значения, соответствующего квадрату, увеличиваются средняя длина витка и масса обмоточных катушек, но снижается масса магнитопровода. Габаритные размеры пространственной аксиальной ЭМС с комбинированным стыковым магнитопроводом уменьшаются заменой ОК в виде окружности (рис. 2,а) или равностороннего шестигранника на симметричные шестигранные контуры [18]. При этом с увеличением a_c также увеличивается масса обмоточных катушек и снижается масса магнитопровода [19].

Кроме того, $P_{\text{ТТ(Р)}i}^*$ зависят от соотношений удельных характеристик электротехнических материалов. Показатели $P_{\text{ТТ(Р)1}}^*$ и $P_{\text{ТТ(Р)4}}^*$ зависят от отношения плотностей g_o / g_c , $P_{\text{ТТ(Р)2}}^*$ зависит от соотношений указанных плотностей и стоимостей C_o / C_c активного материала обмоток и ЭТС магнитопровода, а $P_{\text{ТТ(Р)3}}^*$ совместно с $K_{y,т(Р)}$ зависит от плотностей и удельных потерь обмоток и ЭТС магнитопровода и известных коэффициентов добавочных потерь холостого хода и нагрузки [1–7].

Плоскости структурного положения геометрических параметров D_H , D_B и h_o , b_o , a_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) $P_{\text{ТТ(Р)}i}^* \min$ относительной составляющей ЦФ ПТУ.

Структурная оптимизация ЭМС методом относительных коэффициентов ПТУ [16] заключается в определении и сравнении вне зависимости от составляющих $P_{\text{ТТ(Р)}}^*$ (1), экстремумов $P_{\text{ТТ(Р)}i}^* \min$ относительных ЦФ $P_{\text{ТТ(Р)}i}^*$. Показатель $P_{\text{ТТ(Р)}}^*$ в структурной оптимизации не используется и принимается в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, идентичным для сравни-

ваемых вариантов ЭМС одинакового назначения и исполнения. Целевая функция (1) в целом может использоваться в поэтапной параметрической оптимизации конкретной разработки ИСУ по одному из $P_{\text{тг(р)}}^*$ с варьированием в последующих этапах и итерациях ЭМН при заданных проектных ограничениях (превышение температуры обмоток, напряжение короткого замыкания и т.д.). Также на основе (1) может быть составлена ЦФ интегрального ПТУ, например функция полной капитализированной стоимости ТТ(ТР), учитывающая стоимости ЭМС, потерь холостого хода и нагрузочных потерь [6], или обобщенная функция многокритериального ПТУ ИСУ и обобщенного «весового» коэффициента в относительных единицах [20].

Различия существующих структур обмоток [1–6] усложняют процесс анализа вариантов ЭМС ИСУ. Поэтому для упрощения решения задачи структурной оптимизации ЭМС реальные обмотки заменяются эквивалентными. В магнитопроводах вариантов ЭМС с прямоугольными обмоточными окнами, например представленных на рис. 1,б; рис. 2 – рис. 4, концентрические обмотки заменяются эквивалентными чередующимися с одинаковой средней длиной витка катушек высокого и низкого напряжений [16]. При этом возникает необходимость замены реальных обмоток трансформатора в обмоточных окнах нетрадиционной конфигурации эквивалентной (по мощности, занимаемой площади обмоточного окна и материалоемкости, а также потерям) расчетной обмоткой. Примером подобной конфигурации являются секторные обмоточные окна магнитопровода радиальной ЭМС (рис. 5,а).

Составляющие $P_{\text{тг}}$ и $P_{\text{тр}}$ ЦФ (1) определяются на основе известных выражений и соотношений [1–4] по заданным ЭМН и данным технического задания на разработку ИСУ – среднему значению амплитуды индукции стержня $B_{\text{ст(р)}}$ и номинальной мощности $S_{\text{н}}$ ($Q_{\text{н}}$) ТТ(ТР), плотности токов $J_{1(2)}$ и $J_{\text{р}}$, а также линейным напряжениям $U_{1(2)}$ и $U_{\text{р}}$ первичной (вторичной) обмотки ТТ и обмотки ТР при частоте сети f_1 . Кроме того, при проектировании задаются соответствующее $U_{1(2)}$ или $U_{\text{р}}$ значение $K_{3,0}$, энергетический коэффициент нагрузки $\cos j_2$, значения коэффициента полезного действия η и энергетического коэффициента $\cos j_2$ ТТ малой мощности и рассчитываются коэффициенты $K_{U1(2)}$ номинального изменения напряжения под нагрузкой $DU_{\%}$ [1]:

