

УДК 621.3. 042(088.8)

*А.А. СТАВИНСКИЙ*, д-р техн. наук,  
*Р.А. СТАВИНСКИЙ*, канд. техн. наук,  
*О.О. ПЛАХТЫРЬ*, канд. техн. наук,  
*А.Н. ЦИГАНОВ*, магистр

## **НАПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С МНОГОПЛОСКОСТНЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ И МЕТОД ИХ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Показано можливості удосконалення електромагнітних систем статичних індукційних пристроїв на основі твірних контурів витків обмоток і перерізів стрижнів магнітопроводів у вигляді багатогранників і подано метод їх структурної оптимізації.

Показаны возможности усовершенствования электромагнитных систем статических индукционных устройств на основе образующих контуров витков обмоток и сечений стержней магнитопроводов в виде многогранников и представлен метод их структурной оптимизации.

На исходной стадии развития электромеханики были определены две основные схемы электромагнитной системы (ЭМС) индукционных статических устройств (ИСУ): пространственная и планарная [1, 2].

Преимуществом планарных ЭМС является возможность шихтовки магнитопровода "впереплет" из элементарных слоёв (пластин, полос) электро-технической стали (ЭТС), что способствует монолитности конструкции и низкому току холостого хода. Поэтому планарные ЭМС к середине XX века стали близки к доскональной отработке и являлись основными или "традиционными". В связи с этим, выполнялись исследования по созданию нетрадиционных ЭМС. Их результатом стало промышленное освоение производства во второй половине XX века однофазных и трехфазных трансформаторов с пространственными магнитопроводами [1-3].

В целом существует многообразие конструктивно-технологических решений ЭМС ИСУ, в котором число вариантов структур пространственных магнитопроводов превосходит число вариантов планарных магнитопроводов [4]. Каждому из указанных вариантов присущи свои достоинства и особенности. Однако минимальными удельной материалоемкостью и потерями в стали отличаются, согласно [1-3], однофазные ЭМС с пространственными ради-

ально-броневыми шихтованными магнитопроводами и трехфазные ЭМС с пространственными стыковыми комбинированными магнитопроводами (шихтованные стержни, витые ярма). При этом широкому промышленному использованию пространственных ЭМС препятствует технологический консерватизм, а также их известные недостатки [1-3].

Недостатком пространственных стыковых магнитопроводов (не относятся к магнитопроводам ненасыщенных реакторов и дросселей), ограничивающим их применение, являются разъемы между стержнями и ярмами. Для предупреждения замыкания слоёв ЭТС стыкуемые поверхности изолируются прокладками, которые дополнительно увеличивают ток холостого хода и относительно быстро разрушаются под действием магнитострикционных вибраций. Размещение стыковых поверхностей стержней в одной плоскости позволяет выполнять совместную механическую обработку плоскостей разъема. Этот способ снижения стыкового зазора, согласно [1], практикуется некоторыми фирмами. Взамен установки изоляционных прокладок представляется целесообразным введение операции оксидирования стыковых поверхностей. Такая операция может совмещаться с восстановительным отжигом ЭТС магнитопровода. Согласно [5], подобный технологический процесс использовался при производстве магнитопроводов асинхронных двигателей 4А из ЭТС без электроизоляционного покрытия марки 2013.

В соответствии с [6], в XXI веке кроме увеличения производства электроэнергии, важнейшей задачей является её сбережение при передаче, распределении и преобразовании, что требует дальнейшего совершенствования и перевода ИСУ на аморфные стали, повышения мощности единичных агрегатов, применения систем форсированного охлаждения. Широкое развитие получают малоотходные и безотходные технологии производства электромеханических устройств (ЭМУ). Согласно [7], дальнейшее снижение материалоемкости и улучшение показателей классических конструктивных исполнений ЭМУ традиционными способами не представляется возможным. Также при проектировании генерирующих агрегатов с форсированным охлаждением, наиболее целесообразно применение трансформаторов блочного исполнения с пространственными ЭМС. Такие системы обеспечат конструктивное соответствие трансформаторов цилиндрической форме генераторов и радиально-осевому направлению потоков газового или жидкостного охлаждения в элементах активной части (АЧ) [7].

