

Обобщенный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч.1. Результаты сравнительного анализа вариантов трехфазных электромагнитных систем трансформаторов

СТАВИНСКИЙ А.А., АВДЕЕВА Е.А., ПАЛЬЧИКОВ О.О., СТАВИНСКИЙ Р.А.

Состоящие в производстве электромеханические устройства традиционных конструкций достигли практического предела развития. Снижение отходов производства магнитопроводов, удельной материалоемкости и потерь, а также улучшение охлаждения электрических машин и аппаратов возможно структурно-геометрическим преобразованием элементов активной и конструктивной частей. Приведены примеры указанных преобразований асинхронных двигателей, трехфазных трансформаторов и реакторов. Наличие различных вариантов электромагнитных систем вызывает необходимость методики их сопоставления и обоснованного выбора. Представлен универсальный метод и показаны возможности оптимизации по частным (минимум массы, стоимости, потерь) и интегральному (капитализированная стоимость) критериям, а также метод аналитического сравнительного анализа частных критериев и теплового состояния вариантов электромагнитных систем при условии идентичности электромагнитной мощности. Представлены результаты оптимизационного сопоставления показателей массы, стоимости и потерь базовой планарной и вариантов пространственных аксиальных и радиальных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов с различными вариантами технологии производства магнитопроводов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, трансформатор, реактор, оптимизация, показатель технического уровня, варианты, сопоставление

Электромеханические устройства (ЭМУ) со статическими и подвижными элементами и «традиционными» конфигурациями участков магнитопроводов и обмоточных катушек достигли практического предела развития [1–9]. Возможности усовершенствования ЭМУ на основе достижений материаловедения, методов и средств оптимизационного проектирования ограничены физическими свойствами материалов и конструктивно-структурными особенностями традиционных электромагнитных систем (ЭМС). Энергоресурсосбережение в электромеханике достигается также повышением частоты тока, использованием форсированного и нетрадиционного, например криогенного, охлаждения. При этом генераторы, двигатели и трансформаторы комплектуются дополнительным оборудованием, что экономически оправдано, например, в системах электродвижения судов с композитными сверхпроводящими обмотками главных машин [6]. Кроме использования улучшенных и нетрадиционных материалов, развитие ЭМУ, в частности асинхронных двигателей (АД), однофазных трансформаторов (ОТ) и трехфазных трансформаторов (ТТ), возможно с применением системного подхода к проектированию, эвристическим преобразованиям

и симметрированию структур и образующих контуров (ОК) элементов ЭМС [4–10]. Возрастает значимость задач создания и использования ЭМУ специального назначения и исполнения, в том числе с аксиальным рабочим зазором и внешним ротором [8–17]. К таким задачам относятся разработки маломагнитных и компактных трансформаторов с пространственными ЭМС [10, 11], встроенных торцевых АД [12], машин контрроторного вращения [13–15]. В целом повышение технического уровня ЭМУ на основе новых нетрадиционных конструкторско-технологических решений с учетом требований энергоресурсосбережения представляет особую актуальность.

Пример преобразования активной и конструктивной частей с целью повышения компактности встроенного АД привода вентилятора на основе одноопорной конструкции ротора с конусно-цилиндрическим магнитопроводом показан на рис. 1. В пределах мощности и полюсности, позволяющих использовать технологию заливки пазов, ротор из двух практически симметричных секций (рис. 2,а) и конусно-плоскостной магнитопровод (рис. 2,б) снижают материалоемкость производства. Обеспечивается минимум узлов и деталей, повышение

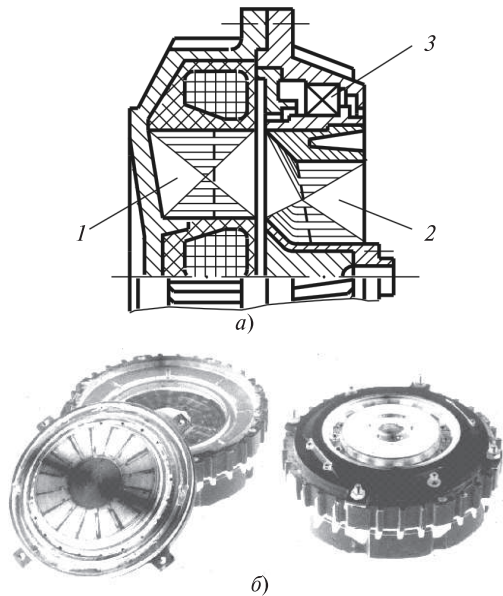


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и образцы (б) торцевого асинхронного двигателя для привода центробежного вентилятора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – подшипник

равномерности рабочего зазора и надежности ОАД. Смещение стержней и «шеvronный» скос пазов в смежных секциях ротора (рис. 2, б и 3, а) снижают магнитные составляющие вибрации и шума [9].

Другим техническим предложением с использованием системного подхода и принципа простран-

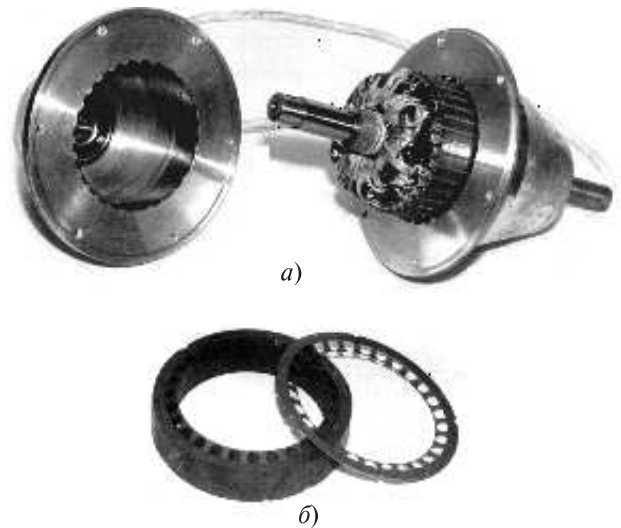


Рис. 2. Обращенный асинхронный двигатель со снятым полу-ротором (а), пакет и пластина конусно-плоскостного магнитопровода (б)

ственной симметрии является система охлаждения [9] с принудительной циркуляцией жидкого или газового хладагента в баке и охлаждающих каналах статической ЭМС (рис. 3).