$$K_{U1} = 1 - DU_{\%} / 200; \quad (6)$$

$$K_{U2} = 1 + DU_{\%} / 200. \quad (6a)$$

Сечения эффективных витков обмоток высокого (низкого) напряжений $S_{\text{В1(2)}}$ и $S_{\text{ВД(У)}}$ со схемы соединений фаз D/Y и Y(D), а также номинальными токами $I_{1(2)}$, $I_{\text{р}}$ соответственно ТТ и ТР определяются соотношениями:

$$S_{\text{В1}} = I_1 / (\sqrt{3}J_1); \quad (7)$$

$$S_{\text{В2}} = I_2 / J_2; \quad (7a)$$

$$S_{\text{ВД}} = I_{\text{р}} / (\sqrt{3}J_{\text{р}}); \quad (7б)$$

$$S_{\text{ВУ}} = I_{\text{р}} / J_{\text{р}}, \quad (7в)$$

где $I_{1(2)}$ и $I_{\text{р}}$ определяются известными выражениями [1, 3]:

$$I_1 = S_{\text{н}} \cos j_2 / (\sqrt{3}U_1 \hbar \cos j_1); \quad (8)$$

$$I_2 = S_{\text{н}} / (\sqrt{3}U_2); \quad (9)$$

$$I_{\text{р}} = Q_{\text{н}} / (\sqrt{3}U_{\text{р}}). \quad (10)$$

Площади обмоточных окон ТТ и ТР с замкнутым магнитопроводом $S_{\text{о,т}}$ и $S_{\text{о,р}}$ определяются числами витков первичной (вторичной) обмотки ТТ $w_{1(2)}$ и обмотки ТР $w_{\text{рД(У)}}$:

$$S_{\text{о,т}} = 2(S_{\text{В1}} w_1 + S_{\text{В2}} w_2) / K_{3,0}; \quad (11)$$

$$S_{\text{о,р}} = 2S_{\text{ВД}} w_{\text{рД}} / K_{3,0} = 2S_{\text{ВУ}} w_{\text{рУ}} / K_{3,0}. \quad (11a)$$

После подстановки (6)–(7а) и (7б)–(10) выражения (11) и (11а) преобразуются:

$$S_{\text{о,т}} = \frac{2S_{\text{н}} \cos j_2}{\sqrt{3}K_{3,0}} \frac{w_1 \cos j_2}{\sqrt{3}U_1 J_1 \hbar \cos j_1} + \frac{w_2}{U_2 J_2}; \quad (12)$$

$$S_{\text{о,р}} = \frac{2Q_{\text{н}} w_{\text{рД}}}{3U_{\text{р}} I_{\text{р}} K_{3,0}} = \frac{2Q_{\text{н}} w_{\text{рУ}}}{\sqrt{3}U_{\text{р}} I_{\text{р}} K_{3,0}}. \quad (12a)$$

Значение ЭДС одного витка (единица измерения – В) при измерении $B_{\text{с,т(р)}}$ и f_1 в Тл и Гц соответственно, а также измерении площади ЭТС поперечного сечения стержня $S_{\text{с,т(р)}}$ ТТ(ТР) в м² определяется известным выражением [1–4]:

$$E_{\text{в}} = 4,44 f_1 B_{\text{с,т(р)}} S_{\text{с,т(р)}}. \quad (13)$$

На основе (6), (6а) и (13) определяются:

$$w_1 = K_{U1} U_{\text{ф1}} / E_{\text{в}} = K_{U1} U_1 / (4,44 f_1 B_{\text{с,т}} S_{\text{с,т}}); \quad (14)$$

$$w_2 = K_{U2} U_{\text{ф2}} / E_{\text{в}} = K_{U2} U_2 / (4,44 \sqrt{3} f_1 B_{\text{с,т}} S_{\text{с,т}}); \quad (14a)$$

$$w_{\text{рД}} = U_{\text{р,ф}} / E_{\text{в}} = U_{\text{р}} / (4,44 f_1 B_{\text{с,р}} S_{\text{с,р}}); \quad (14б)$$

$$w_{pY} = U_{p,\phi} / (\sqrt{3}E_B) = U_p / (4,44\sqrt{3}f_1 B_{c,p} S_{c,p}), \quad (14b)$$