В связи с указанными преимуществами, а также современными требованиями снижения потерь и ресурсосбережения, задачи расширения практического использования и совершенствования пространственных ЭМС представляют особую актуальность.

Основными образующими традиционных конфигураций витков катушек и сечений стержней планарных и пространственных ЭМС [1-3] яв-

ляются прямоугольные и круговые контуры или, согласно классификации [4], параллельные и цилиндрические образующие поверхности (ОП) обмоточных окон и стержней.

Параллельные ОП используются, по технологическим соображениям, в ИСУ малой мощности массового выпуска и части трансформаторов I-II габаритов. Существенными недостатками планарных ЭМС с параллельными ОП являются повышенная средняя длина витка, а также пониженные электрическая прочность изоляции на изгибах в зонах прямых углов и электродинамическая устойчивость обмотки при коротком замыкании [2].

Цилиндрические ОП обеспечивают минимальную длину витка и повышение электрической прочности обмотки, но обуславливают незаполненные катушками части объёмов обмоточных окон, а также ступенчатую форму сечений стержней и ярем магнитопроводов [1, 2]. Несоответствие формы сечения стержня конфигурации витков повышает габариты, материалоемкость и потери ИСУ, а повышение заполнения контурной окружности ЭТС достигается увеличением числа размеров элементарных слоёв и пакетов и значительным повышением трудоёмкости производства магнитопроводов (рис. 1). Кроме того, согласно [8], деформации изгиба, которые возникают при намотке кольцевых витков, приводят к ослаблению жесткости проводников и снижению электродинамической стойкости обмотки.

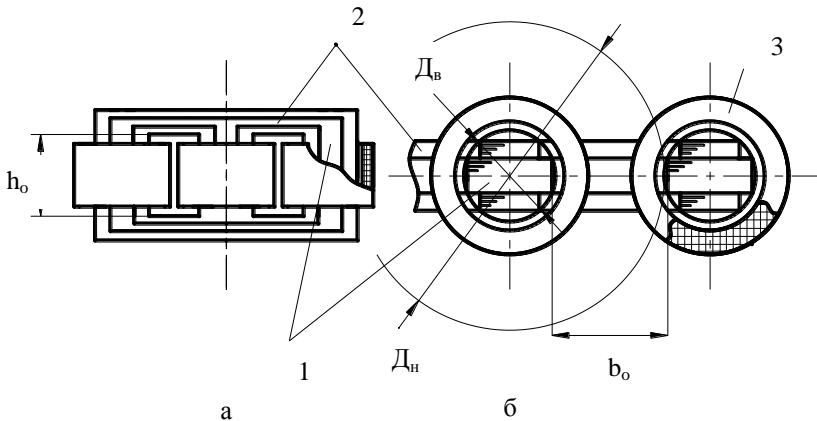


Рис. 1. Схема планарной стержневой электромагнитной системы трехфазного индукционного статического устройства – вид сбоку (а) и часть вида сверху со снятым ярмом (б): 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки.

В связи с тем, что традиционные ЭМС с параллельными и цилиндрическими ОП в начале XX века практически достигли предела развития, дальнейшее совершенствование ИСУ возможно на основе поиска и разработки

нетрадиционных технических решений активной и конструктивной части электромеханических устройств [7]. В [4] представлены возможности усовершенствования ИСУ на основе многоплоскостных ОП, или образующих контуров витков и сечений стержней в виде многогранников (рис. 2). Образующие контуры витков и стержней прямые линии пересекаются под тупыми углами  $\alpha_{\text{п}} \geq 120^\circ$ . В углах  $\alpha_{\text{п}}$  выполняются скругления проводников и между стержнями и катушками, а также витками устанавливаются опорно-изоляционные элементы (прошивные рейки).