Трехфазные планарные ЭМС отличаются неравномерностью распределения теплового поля и худшими условиями охлаждения катушек обмоток на средних стержнях магнитопроводов. Интен-

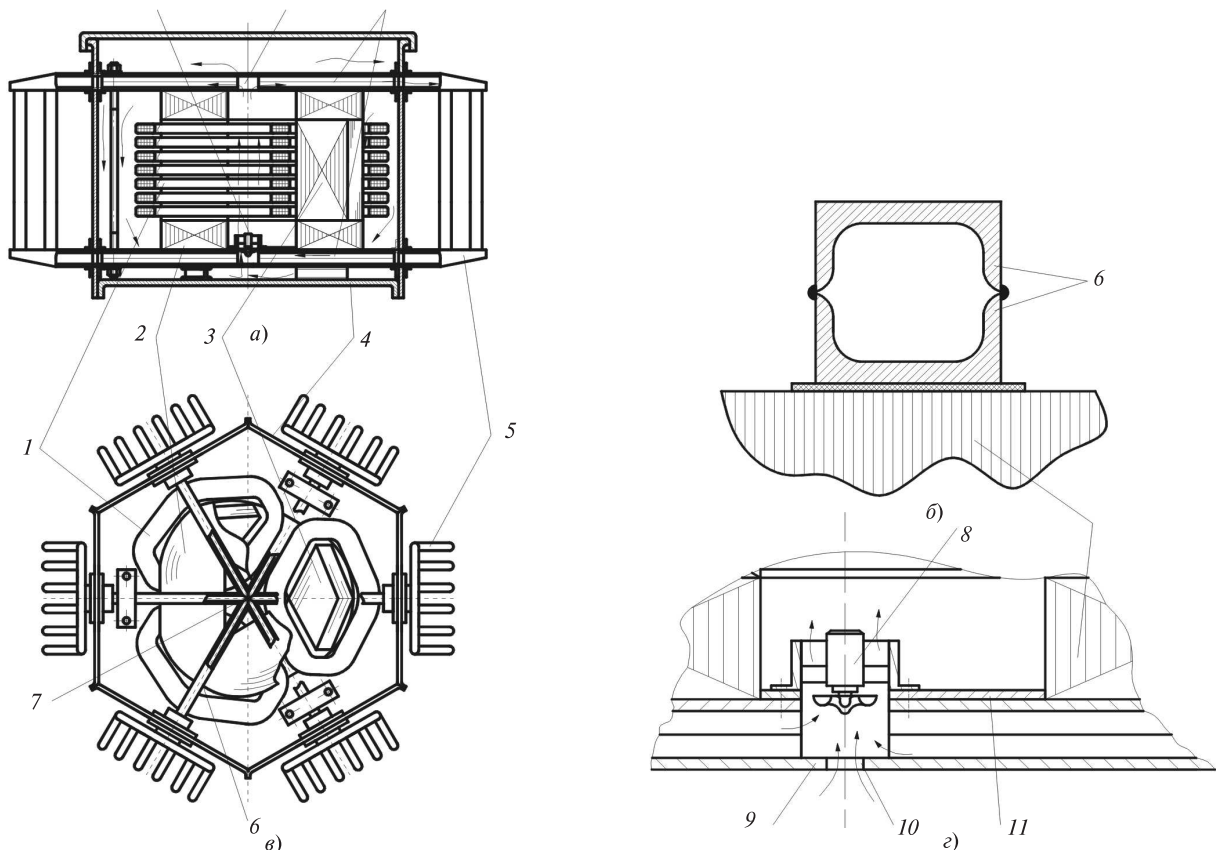


Рис. 3. Конструктивная схема трехфазного реактора с аксиальной пространственной электромагнитной системой и оборудованием принудительного охлаждения: 1 – обмотка; 2 – ярмо; 3 – стержень; 4 – бак; 5 – радиатор; 6 – ярменная балка – хладагентопровод; 7 – верхний коллектор хладагента; 8 – электронасос; 9 – нижний коллектор хладагента; 10 – вход хладагента; 11 – перегородка

фикация охлаждения мощных трансформаторов достигается установкой в маслопровод каждого радиатора погружного электронасоса [18]. Несимметричность структуры ЭМС обуславливает увеличение числа радиаторов с уменьшением единичной мощности и производительности насосов. Снижается энергетическая эффективность электропривода системы охлаждения и индукционного агрегата в целом [9].

В [3] сделан вывод о целесообразности замены планарных ЭМС пространственными с витыми стыковыми магнитопроводами в новых разработках силовых ТТ мощностью до 1000 кВ·А. Пространственные трехфазные и однофазные ЭМС [8–11, 16, 17] позволяют симметризовать в аксиальном и радиальном направлениях структуру активной и конструктивной частей трансформаторов и реакторов. Аксиальные ЭМС (рис. 3) отличаются наличием свободного пространства в зонах оси и внутренних контуров ярм. Подобные структуры с целью энергоресурсосбережения позволяют интегрировать комплектное оборудование принудительной циркуляции хладагента в единый погружной электронасос с трубопроводами и коллекторами из прессующих магнитопровод элементов (рис. 3). Прессующие элементы и коллекторы могут выполняться из швеллеров (рис. 3,а и б), состыкованных на оси ЭМС скошенными концами (рис. 3,в). Электронасос установлен в полость внутреннего контура нижнего ярма и зону коллектора над центральным отверстием входа хладагента (рис. 3,г).

Примерами упомянутых выше известных традиционных технических решений являются планарная и пространственная статические ЭМС (табл. 1, вар. 1 и 2). Возможности создания нетрадиционных конструкций ЭМС ТТ и трехфазных реакторов (ТР) с помощью структурных преобразований активных элементов [8–11, 16, 17] характеризуют варианты 3–8, табл. 1.

Исходя из условия обоснованности определения лучшего технического предложения новой разработки ЭМУ возникает вопрос оценки преимуществ и недостатков возможных вариантов решения задачи на основе их сравнительного анализа.

Качество выполненной разработки ЭМУ определяется ее сравнением с базовым аналогом. Рассчитывается комплексный относительный показатель качества с учетом принятых «весовых» коэффициентов основных и специальных характеристик [19]. Однако задачи сравнительного анализа возникают на стадии выбора из известных конструкторско-технологических решений определенной ЭМС, максимально соответствующей поставленному техническому заданию на проектирование ЭМУ. Поэтому появляется необходимость в методологии

объективного аналитического оптимизационного сравнительного анализа вариантов ЭМС на стадии рассмотрения существующих технических предложений. Также задачи оптимизационного сравнительного анализа возникают при определении влияния на характеристики ЭМУ структурного преобразования активных элементов с целью обеспечения специфических требований. Примеры таких требований – минимальные значения внешнего магнитного поля и контурного сферического или цилиндрического объема (диаметра контурной окружности, описанной вокруг ЭМС) специальных трансформаторов [8, 10, 11].