где $U_{\phi 1(2)}$ и $U_{p,\phi}$ – фазные напряжения первичной (вторичной) обмотки ТТ и обмотки ТР.

После подстановки (14)–(14b) в выражения (12), (12a) получим:

$$S_{o,t} = \frac{S_H}{6,66f_1 B_{c,t} K_{3,o} S_{c,t}} \frac{\frac{2}{\pi} K_{U1} \cos j_2}{J_1 h \cos j_1} + \frac{K_{U2} \frac{\ddot{\phi}}{\ddot{\theta}}}{J_2} = \frac{\Pi_{TT}}{K_{3,o} S_{c,t}}; \quad (15)$$

$$S_{o,p} = \frac{Q_H}{6,66f_1 B_{c,p} U_p K_{3,o} S_{c,p}} = \frac{\Pi_{TP}}{K_{3,o} S_{c,p}}, \quad (15a)$$

где

$$\Pi_{TT} = \frac{S_H}{6,66f_1 B_{c,t}} \frac{\frac{2}{\pi} K_{U1} \cos j_2}{J_1 h \cos j_1} + \frac{K_{U2} \frac{\ddot{\phi}}{\ddot{\theta}}}{J_2} \quad (16)$$

$$\Pi_{TP} = Q_H / (6,66f_1 B_{c,p} J_p). \quad (16a)$$

При принятой конструкции с чередующимися катушками масса первичной (вторичной) обмотки ТТ $m_{w1(2)}$ и масса обмотки ТР m_{wp} :

$$m_{w1(2)} = 3g_0 S_{B1(2)} l_{WT} w_{1(2)}; \quad (17)$$

$$m_{wp} = 3g_0 S_{B(Y)} l_{WP} w_{pD(Y)}, \quad (17a)$$

где g_0 – плотность электротехнической меди или алюминия; l_{WT} и l_{WP} – средняя длина витков катушек обмоток ТТ и ТР.

Подставив (7)–(8), (14)–(14b) в (17) и (17a), получим:

$$m_{w1(2)} = 0,39g_0 I_{1(2)} K_{U1(2)} U_{1(2)} l_{WT} / (J_{1(2)} f_1 B_{c,t} S_{c,t}); \quad (18)$$

$$m_{wp} = 0,39g_0 I_p U_p l_{WP} / (J_p f_1 B_{c,p} S_{c,p}). \quad (18a)$$

Исходя из (8)–(10), (16)–(18) и (18a) суммарная масса обмоток ТТ и масса обмотки ТР:

$$m_{WT} = m_{w1} + m_{w2} = 1,5g_0 \Pi_{TT} l_{WT} / S_{c,t}; \quad (19)$$

$$m_{WP} = 1,5g_0 \Pi_{TP} l_{WP} / S_{c,p}. \quad (19a)$$

На основе (15), (15a) выражения (19) и (19a) можно представить в виде:

$$m_{WT} = 1,5g_0 K_{3,o} S_{o,t} l_{WT}; \quad (20)$$

$$m_{WP} = 1,5g_0 K_{3,o} S_{o,p} l_{WP}. \quad (20a)$$

Электрические потери в каждой из эквивалентных чередующихся обмоток ТТ ($J_1 = J_2 = J_T$) и обмотке ТР равны [1–4]:

$$P_{эл1(2)} = P_{y,o} J_T^2 m_{w1(2)}; \quad (21)$$

$$P_{эл,p} = P_{y,o} J_p^2 m_{wp}, \quad (21a)$$

где $P_{y,o}$ – коэффициент удельных потерь активного обмоточного материала.