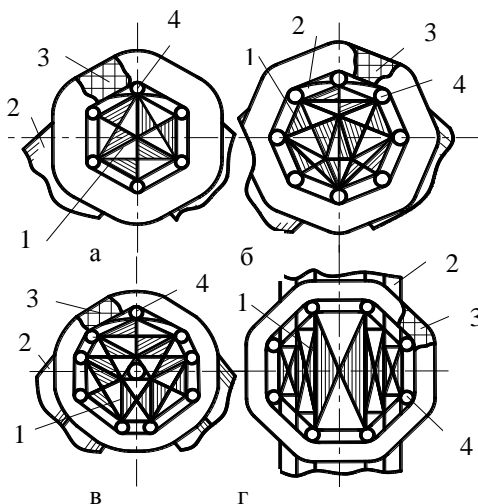


Рис. 2. Фрагменты схем вариантов пространственных стыковых (а-в) и планарной стержневой (г) электромагнитных систем с многоплоскостными образующими поверхностями: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка; 4 – опорный элемент.

В технических решениях ЭМС (рис. 2) зона деформации изоляции при изгибе проводника на  $\alpha_{\text{п}} \geq 120^\circ$  снижается относительно аналогичной зоны изгиба с

$\alpha_{\text{п}} = 90^\circ$  проводников обмоток планарных ЭМС с параллельными ОП. Также устраняются (возникающие по всей длине витков ЭМС с цилиндрическими ОП) деформации изгиба и остаточные механические напряжения волокон проводников на прямых участках витков, которые соответствуют сторонам  $n \geq 6$ -гранника. В конструкциях (рис. 2) возможные повреждения изоляции и зоны деформации проводников концентрируются в местах изгиба витков на осях вершин многогранника. Однако в этих зонах электрическая и механическая прочность катушек обмотки усиливается опорно-изоляционными элементами. Для максимального повышения электрической прочности и электродинамической стойкости обмотки прошивные рейки должны выполняться с формой поперечного сечения, которая соответствует внутреннему  $r_{\text{в}}$  и наружному  $r_{\text{н}}$  радиусам скруглений витков (рис. 3).

Другими преимуществами структур ЭМС (рис. 2) являются обеспечение выполнения стержней стыковых магнитопроводов (рис. 2, а-в) из идентичных слоёв ЭТС или уменьшение числа их типоразмеров в планарных магнитопро-

водах при заданном коэффициенте  $k_k$  заполнения ЭТС контурной окружности (рис. 2, г), а также возможность снижения материалоемкости ЭМС.

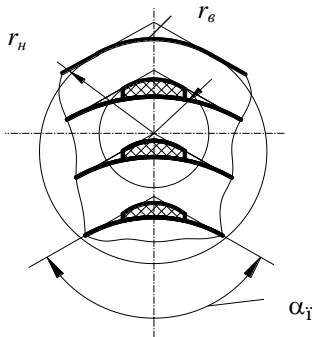


Рис. 3. Особенности конструкции обмотки с многогранными образующими контурами: 1 – виток; 2 – опорный элемент.

Возможности снижения материалоемкости обмотки поясняются рис. 4 и рис. 5.

На рис. 4 изображены образующие контуры стержней ЭМС с параллельными и двух (трех)-плоскостными ОП.

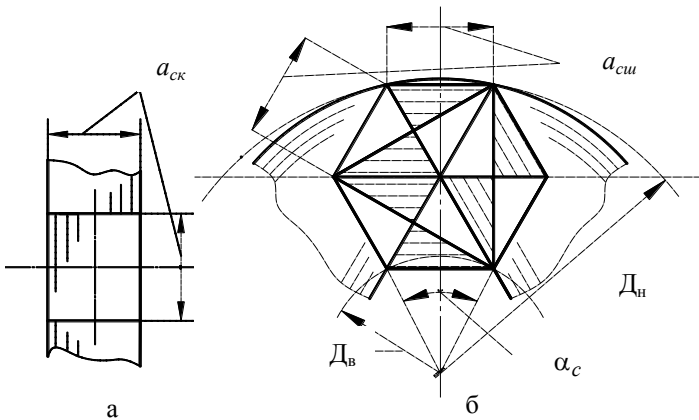


Рис. 4. Конфигурации сечения стержня с прямоугольным (а) и шестигранным (б) образующими контурами