Оптимизация ЭМ выполняется на основе математических моделей (ММ) с целевыми функциями (ЦФ) частных (минимумы значений массы, стоимости или потерь), а также интегрального (полная капитализированная стоимость) критериев [3, 20, 21]. Используются расчетно-оптимизационные управляемые переменные (УП) в виде элементов геометрии и электромагнитных нагрузок (ЭМН). Однако геометрические параметры определяются конкретными конфигурациями элементов ЭМС, а значения ЭМН зависят от требований технического задания и назначения ЭМУ. Традиционные УП [3, 20, 21], отображающие индивидуальные структурные особенности, не удовлетворяют условию универсальности использования и усложняют объективное сравнение вариантов ЭМС. Например, взаимонеприемлемыми геометрическими УП оптимизации традиционных ЭМС трансформаторов являются соотношения сторон прямоугольных и диаметры круговых образующих секционированных сечений стержней (табл. 1, вар. 1 и 2) [3, 20, 21]. Кроме того, в известных методиках с варьированием ЭМН оптимизационный процесс «привязан» к конкретным данным технического задания на разработку ЭМУ.

Выбор определенной структуры ЭМС из существующих вариантов, т.е. структурная оптимизация, относится к задачам структурного синтеза [22]. Для решения подобных задач необходима оценка качества вариантов структур, которая может быть выполнена на основе параметрического синтеза объекта оптимизации. Однако параметрический синтез возможен только при заданной структуре такого объекта. Поэтому два вида синтеза должны происходить в едином вычислительном процессе. Объединение структурного и параметрического видов синтеза новой разработки технического объекта достигается [22] методом экспертной оценки посредством определения частных критериев оптимизации и назначения коэффициентов их преимуществ (веса) [19]. При этом оптимизированные по одному из критериев и известным мето-

диком соотношения ЭМН и геометрических параметров конкретной ЭМС не являются универсальными, так как соответствуют заданным исполнению, мощности и способу охлаждения ЭМУ. В случае использования критерия с весовыми коэффициентами их значения субъективны, что дополнительно затрудняет обобщенный сравнительный анализ ЭМС.

Методика построения обобщающих оптимизационных ММ должна обеспечивать сопоставление вариантов ЭМС при соблюдении принципов электромагнитной эквивалентности (ЭМЭ) т.е. идентичности электромагнитной мощности [23] и инвариантности (универсальности) вида ЦФ и основных УП. Универсальными можно считать УП, которые приемлемы и идентичны как для сравниваемых вариантов, так и для любых других существующих и возможных нетрадиционных предложений конструкций ЭМС. Однако названный принцип противоречит процессу параметрического синтеза ЭМС, предполагающего оптимизационные варьирования значений плотности тока, индукции и линейной нагрузки, а также проверку проектных ограничений, в частности контроль нагрева обмоток. В свою очередь, варьирование ЭМН при параметрической оптимизации противоречит решению задачи обобщенного структурного синтеза ЭМС. Противоречие обусловлено привязкой диапазона изменения ЭМН к конкретным исполнению, мощности и способу отвода тепла от активной части ЭМУ. Поэтому для устранения указанных противоречий и исключения зависимости оптимизационного процесса от мощности, значений ЭМН и особенностей системы охлаждения основные УП и частные критерии оптимизации должны быть представлены соответственно в относительном и безразмерном виде.

Изложенным условиям ЭМЭ и универсальности сравнительного анализа любых ii -вариантов ЭМС удовлетворяет универсальная ЦФ частных критериев оптимизации вращающихся и статических преобразователей, а также однофазных реакторов (ОВ) и ТР [14–17]:

$$F_{\text{ЭМУ}ii} = (\sqrt[4]{\prod_{ii}})^3 K_{\text{МК}} \prod_{kii}^*, \quad (1)$$

где \prod_{ii} – показатель исходных данных задания на проектирование и ЭМН ЭМУ; $K_{\text{МК}}$ – составляющая удельных характеристик используемых активных материалов; \prod_{kii}^* – одна из безразмерных составляющих (БС), характеризующих $k \geq 3$ ЦФ массы F_{1ii} , стоимости F_{2ii} и потерь активной мощности F_{3ii} , а также других возможных и специальных ЦФ, например диаметра контурной сферы ЭМС

компактного ТТ, или ЦФ момента инерции ротора управляемого АД.

Экстремумы \prod_{kii}^* БС ЦФ (1) являются показателями технического уровня (ПТУ) ЭМУ [14–17]. При их определении используется совокупность геометрических УП, а при определении \prod_{3ii}^* дополнительно используются относительные электромагнитные УП.

Показатели \prod_{ii} ЦФ $F_{\text{от(тТ)}}$ ОТ (ТТ) и $F_{\text{ор(тР)}}$, ОР (ТР) вида (1) – соответственно $\prod_{\text{от}}$, $\prod_{\text{тТ}}$, $\prod_{\text{ор}}$, $\prod_{\text{тР}}$ – определяются из выражений [16, 17, 24]:

$$\prod_{\text{от(тТ)}} = \frac{S_{\text{н}}}{K_{\text{о(т)}} f_1 B_{\text{с}}} \left(\frac{K_{U1} \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 J_1 \eta} + \frac{K_{U2}}{J_2} \right); \quad (2)$$

$$\prod_{\text{ор(тР)}} = \frac{Q_{\text{н}}}{K_{\text{о(т)}} f_1 B_{\text{с}} J_{\text{Р}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$ – номинальные значения мощности трансформатора и реактора; $K_{\text{о(т)}}$ – коэффициент, для однофазных и трехфазных статических ЭМС равный соответственно $K_{\text{о}} = 4,44$ и $K_{\text{т}} = 6,66$; f_1 – частота тока; $B_{\text{с}}$ – среднее значение амплитуды индукции стержня; K_{U1} , K_{U2} , $\cos \varphi_{2(1)}$, $J_{1(2)}$ – коэффициенты номинального изменения напряжения под нагрузкой, энергетический коэффициент нагрузки (трансформатора) и плотность тока первичной (вторичной) обмотки; η – КПД; $J_{\text{Р}}$ – плотность тока обмотки реактора.