Потери короткого замыкания ТТ и нагрузочные потери обмотки ТР определяются на основе [1–4] и с использованием (18), (18a), а также (21), (21a):

$$P_{WT} = K_{дWT} (P_{эл1} + P_{эл2}) = 1,5K_{дWT} P_{y,o} g_0 J_T^2 \Pi_{TT} l_{WT} / S_{c,t}; \quad (22)$$

$$P_{WP} = K_{дWP} P_{эл,p} = 1,5K_{дWP} P_{y,o} g_0 J_p^2 \Pi_{TP} l_{WP} / S_{c,p}, \quad (22a)$$

где $K_{дWT}$ и $K_{дWP}$ – коэффициенты добавочных потерь обмоток под нагрузкой ТТ и ТР.

При выражении геометрических параметров ЭМС через УП a_m , l_o и a_c расчетные выражения определения $l_{WT(p)}$ и $S_{c,t(p)}$, а также объемы элементов и массы идентичных структур и конструкций магнитопроводов и обмоток (в отн. ед.) одинаковы для трансформаторов и реакторов [19]:

$$m_{WT(p)} = \sqrt[4]{\Pi_{WT(p)}^3} \Pi_{MWT(p)}^*; \quad \Pi_{MWT}^* = \Pi_{MWP}^*; \quad (23)$$

$$m_{M.T(p)} = \sqrt[4]{\Pi_{TT(p)}^3} \Pi_{M.M.T(p)}^*, \quad \Pi_{M.M.T(p)}^* = \Pi_{M.M.P}^*, \quad (24)$$

где $\Pi_{MWT(p)}^*$ – относительный показатель массы обмотки ТТ(ТР); $m_{M.T(p)}$ и $\Pi_{M.M.T(p)}^*$ – масса и относительный показатель массы магнитопровода ТТ(ТР).

Поэтому выраженные в отн.ед. и определяемые по (23), (24) потери холостого хода и короткого замыкания, а также потери в магнитопроводах и обмотках идентичных структур и конструкций электромагнитно эквивалентных ЭМС ТТ и ТР являются одинаковыми при одинаковых $K_{y,t}$ и $K_{y,p}$.

В связи с идентичностью УП и вида правых частей исходных уравнений соответственно (15) и (15a), (20) и (20a), (22) и (22a), а также (23) и (24), ЦФ (1) трансформатора и реактора с одинаковыми структурой и конструкцией ЭМС содержат иден-

точные показатели $K_i P_{\text{ТТ}}^*$ и $K_i P_{\text{ТР}}^*$ и отличаются только показателями $P_{\text{ТТ}}$ и $P_{\text{ТР}}$. Из указанной аналогии 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 отн. ед.) можно определять на основе замены системы обмоток высокого и низкого напряжений расчетной обмоткой структурно эквивалентного реактора с замкнутым магнитопроводом.

Выводы. 1. Замена круговых образующих контуров на секторные и шестигранные дополнительно к повышению показателя компактности ЭМС и повышению контурного коэффициента стержня до $K_{\text{КШ}} \gg 1$ позволяет снизить трудоемкость производства витых и комбинированных аксиальных пространственных магнитопроводов с совмещенными и двухконтурными фазными элементами.