Минимальной длине витка планарной ЭМС с параллельными ОП соответствует квадрат. Размеру стороны  $a_{ск}$  квадрата (рис. 4,а) соответствуют величины площади  $S_{ск}$  и периметра  $\Pi_{ск}$  сечения стержня:

$$S_{ск} = a_{ск}^2; \quad \Pi_{ск} = 4a_{ск} = 4\sqrt{S_{ск}}. \quad (1)$$

Размеру стороны  $a_{сш}$  равностороннего шестигранника (рис. 4,б) соответствуют величины площади  $S_{сш}$  и периметра  $\Pi_{сш}$  сечения стержня:

$$S_{сш} = 3a_{сш}^2 \sin(\pi/3) = 2,6a_{сш}^2 ; \quad (2)$$

$$\Pi_{сш} = 6a_{сш} = 3,721\sqrt{S_{сш}} . \quad (3)$$

При условии равенства площадей квадрата и шестигранника ( $S_{ск}=S_{сш}$ ) из (1) и (3) следует соотношение

$$\Pi_{ск} / \Pi_{сш} = 4\sqrt{S_{ск}} / (3,721\sqrt{S_{сш}}) = 1,075. \quad (4)$$

На рис. 5 представлены фрагменты контуров стержней ЭМС с цилиндрическими и многоплоскостными ОП у которых одинаковы радиусы  $R_k$  контурных окружностей.

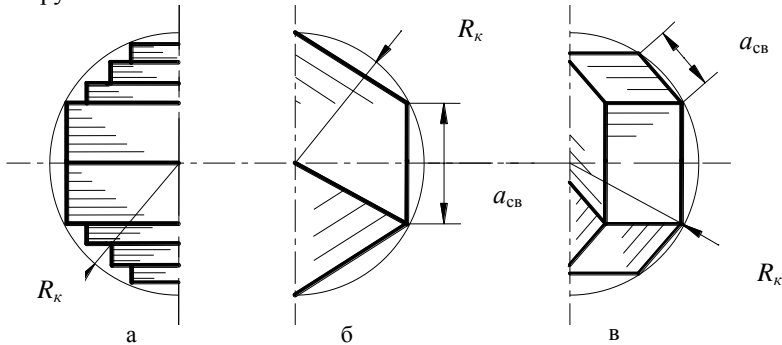


Рис. 5. Варианты конфигурации сечения стержня с круговым (а), шестигранным (б) и восьмигранным (в) образующими контурами

Определяющие среднюю длину витков величины периметров  $\Pi_{со}$ ,  $\Pi_{сш}$  и  $\Pi_{св}$  соответственно контурной окружности (рис. 5,а) шестигранника (рис. 5,б) и восьмигранника (рис 5,в):

$$\Pi_{со} = 2\pi R_k = 6,283R_k ; \quad \Pi_{сш} = 6R_k ; \quad (5)$$

$$\Pi_{св} = 8a_{св} = 16R_k \sin(\pi/8) = 6,123R_k .$$

Площади стержня с контурной окружностью (рис. 5,а) и стержня с восьмигранной образующей (рис. 5,в):

$$S_{со} = k_k \pi R_k^2 ; \quad S_{св} = 8a_{св} R_k \cos(\pi/8) \approx 2,83R_k^2 . \quad (6)$$

Исходя из выражений (2) и (6), соотношения величин площадей соответственно шестигранника и восьмигранника с величиной площади  $S_0$  контурной окружности составляют:

$$S_{сш} / S_0 = 2,6a_{сш}^2 / (\pi R_k^2) = 0,83 ; \quad (7)$$

$$S_{CB}/S_0 = 2,829R_k^2 / (\pi R_k^2) = 0,9. \quad (8)$$

Из (3), (5) и (7), (8) следует, что при  $k_k = 0,83$  и  $k_k = 0,9$ , которым соответствуют, согласно [2], три (рис. 5,а) и пять-шесть ступеней в одной половине образующего круга, соотношения величин периметров стержней (рис. 5,б и в) и длины окружности (рис. 4,а) составляют:

$$P_{CO}/P_{CШ} = 2\pi R_k / (6a_{CШ}) = 1,0472; \quad (9)$$

$$P_{CO}/P_{CB} = 2\pi R_k / (6,123R_k) = 1,0262; \quad (10)$$

Соотношения (4), (9) и (10) характеризуют предпосылки экономии проводникового материала и снижения потерь короткого замыкания (ПКЗ) ИСУ в соответствии с уменьшением величин периметров образующих контуров (рис. 4,б и рис. 5,б,в) относительно традиционных контуров (рис 4,а и рис. 5,а) приблизительно на 7,5 % и 4,7...2,6 %. При этом наличие плоских участков ОП обеспечивает снижение массы ярма магнитопровода и потерь холостого хода (ПХХ).