Основные относительные геометрические УП оптимизации статических ЭМС на основе ЦФ (1) представляют собой отношения размеров расчетных диаметров $D_{\text{н}ii}$ и $D_{\text{в}ii}$, а также высоты $h_{\text{о}ii}$ и ширины $b_{\text{о}ii}$ обмоточного окна магнитопровода (табл. 1) любого ii -го варианта структур и конфигураций активных элементов [16, 17]:

$$a_{\text{м}} = D_{\text{н}ii} / D_{\text{в}ii}; \quad \lambda_{\text{о}} = h_{\text{о}ii} / b_{\text{о}ii}. \quad (4)$$

Относительной электромагнитной управляемой переменной, дополнительно используемой для определения F_{3ii} и \prod_{3ii}^* статической ЭМС, является соотношение [24]:

$$K_{\text{yii}} = \gamma_{\text{w}} K_{\text{дк}ii} \prod_{\text{yw}} / (\gamma_{\text{с}} K_{\text{дх}ii} P_{\text{ум}}), \quad (5)$$

где γ_{w} – плотность электротехнической меди (алюминия); $K_{\text{дк}ii}$ – коэффициент добавочных потерь короткого замыкания ОТ (ТТ) (обмотки реактора); P_{yw} – удельные потери обмотки; $\gamma_{\text{с}}$ – плотность электротехнической стали (ЭТС); $K_{\text{дх}ii}$ – коэффициент добавочных потерь холостого хода ОТ (ТТ) (магнитопровода реактора); $P_{\text{ум}}$ – удельные потери ЭТС магнитопровода.

Все ЦФ вида (1) статических ЭМС зависят также от коэффициента заполнения обмоточного окна (класса напряжения) K_{30} , а в некоторых конструкциях (вар. 1, 3 и 8, табл. 1) используется третья дополнительная геометрическая УП — центральный угол стержня α_c [16, 17]:

$$\Pi_{1(2)ii}^* = f_{1(2)ii}(a_m, \lambda_o, \alpha_c, K_{30}); \quad (6)$$

$$\Pi_{3ii}^* = f_{3ii}(a_m, \lambda_o, \alpha_c, K_{yii}, K_{30}). \quad (7)$$

В целом метод оптимизации [14–17] позволяет преодолеть упомянутые выше противоречия и объединить оба синтеза ЭМС — обобщенный структурный и параметрический — исходя из вида ЦФ (1). Структура (1) отличается от всех известных ЦФ оптимизации ЭМУ тем, что компоненты Π_{ii} не входят в оптимизационные БС $\Pi_{1(2)ii}^*$. Обоснованием вида ЦФ (1) установлено, что экстремальные значения УП по критериям минимальных значений массы, стоимости и контурного объема и соответствующие им геометрические параметры элементов ЭМС не зависят от значений и соотношений ЭМН. Компоненты Π_{ii} также не входят в БС Π_{3ii}^* , но относительные электромагнитные УП, в частности K_{yii} , являются функциями значений индукции и плотности токов активных элементов ii -вариантов. Поэтому задача сравнительного анализа энергетической эффективности исследуемых вариантов решается сопоставлением двух значений величин ПТУ $(\Pi_{3ii\Delta}^*)'$ и $(\Pi_{3ii\Delta}^*)''$ каждой ЭМС. Экстремумы $(\Pi_{3ii\Delta}^*)'$ и $(\Pi_{3ii\Delta}^*)''$, например ТТ или АД, определяются по минимальным (') и максимальным (") значениям УП в виде коэффициента $K_{yii}^{(')}$ статической ЭМС или его аналогов для электромеханических преобразователей. Граничные значения указанных электромагнитных УП соответствуют известным диапазонам изменений ЭМН в существующих исполнениях и отрезках значений мощности ЭМУ.

При сравнительном анализе ЭМС принимаются допущения. Показатели $\Pi_{1(2)ii}^*$ определяются без учета массы (стоимости) конструктивных элементов. Их влияние может быть приближенно учтено соответствующими коэффициентами. Также приближенно, посредством коэффициентов, может быть учтено наличие изоляции. Исходя из принципа ЭМЭ сравниваемые ЭМУ по назначению, исполнению и способам защиты от окружающей среды и охлаждения являются соответственно идентичными. Считается, что средние значения амплитуд индукций одноименных элементов магнитных

цепей, коэффициенты заполнения магнитопроводов ЭТС и используемые материалы соответственно одинаковы. Также соответственно одинаковы коэффициенты заполнения обмоточных окон статических ЭМС и пазов статора активным материалом обмоток.

Отличия конструкций обмоток и форм обмоточных окон усложняют процесс анализа вариантов статических ЭМС. Поэтому для упрощения решения задачи определения ПТУ реальные обмотки заменяются на эквивалентные по занимаемой площади обмоточного окна, мощности и потерям. В магнитопроводах ЭМС с прямоугольными обмоточными окнами (вар. 1–3 и 7, 8, табл. 1) концентрические обмотки заменяются эквивалентными чередующимися с одинаковыми средними значениями длины витков и одинаковой плотностью тока J_o .

Особую сложность представляет замена реальных обмоток эквивалентной с плотностью тока J_o в ЭМС с нетрадиционной конфигурацией обмоточных окон. В [16] показано, что для ЭМС трансформаторов и реакторов с одинаковыми структурами, конструкциями, электротехническими материалами и ЭМН соответственно идентичны множители $K_{M1(2)}$, K_{M3} и ПТУ $\Pi_{1(2)ii\Delta}^*$ и $\Pi_{3ii\Delta}^*$. Поэтому среднюю длину витка и массу обмоток трансформатора в безразмерном виде можно определять на основе замены системы обмоток высокого и низкого напряжения расчетной эквивалентной обмоткой, которая соответствует структурно-эквивалентному реактору. Кроме уравнений и соотношений (1)–(5), разработка ММ и определение БС (6), (7) ЭМУ методом [14–17] выполняется с использованием базисных уравнений связи параметров магнитопроводов и обмоток с Π_{ii} .

Пример постановки и решения задачи структурного синтеза — развитие [8–9, 11, 16, 17] и оптимизационное сопоставление [24] вариантов ЭМС ТТ (ТР). Варианты (табл. 1) отличаются конструкцией и способами изготовления шихтованных (вар. 1, 4), витых (вар. 2, 3, 5–7) и комбинированного (вар. 8) магнитопроводов. Развитием является дополнение традиционных ЭМС (вар. 1, 2) структурами и конфигурациями ОК стержней, обмоточных катушек и окон (вар. 3–8, табл. 1). Сопоставление заключается в определении уравнений вида (1), расчете и сравнении $\Pi_{kii\Delta}^*$ ЭМС (табл. 1). В связи с отсутствием сравнительного анализа планарных и пространственных ЭМС на условиях ЭМЭ базовым аналогом для сопоставления выбрана традиционная ЭМС с шихтованным магнитопроводом (вар. 1).