2. У идентичных структур активной части трансформаторов и реакторов с замкнутыми магнитопроводами при идентичных критериях оптимизации и в отн. ед. соответственно одинаковы, средняя длина витков, масса и потери расчетных обмоток и магнитопроводов, а также основные показатели технического уровня и оптимальные геометрические соотношения ЭМС по критериям минимумов массы, стоимости, потерь активной мощности и контурного объема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. — Л.: Энергия, 1970, 190 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970, 432 с.
3. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1973, 400 с.
4. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
5. Flanagan W.M. Handbook of transformers design and applications. — Boston: Mc Graw Hill, 1993, 232 p.
6. Силовые трансформаторы: Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. — М.: Энергоатомиздат, 2004, 616 с.
7. Бормосов В.А., Костоусова М.Н., Петренко А.Ф., Смольская Н.Е. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий: <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (13.09.2004)
8. Морозовский Ю. Новая технология Unicore для изготовления магнитопроводов: www.kit-e.ru/articles/circuit/2006-8-184.php
9. Белкин Г., Дробышев А., Ивакин В., Ковалев В., Панибратец А. О первых шагах в реформированной электроэнергетике. — Электротех, 2008, № 9, с. 13–16.
10. Шутова Д.И. Успехи IRL в разработке и производстве токнесущих элементов типа Roebel на основе ВТСП проводников 2-го поколения. — Сверхпроводники для электроэнергетики, 2011, т. 8, № 1, с. 1–4.
11. Янсон Ю. Группа «Трансформер» приступила к производству трансформаторов из аморфных сплавов. — Электротехнологии: эксплуатация и ремонт, 2012, № 12, с. 43–44.
12. Кравченко А., Метельский В. Сухие энергосберегающие трансформаторы. — Электрик (Международный электротехнический журнал). — Киев: Радиоаматор, 2013, № 4, с. 12–15.
13. Кравченко А., Метельский В. Масляные энергосберегающие трансформаторы. — Электрик (Международный электротехнический журнал). — Киев: Радиоаматор, 2013, № 5, с. 14–17.
14. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики. — Электротехника і электромеханіка, 2004, № 1, с. 57–61.
15. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зелёный Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей. — Электротехнические и компьютерные системы, 2010, № 1(77), с. 64–69.
16. Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей. — Электротехника і электромеханіка, 2003, № 4, с. 79–82.
17. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин. — Электротехника і электромеханіка, 2008, № 2, с. 53–58.
18. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Формирование структур статических электромагнитных систем на основе нетрадиционных образующих контуров. — Электротехнические и компьютерные системы, 2013, № 11(87), с. 74–81.
19. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Сравнение массостоймостных показателей трехфазных планарной и пространственной аксиальной статических электромагнитных систем с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней. — Электротехнические и компьютерные системы, 2013, № 12(88), с. 35–43.
20. Пентегов И.В., Рымар С.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов. — Электричество, 2006, № 3, с. 35–47.

[07.05.14]

Авторы: Ставинский Андрей Андреевич окончил в 1975 г. электромеханический факультет Одесского политехнического института. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по специальности «Энергосберегающим асинхронным двигателям». Заведующий кафедрой «Судовые электроэнергетические системы» Национального университета кораблестроения (НУК) им. адмирала Макарова (г. Николаев, Украина).

Ставинский Ростислав Андреевич окончил в 2000 г. электротехнический факультет НУК. В 2004 г. В Одесском национальном политехническом университете защитил кандидатскую диссертацию «Пространственные трансформаторы с эффективным использованием конструктивного объема». Заведующий кафедрой энергетики Николаевского национального аграрного университета.

Авдеева Елена Андреевна окончила в 2006 г. Институт автоматики и электротехники НУК. Аспирант института автоматики и электротехники НУК.

Optimization Comparative Analysis of Static Electromagnetic Systems Structures. Part. 1. Options and Method of Assessment of Change

A.A. STAVINSKII, STAVINSKII R.A., AVDEYEVA E.A.

In recent decades, a power range of using rectangular rods sections and twisted elements of magnetic cores of induction static devices is expanding. Promising direction of solving the problem of new developments of three-phase transformers is creation of spatial detachable magnetic cores with twisted elements. The features of non-traditional structures and designs of three-phase planar and spatial axial and radial static electromagnetic systems, respectively, with rectangular, sectorial and hexagonal forming contours of rods of butt magnetic cores and winding coils are considered. Planar magnetic core differs from traditional laminated and twisted analogues respectively smaller mass and losses and exception of additional losses from third harmonics of sectional magnetic fluxes. Spatial structures are characterized by high compactness and low labor intensity of production of combined and twisted magnetic cores variants. The method of optimization comparative analysis of electromagnetic systems that are different in position in space, forming circuit configuration and manufacturing elements methods is considered. The method uses a target function with relative indicators of technical level and relative geometric controlled variables. The identity of the relative performance of technical level and optimal geometric relationships of the same structures of the active part of transformers and reactors with a correspondingly identical optimization criteria, materials and production technologies is shown.