Однако количественный анализ возможностей снижения материалоемкости и потерь, а также определение наиболее совершенных ЭМС из ряда возможных вариантов, часть из которых представлена на рис. 1, могут быть выполнены на основе решения задачи структурной оптимизации ИСУ.

Для возможности анализа влияния специфики конфигурации и положения в пространстве элементов АЧ на показатели технического уровня (ПТУ) ИСУ необходимо определение метода построения математических моделей (ММ) структурной оптимизации ЭМС. Такому методу должны соответствовать целевые функции (ЦФ) и управляемые переменные (УП), удовлетворяющие условиям универсальности и общей адекватности результатов количественной оценки ПТУ [9] для каждого из рассматриваемых вариантов структур вне зависимости от диапазонов мощностей, используемых способов и систем охлаждения, вариантов технологий и других факторов.

В целом метод оптимизации определяется выбором УП и структурой ЦФ. Существуют различные подходы к решению задач оптимизации, основанные на двух основных методах [10]. Первому соответствуют УП в виде электромагнитных нагрузок (ЭМН), элементов геометрии обмоток и геометрических соотношений проводников. Во втором методе УП являются числа витков и геометрические соотношения обмоток. По существу оба метода взаимосвязаны и равнозначны [10], так как изменение значений и соотношений ЭМН приводит к изменению чисел витков, а также ПКЗ и ПХХ. В обоих методах в качестве УП также используется диаметр круговой образующей сечения стержня или отношение размеров сторон прямоугольного сечения стержня, что дополнительно усложняет унификацию ЦФ и ММ систем различных структур и конфигураций.

Рациональные диапазоны изменения ЭМН (среднего значения амплитуды индукции  $B_c$  в стержне и плотностей тока  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  первичной и вторичной обмотки) достаточно известны из практики проектирования и производства ИСУ. Однако данные диапазоны изменений ЭМН зависят от номинальной мощности  $S_n$ , частоты сети  $f$ , исполнения и способа охлаждения, а также от коэффициента загрузки и условий эксплуатации ИСУ. Также следует добавить, что структурная оптимизация основывается на сравнительном анализе ЭМУ одинакового назначения отличающихся различными конструктивными признаками. Такой анализ принято выполнять при соблюдении принципа электромагнитной эквивалентности [11, 12], которому соответствуют идентичности мощности, ЭМН, коэффициентов заполнения, применяемых материалов и исполнений ЭМС, а также идентичности способов охлаждения и других особенностей конструктивной части сравниваемых ЭМУ.

Поскольку общепринятые УП [10] привязаны к конкретным мощностям, исполнениям, особенностям охлаждения и другим факторам, они не удовлетворяют условию универсальности ЦФ структурной оптимизации.

Из вышеприведенных положений следует, что в ЦФ структурной оптимизации в качестве УП должны быть использованы независимые геометрические параметры, а ЭМН должны отображаться относительными коэффициентами.

Отмеченным требованиям удовлетворяют ЦФ в виде произведения  $F_{цф}$  двух составляющих функциональных показателей  $F_{ид}$  и  $k_{цфi}$  которые предложены в [13, 14]

$$F_{цф} = F_{ид}(S_n, U_1, U_2, B_c, f, \Delta_1, \Delta_2, k_{30})k_{цфi}(\lambda_o, a_m, \alpha_c), \quad (11)$$

где  $U_{1(2)}$  – напряжение первичной (вторичной) обмотки;  $k_{30}$  – коэффициент заполнения обмоточного окна проводящим материалам;  $\lambda_o, a_m, \alpha_c$  – оптимизационные УП.