Таблица 1

Варианты конструктивных схем и обозначения показателей технического уровня статических электромагнитных систем

№ варианта	Конструктивная схема	Показатель		
		Масса	Стоимость	Потери
1		$\Pi_{1штп}^*$	$\Pi_{2штп}^*$	$\Pi_{3штп}^*$
2		$\Pi_{1ввк}^*$	$\Pi_{2ввк}^*$	$\Pi_{3ввк}^*$
3		$\Pi_{1вш}^*$	$\Pi_{2вш}^*$	$\Pi_{3вш}^*$
4		$\Pi_{1рп}^*$	$\Pi_{2рп}^*$	$\Pi_{3рп}^*$
5		$\Pi_{1рп}^*$	$\Pi_{2рп}^*$	$\Pi_{3рп}^*$

6		$\Pi_{1ршэ}^*$	$\Pi_{2ршэ}^*$	$\Pi_{3ршэ}^*$
7		$\Pi_{1асэ}^*$	$\Pi_{2асэ}^*$	$\Pi_{3асэ}^*$
8		$\Pi_{1ашэ}^*$	$\Pi_{2ашэ}^*$	$\Pi_{3ашэ}^*$

Для статических ЭМС базисные уравнения разработки ММ связывают конструктивно-геометрические параметры активных элементов с показателями исходных данных и ЭМН, например ТТ [16, 17]:

$$S_{стт(тр)} = \Pi_{тт(тр)} / (K_{зо} S_{отт(тр)}); \quad (8)$$

$$m_{втт(тр)} = 1,5\gamma_w K_{зо} l_{втт(тр)} S_{отт(тр)}, \quad (9)$$

где $S_{стт(тр)}$, $S_{отт(тр)}$, $m_{втт(тр)}$, $l_{втт(тр)}$ – соответственно площади ЭТС поперечного сечения стержня и обмоточного окна, масса и средняя длина витка эквивалентной обмотки ТТ(ТР); γ_w – плотность электротехнической меди (алюминия).

Входящие в (8), (9) значения площадей и длины выражаются через $D_{вii}$, две основные (α_M, λ_O) и (в зависимости от ii -варианта ЭМС) одну дополнительную α_c геометрические УП:

$$S'_{cii} = f_c(D_{вii}, \alpha_M, \lambda_O, \alpha_c); \quad (10)$$

$$S_{oii} = f_o(D_{вii}, \alpha_M, \lambda_O, \alpha_c); \quad (11)$$

$$l_{wii} = f_l(D_{вii}, \alpha_M, \lambda_O, \alpha_c). \quad (12)$$

Решением (8) и (10) находится зависимость $D_{вii}$ от показателя (2), в частности ТТ (ТР), а также геометрических УП ii -варианта статической ЭМС:

$$D_{вii} = f(\Pi_{тт(тр)}, \alpha_M, \lambda_O, \alpha_c, K_{зо}). \quad (13)$$

Через УП из (4) и α_c (при необходимости) с использованием параметра (13) определяются значения массы и потерь активных элементов и составляются уравнения масс ЭТС магнитопровода m_{Mii} , обмотки m_{wii} , потерь холостого хода (магнитопровода) $P'_{xii}^{(c)}$ и короткого замыкания (обмотки) $P'_{kii}^{(c)}$ трансформатора (реактора) для ii -варианта ЭМС:

$$m_{Mii} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 \gamma_c \Pi_{1Mii}^*; \quad (14)$$

$$m_{wii} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 \gamma_w \Pi_{1wii}^*;$$

$$P'_{xii}^{(c)} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 (\Pi_{3Mii}^*)^{(c)}; \quad (15)$$

$$P'_{kii}^{(c)} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 (\Pi_{3wii}^*)^{(c)},$$

где $\Pi_{1M(w)ii}^*$ – БС ЦФ массы магнитопровода (обмотки); $(\Pi_{3M(w)ii}^*)^{(c)}$ – БС ЦФ потерь магнитопровода (обмотки).

На основе (14) и (15) определяются ЦФ массы F_{1ii} , стоимости F_{2ii} и суммарных потерь F_{3ii} с соответствующими БС (6), (7), например ТТ для ii -варианта ЭМС:

$$F_{1ii} = m_{Mii} + m_{wii} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 \gamma_c \Pi_{1ii}^*; \quad (16)$$

$$F_{2ii} = c_c m_{Mii} + c_w m_{wii} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 C_c \gamma_c \Pi_{2ii}^*; \quad (17)$$

$$F_{3ii}^{('')} = P_{xii}^{('')} + P_{kii}^{('')} = (4\sqrt{\Pi_{\text{ТТ}}})^3 K_{\text{МЗ}}^{('')} (\Pi_{3ii}^*)^{(')}, \quad (18)$$

где $C_{\text{с}(w)}$ – удельная стоимость ЭТС (обмоточного провода с изоляцией); $K_{\text{МЗ}}^{(')}$, $(\Pi_{3ii}^*)^{(')}$ – составляющая удельных характеристик ЭТС и показатель суммарных потерь, которые соответствуют $K_y^{(')}$ и соответственно минимальным и максимальным значениям входящих в (5) удельных потерь магнитопровода и обмотки.

Последовательность составления и структура уравнений (8)–(18) использованы для определения основных ПТУ ($k=1-3$) ЭМС, представленных в табл. 1: базовой традиционной $\Pi_{\text{кппэ}}^*$ (вар. 1), аксиальных и радиальных ЭМС с двухконтурными фазными элементами $\Pi_{\text{квк(ш)э}}^*$ (вар. 2, 3), $\Pi_{\text{кррэ}}^*$ (вар. 4), $\Pi_{\text{крп(ш)э}}^*$ (вар. 5, 6), а также аксиальных ЭМС с совмещенными фазными элементами $\Pi_{\text{кас(ш)э}}^*$ (вар. 7, 8) [24].