Key words: transformer, reactor, magnetic core, planar, spatial, winding, forming contours, analysis, relative controlled variables, relative indicators

REFERENCES

1. **Yermolin N.P.** *Raschet transformatorov maloi moshchnosti* (Calculation of low power transformers). Leningrad. Publ. «Energiya», 1970, 190 p.
2. **Vosyutinskii S.B.** *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* (Questions of the theory and calculation of the transformers). Leningrad. Publ. «Energiya», 1970, 432 p.
3. **Belopol'skii I.I., Karetnikov Ye.I., Pikalova L.G.** *Raschet transformatorov i drosslei maloi moshchnosti* (Calculation of transformers and chokes low power). Moscow. Publ. «Energiya», 1973, 400 p.
4. **Tikhomirov P.M.** *Raschet transformatorov: Uchebnoye posobie* (Calculation of the transformers: Educational supplier). Moscow. Publ. «Energoatomizdat», 2004, 528 p.
5. **Flanagan W.M.** Handbook of transformers design and applications. – Boston: Mc Graw Hill, 1993, 232 p.
6. **Silovye transformatory: Spravochnaya kniga** (Power transformers: Reference book). Edit. By S.D. Lizunov and A.K. Lokhanin. Moscow. Publ. «Energoatomizdat», 2004, 616 p.
7. **Bormosov V.A., Kostousova M.N., Petrenko A.F., Smol'skaya N.Ye.** *Perspektivy i sostoyaniye razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh serii* (Prospects and State of Developments of Mass-Produced Series of Distribution Transformers): <http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article> (13.09.2004).
8. **Morozovskii Yu.** *Novaya tehnologiya Unicore dlya izgotovleniya magnitoprovodov* (Unicore: A New Magnetic Core Manufacturing Technology): www.kit-e.ru/articles/circuit/2006-8-184.php
9. **Belkin G., Drobyshchov A., Ivakin V., Kovalev V., Panibratets A.** *Elektrotsekh (Electric Shop)*, 2008, No 9, pp. 13–16.
10. **Shutova D.I.** *Sverkhprovodniki dlya elektroenergetiki* (Superconductors for Electric Power Engineering), 2011, vol. 8, No 1, pp. 1–4.
11. **Yanson Yu.** *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* (Electrical equipment: maintenance and repair), 2012, No 12, pp. 43–44.
12. **Kravchenko A., Metel'skii V.** *Elektrik: Mezhdunarodnyi elektrotekhnicheskii zhurnal (Electrician: International journal of Electrical Engineering)*, 2013, No 4, pp. 12–15.
13. **Kravchenko A., Metel'skii V.** *Elektrik: Mezhdunarodnyi elektrotekhnicheskii zhurnal (Electrician: International journal of Electrical Engineering)*, 2013, No 5, pp. 14–17.
14. **Stavinskii A.A.** *Elektrotekhnika i Elektromekhanika (Electrical Engineering and Electromechanics)*, 2004, No 1, pp. 57–61.
15. **Stavinskii A.A., Tishchenko I.A., Zelenyi N.I.** *Elektrotekhnicheskkiye i komp'yuternyye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2010, No 1 (77), pp. 64–69.
16. **Stavinskii A.A., Pakhtyr' O.O., Stavinskii R.A.** *Elektrotekhnika i Elektromekhanika (Electrical Engineering and Electromechanics)*, 2003, No 4, pp. 79–82.
17. **Stavinskii A.A.** *Elektrotekhnika i Elektromekhanika (Electrical Engineering and Electromechanics)*, 2008, № 2, pp. 53–58.
18. **Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A.** *Elektrotekhnicheskkiye i komp'yuternyye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2013, 11(87), pp. 74–81.
19. **Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A.** *Elektrotekhnicheskkiye i komp'yuternyye sistemy (Electrotechnical and Computer Systems)*, 2013, No 12(88), pp. 35–43.
20. **Pentegov I.V., Rymar' S.V.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2006, № 3, pp. 35–47.

Authors: Stavinskii Andrei Andreevich (Nikolayev, Ukraine) – Doctor Techn. Sci. He is Head of department «Ship electric power systems» of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding (NUS) (Nikolaev, Ukraine).

Stavinskii Rostislav Andreevich (Nikolayev, Ukraine) – Cand. Techn. Sci. He is Head of the Energy Department of the NUS.

Avdeyeva Elena Andreyevna (Nikolayev, Ukraine) – Ph. D. Student of the NUS.