Соотношения $\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{киэ}}^*$ базового планарного и пространственных вариантов (табл. 1) с медными обмотками приведены в табл. 2 и получены в диапазоне $K_{30} = 0,3 \div 0,2$. При этом значения $\Pi_{2\text{ппэ}}^* / \Pi_{2\text{иэ}}^*$ определены также в диапазоне соотношений стоимостей обмоточной меди (с изоляцией) и ЭТС $C_w / C_c = 3,5 \div 5,5$. В связи с отсутствием информации о влиянии текстуры на значения удельных потерь угловых зон магнитопроводов ЭМС (вар. 7, 8) соотношения $\Pi_{3\text{ппэ}}^* / \Pi_{3\text{ас(ш)э}}^*$ рассчитаны только по удельным показателям ЭТС 2412. Соотношения $\Pi_{3\text{ппэ}}^* / \Pi_{3\text{вк(ш)э}}^*$,

$\Pi_{3\text{ппэ}}^* / \Pi_{3\text{рп(ш)э}}^*$ и $\Pi_{3\text{ппэ}}^* / \Pi_{3\text{ррэ}}^*$ рассчитаны в пределах граничных значений (5) в диапазоне ЭМН, соответствующих ТТ «сухого» и «масляного» исполнения мощностью 0,3–1600 кВ·А. Пример определения $\Pi_{1\text{рп(ш)э}}^*$ по уравнениям (1)–(18) приведен в [17].

В [24] установлено (табл. 2), что дополнительно к удобству встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники [8, 10, 11] пространственные ЭМС обеспечивают улучшенные массостоймостные показатели ТТ. При изготовлении витых магнитопроводов из анизотропной ЭТС и использовании пространственных структур ЭМС достигается снижение потерь активной мощности ТТ.

В дополнение к возможностям сопоставления $\Pi_{\text{киэ}}^*$ с использованием метода [14–17] может быть выполнено сравнение теплового состояния обмоток вариантов ЭМС. Используются уравнения средней удельной тепловой нагрузки $P_{\theta ii}$ и превышения температуры $\Delta\theta_{ii}$ соответственно ЭМС силовых и маломощных трансформаторов [18, 25]:

$$P_{\theta ii} = K_{\text{дкii}} P_{wэii} / S_{wэii}; \quad (19)$$

$$\Delta\theta_{ii} = \frac{P_{\text{фкii}} (1 + P_{\text{фхii}} / P_{\text{фкii}})}{\alpha_{\theta} S_{wii} [1 + (S_{\text{ми}} / S_{wii}) \sqrt{P_{\text{фхii}} / P_{\text{фкii}}}]}, \quad (20)$$

где $P_{wэii}$ – основные потери эквивалентной обмотки; $S_{wэii}$ – площадь «эффективной» поверхности охлаждения эквивалентной обмотки; $P_{\text{фкii}}$ и $P_{\text{фхii}}$ – потери короткого замыкания и холостого хода на фазу; α_{θ} – удельный коэффициент теплоотдачи;

Таблица 2

Числовые значения улучшения (+) или ухудшения (–) показателей технического уровня вариантов статических электромагнитных систем относительно базового аналога

Соотношение показателей	Диапазон изменения значений соотношений, %			
	Масса	Стоимость	Потери	
			изотропная сталь 2412	анизотропная сталь 3407
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{кррэ}}^*$	+(1,8÷3,1)	+(6,2÷9,5)	-(4,0÷12,7)	-0,7÷+1,1
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{квкэ}}^*$	+(7,5÷7,6)	+(7,8÷8,1)	-(3,0÷6,3)	+(10,9÷18,7)
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{квшэ}}^*$	+(8,6÷8,7)	+(9,1÷9,5)	-(1,6÷5,4)	+(12,6÷20,0)
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{крпэ}}^*$	+(6,4÷7,7)	+(10,6÷13,7)	-7,0÷+3,6	+(20,6÷22,2)
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{кршэ}}^*$	+(7,5÷9,0)	+(12,3÷15,9)	-5,9÷+5,8	+(22,8÷23,9)
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{касэ}}^*$	+(4,6÷5,0)	+(5,8÷6,5)	+(8,0÷12,6)	–
$\Pi_{\text{кппэ}}^* / \Pi_{\text{кашэ}}^*$	+(5,3÷5,6)	+(6,5÷6,9)	+(7,8÷11,3)	–

$S_{M(w)ii}$ — площадь «открытой» поверхности охлаждения магнитопровода (эквивалентной обмотки).

Потери $P_{wэii}$, $P_{фкii}$, $P_{фхii}$ и площади $S_{wэii}$, S_{wii} , S_{mii} ii -го варианта ЭМС могут быть определены как функции $\Pi_{тт(тр)}$ или $\Pi_{ор(тр)}$ и $\alpha_m, \lambda_o, \alpha_c$. Поэтому при заданном K_{30} и в заданном диапазоне изменения ЭМН ($'()$) можно определить и сопоставить безразмерные показатели нагрева $\Pi_{к\theta ii}^*$ или $\Pi_{к\Delta\theta ii}^*$, являющиеся составляющими уравнений (19), (20) вариантов ЭМС при k -критерии оптимизации:

$$(\Pi_{к\theta ii}^*)^{('())} = f_{к\theta}(K_{30}, \alpha_{мк}, \lambda_{ок}, \alpha_{ск});$$

$$(\Pi_{к\Delta\theta ii}^*)^{('())} = f_{к\Delta\theta}(K_{30}, \alpha_{мк}, \lambda_{ок}, \alpha_{ск}),$$

где $\alpha_{мк}, \lambda_{ок}, \alpha_{ск}$ — значения УП, соответствующие экстремуму k -й ЦФ (1).

Также на основе метода [14–17] возможно выполнение оптимизации ЭМУ по интегральному критерию. Современным интегральным критерием оптимизации трансформаторов является полная капитализированная стоимость [21]:

$$C_{\Sigma ii} = K_{сх} P_{хii} + K_{ск} P_{кii} + C_{тtii}, \quad (21)$$

где $K_{сх}$ и $K_{ск}$ — удельные капитализированные стоимости потерь холостого хода и потерь короткого замыкания; $C_{тtii}$ — стоимость ТТ.

С учетом (15) и (17) уравнение (21) преобразуется:

$$C_{\Sigma ii} = (\sqrt[4]{\Pi_{тт}})^3 (\gamma_c K_{дхii} P_{ум} K_{сх} \Pi_{3mii}^* + \gamma_w K_{дкii} P_{уw} K_{сх} \Pi_{3wii}^* + K_{ст} \gamma_c C_c \Pi_{2ii}^*), \quad (22)$$

где $K_{ст}$ — коэффициент соотношения стоимостей ТТ и его ЭМС.

Учитывая (2) и составляющие $P_{ум}, P_{уw}$, экстремум интегрального критерия (22) может быть определен при варьировании УП $\alpha_m, \lambda_o, \alpha_c, B_c$ и J_o и проверке на их основе заданных проектных ограничений одним из известных численных методов [22].

Выводы. 1. Потенциальным (но пока не востребованным в полной мере) направлением усовершенствования электромеханических устройств (ЭМУ) является структурное преобразование электромагнитных систем (ЭМС) изменением конфигураций, положения в пространстве и числа активных элементов.

2. Разработанный метод создает возможность оптимизации и проверки проектных ограничений ЭМУ на основе математических моделей в виде целостных уравнений вида (1) и (22), а также адек-

ватного аналитического сопоставления вариантов ЭМС на основе безразмерных показателей технического уровня и универсальных относительных управляемых переменных при условии идентичности электромагнитной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кустов С.С. Основные направления развития конструкций трансформаторов I – II габаритов. — Электрические станции, 1995, № 8, с. 62–67.
2. Данилевич Я.Б. Современные проблемы электромашиностроения. — Электротехника, 2003, № 7, с. 32–35.
3. Бормосов В.А., Костоусова М.Н., Петренко А.Ф., Смольская И.Е. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий: www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article (13.09.2004)
4. Казанский В.М., Елшин А.И. Концепция новой технологии электрических машин. — Электротехника, 2004, № 11, с. 2–8.
5. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики. — Электротехника і электромеханіка, 2004, № 1, с. 57–61.
6. Chernoplekov N.A., Chubraeva L.I. Application of superconductivity to ship electrical equipment. — Proc. of the 6-th international conf. «UEES'04 on unconventional electromechanical and electrical systems», Alushta (Ukraine) 24–29 September 2004. — Poland: Szchecin, 2004, vol. 2, pp. 471–476.
7. Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей. — Электротехніка і електромеханіка, 2005, № 1, с. 47–50.
8. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин. — Электротехніка і електромеханіка, 2008, № 2, с. 44–48.
9. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый И.И. Перспективы и особенности дальнейшего усовершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей. — Электротехнические и компьютерные системы, 2010, № 1(77), с. 64–69.
10. Лупиков В.С., Серeda А.Г., Крюкова И.В. и др. Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломагнитном исполнении. — Электротехніка і електромеханіка, 2004, № 2, с. 26–33.
11. Блинцов В.С., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А., Садовой А.С. Трансформаторы для встраивания в оболочки ограниченного диаметра объектов специальной техники и постановка задачи их усовершенствования. — Электротехніка і електромеханіка, 2012, № 2, с. 16–21.
12. Дмитриев В.Н., Кислицян А.Л. Исследование параметров и характеристик встроенных асинхронных двигателей. — Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2012, 280 с.
13. Рубинраут А.М., Бурбаева Н.В. Системы электродвижения судов с гребным тихоходным двигателем двойного вращения. — Электричество, 1999, № 6, с. 7–13.
14. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Усовершенствование тихоходных биротативных асинхронных электроприводов на основе специальных контрроторных двигателей. — Электротехнические и компьютерные системы, 2014, № 15(91), с. 259–261.
15. Ставинский А.А., Пальчиков О.О. Асинхронные двигатели с секционированными внутренними и внешними роторами для привода газовых и жидкостных нагнетателей. — Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: ХПІ, 2015, № 5(1114), с. 85–90.

16. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч.1. Варианты и метод оценки преобразований. — Электричество, 2014, № 9, с. 34—43.

17. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Ч. 2. Примеры структур и результатов преобразований. — Электричество, 2014, № 10, с. 28—34.

18. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. — Л.: Энергия, 1970, 432 с.

19. Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. — М.: ВНИИ стандартэлектро, 1989, 23 с.

20. Бородулин Ю.Б., Мостейкис В.С., Попов Г.В., Шишкин П.П. Автоматизированное проектирование электрических машин: Учебное пос. для вузов/Под ред. Ю.Б. Бородулина. — М.: Высшая школа, 1989, 280 с.

21. Лизунов С.Д. Силовые трансформаторы: Справочная книга/Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. — М.: Энергоатомиздат, 2004, 616 с.

22. Андронов С.А. Методы оптимального проектирования. Текст лекций. — Санкт-Петербург: Государственный университет авиационного приборостроения, 2001, 169 с.

23. Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. — М.: Энергия, 1972, 464 с.

24. Авдеева О.А. Трифазні трансформатори для встановлення в обмежені об'єми об'єктів підводної техніки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Одесса, 2015, 20 с.

25. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. — М.: Советское радио, 1971, 720 с.

[10.10.2016]

Авторы: Ставинский Андрей Андреевич окончил в 1975 г. электромеханический факультет Одесского политехнического института. Докторскую диссертацию защитил в техническом университете «Московский энергетический институт» в 1993 г. Заведующий кафедрой электроэнергетики, электротехники и электромеханики Национального аграрного университета, г. Николаев, Украина.

Авдеева Елена Андреевна окончила в 2006 г. Национальный университет кораблестроения (НУК) имени адмирала Макарова. В 2015 г. защитила кандидатскую диссертацию. Ассистент кафедры судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) НУК.

Пальчиков Олег Олегович окончил в 2013 г. Национальный университет кораблестроения. Магистр, аспирант кафедры СЭЭС НУК.

Ставинский Ростислав Андреевич окончил в 2000 г. Национальный университет кораблестроения. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры СЭЭС НУК.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 4, pp. 39—49.

The Generalized Method for Structural-Parametric Synthesis of the Electromagnet Systems of Electrical Machines and Induction Apparatuses. Part 1. Results from a Comparative Analysis of Different Versions of Three-Phase Transformer Electromagnet Systems

STAVINSKII Andrei A. (National Agrarian University, Nikolayev, Ukraine) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

AVDEYEVA Yelena A. (National university of shipbuilding named Admiral Makarov (NUS), Nikolayev, Ukraine) — Assistant of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

PAL'CHIKOV Oleg O. (NUS, Nikolayev, Ukraine) — Magister, Graduate student of the Department

STAVINSKII Rostislav A. (NUS, Nikolayev, Ukraine) — Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

The commercially produced electromechanical devices of conventional designs have reached their practical limit of maturing. A smaller amount of wastes from the manufacture of magnetic cores, a lower material intensity, a lower level of losses, and more efficient cooling of electrical machines and apparatuses can be achieved through combined structural and geometrical transformation of the components in the active and mechanical parts. Examples of such transformations for induction motors, three-phase transformers and reactors are given. The availability of different versions of electromagnetic systems generates the need to develop a procedure for comparing them and making a well-grounded choice of the optimal version. The article presents a universal approach to and shows the possibilities of optimizing with respect to partial (minimal mass, cost, and losses) and integral (capitalized cost) criteria, as well as a method for performing an analytical comparative analysis of partial criteria and thermal state of different versions of electromagnetic systems having identical electromagnetic power capacities. The results from an optimizing comparison of indicators characterizing the mass, cost and losses between the basic planar version and versions of axial and radial electromagnetic systems of three-phase transformers with different versions of magnetic core manufacturing technology are presented.

Key words: induction motor, transformer, reactor, optimization, technical level indicator, versions, comparison

REFERENCES

1. **Kustov S.S.** *Elektricheskiye stantsii* — in Russ. (*Power Plants*), 1995, No. 8, pp. 62—67.
2. **Danilevich Ya.B.** *Elektrotehnika* — in Russ. (*Power Engineering*), 2003, No. 7, pp. 32—35.
3. **Bormosov V.A., Kostousova M.N., Petrenko A.F., Smol'skaya I.Ye.** *Perspektivy i sostoyaniye razrabotok raspredelitel'nykh transformatorov massovykh serii* (Prospects of development and the state of distribution transformers mass series): www.transform.ru/articles/html /03project/a000001. article (13.09.2004)
4. **Kazanskii V.M., Yelshin A.I.** *Elektrotehnika* — in Russ. (*Power Engineering*), 2004, No. 11, pp. 2—8.
5. **Stavinskii A.A.** *Elektrotehnika i elektromekhanika* — in Ukrainian (*Power Engineering and Electromechanics*), 2004, No. 1, pp. 57—61.
6. **Chernoplekov N.A., Chubraeva L.I.** Application of superconductivity to ship electrical equipment. — Proc. of the 6-th International conf. «UEES'04 on unconventional electromechanical and electrical systems», Alushta (Ukraine) 24—29 September 2004. — Poland: Szczecin, 2004, vol. 2, pp. 471—476.
7. **Konokhov N.N.** *Elektrotehnika i elektromekhanika* — in Ukrainian (*Power Engineering and Electromechanics*), 2005, No. 1, pp. 47—50.
8. **Stavinskii A.A.** *Elektrotehnika i elektromekhanika* — in Ukrainian (*Power Engineering and Electromechanics*), 2008, No. 2, pp. 44—48.
9. **Stavinskii A.A., Tishchenko I.A., Zelenyi I.I.** *Elektrotekhnicheskiye i komp'yuternye sistemy* — in Russ. (*Electrotechnical and computer systems*), 2010, No. 1(77), pp. 64—69.
10. **Lupikov V.S., Sereda A.G., Kryukova I.V. et al.** *Elektrotehnika i elektromekhanika* — in Ukrainian (*Power Engineering and Electromechanics*), 2004, No. 2, pp. 26—33.
11. **Blintsov V.S., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A., Sadovoi A.S.** *Elektrotehnika i elektromekhanika* — in Ukrainian (*Power Engineering and Electromechanics*), 2012, No. 2, c. 16—21.
12. **Dmitriyev V.N., Kislitsin A.L.** *Issledovaniye parametrov i kharakteristic vstroyennykh asinkhronnykh dvigatelei* (Study parameters and characteristics of the built-in induction motors). Ul'yanovsk, Ul'yanovsk State Technical University, 2012, 280 p.
13. **Rubinraut A.M., Burbayeva N.V.** *Elektrichestvo* — in Russ. (*Electricity*), 1999, No. 6, pp. 7—13.
14. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Elektrotekhnicheskiye i komp'yuternye sistemy* — in Russ. (*Electrotechnical and computer systems*), 2014, No. 15(91), pp. 259—261.
15. **Stavinskii A.A., Pal'chikov O.O.** *Visnik national'nogo tekhnichnogo universitetu «Khar'kivskii politekhnichnii institut»* — in Ukrainian (*Bulletin of the National Technical University «Charkov Polytechnical Institute*), 2015, No. 5(1114), pp. 85—90.
16. **Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A.** *Elektrichestvo* — in Russ. (*Electricity*), 2014, No. 9, pp. 34—43.
17. **Stavinskii A.A., Stavinskii R.A., Avdeyeva Ye.A.** *Elektrichestvo* — in Russ. (*Electricity*), 2014, No. 10, pp. 28—34.
18. **Vasyutinskii S.B.** *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* (Theory and calculation of transformers). Leningrad, Publ. «Energiya», 1970, 432 p.
19. **Rukovodyashchii dokument RD 16538-89. Mashiny elektricheskiye maloi moshchnosti. Otsenka urovnya kachestva** (Guidance document RD 16538-89. Low-power electric machines. Estimation of quality level). Moscow, VNII Standartelectro, 1989, 23 p.
20. **Borodulin Yu.B., Mosteikis V.S., Popov G.V., Shishkin P.P.** *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye elektricheskikh mashin: Uchebnoye posobiye dlya vuzov/Pod red. Yu.B. Borodulina* (Automated design of electrical machines. Textbook for High education institutions/Edit. by Yu.B. Borodulin). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1989, 280 p.
21. **Lizunov S.D.** *Silovyye transformatory: Spravochnaya kniga/Pod red. S.D. Lizunova, A.K. Lokhanina* (Power transformers. Textbook/Edit. by S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin). Moscow, Energoatomizdat, 2004, 616 p.
22. **Andronov S.A.** *Metody optimal'nogo proyektirovaniya: Tekst leksii* (Methods of optimal design: the text of the lectures). St. Petersburg, State University of Aviation Instrument, 2001, 169 p.
23. **Palastin L.M.** *Elektricheskiye mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniya* (Electrical machines independent power supply). Moscow, Publ. «Energiya», 1972, 464 p.
24. **Avdeyeva O.A.** *Trifazni transformatori dlya vstanovleniya v obmezheni ob'yemi obiyektiv pidvodnoi tekhniki: Avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk* (Authors abstract of Cand. Sci. (Eng.)). Odessa, 2015, 20 p.
25. **Bal'yan R.Kh.** *Transformatory dlya radioelektroniki* (Transformers for radioelectronics). Moscow, Publ. «Sovetskoye radio», 1971, 720 p.

[10.10.2016]