Показатели исходных данных и электромагнитных нагрузок для трехфазного ( $F_{идт}$  [13]) и однофазного ( $F_{идо}$  [14]) двухобмоточных трансформаторов определяются выражениями:

$$F_{идт} = S_n / (6,66 f B_c (k_{U1} / (\Delta_1 \eta \cos \varphi_1) + k_{U2} / \Delta_2));$$

$$F_{идо} = S_n / (4,44 f B_c (k_{U1} / (\Delta_1 \eta \cos \varphi_1) + k_{U2} / \Delta_2)),$$

где  $\eta$  и  $\cos \varphi_1$  – предварительные расчетные энергетические коэффициенты трансформатора,  $k_{U1(2)}$  – коэффициенты, учитывающие изменение  $\Delta U$  трансформатора под нагрузкой,

$$k_{U1} = 1 - \Delta U \% / 200; \quad k_{U2} = 1 + \Delta U \% / 200;$$

Относительный показатель  $k_{цфi}$  ( $\lambda_o, a_m, \alpha_c$ ) предложен в [14] и представляет один из ПТУ [9] в виде зависимости массы АЧ, стоимости АЧ или основных потерь (суммы ПКЗ и ПХХ) от геометрических УП.



Основные геометрические УП структурной оптимизации  $\lambda_o$  и  $a_m$  удовлетворяют любой из структур планарных и пространственных ЭМС, то есть являются универсальными. Указанные УП определяются соотношениями:

$$\lambda_o = h_o/b_o; a_m = D_n/D_v; a_m = D_n/D_v,$$

где  $h_o$  и  $b_o$  – высота и ширина обмоточного окна (рис. 1);  $D_n$  и  $D_v$  – наружной и внутренней диаметры расчетных контурных окружностей магнитопровода (рис. 1, б, рис. 4, б).

Дополнительной геометрической УП (отсутствует в ММ представленных на рис. 1 и рис. 2 ЭМС) является центральный угол стержня  $\alpha_c$  (рис. 4, б) или соотношение сторон симметричного неравностороннего шестигранника стержня.

Показатель  $F_{ид}$  ЦФ (11) в структурной оптимизации не используется и принимается, в соответствии с принципом электромагнитной эквивалентности, идентичным для сравниваемых ЭМС. Этот показатель может быть использован в поэтапной параметрической оптимизации ИСУ при заданных проектных ограничениях. Структурную оптимизацию ЭМС можно выполнить посредством определения экстремумов (минимумов) функций  $k_{циф}$ , то есть ПТУ, совокупность которых представляет объективную информацию о преимуществах и недостатках рассматриваемых и сравниваемых ЭМС. Определение функциональных зависимостей массы и стоимости, а также основных потерь АЧ от  $\lambda_o$ ,  $a_m$  и  $\alpha_c$ , для некоторых вариантов ЭМС трансформаторов малой мощности выполнено в [15-16].

### **Выводы.**

В работе выполнен анализ возможностей усовершенствования ИСУ на основе вариантов ЭМС с многоплоскостными ОП и представлен метод решения задачи структурной оптимизации ЭМС. На основе полученных результатов можно заключить следующее.

1. Использование ЭМС с многоплоскостными ОП обеспечивает потенциальную возможность повышения электродинамической стойкости трансформаторов исключением механических напряжений изгиба на значительной части витковых контуров и установки опорно-изоляционных креплений в угловых зонах катушек обмоток.

2. Использование структур ЭМС с многоплоскостными ОП снижает среднюю длину витков обмотки и ПКЗ относительно аналогов малой мощности с параллельными ОП и аналогов I-II габаритов с цилиндрическими ОП и  $k_k < 0,9$ .

3. Многоплоскостные ОП повышают заполнение объёмов обмоточных окон и обеспечивают возможность снижения массы магнитопровода и ПХХ.

4. Целесообразны постановка и решение комплекса задач структурной оптимизации и отработки технологических вопросов производства катушек обмоток и магнитопроводов с многоплоскостными ОП.

**Список литературы:** 1. Магнітопроводи силових трансформаторов (технология и оборудование) / *А.И. Майорец, Г.И. Пиеничный, Я.З. Чечелюк* и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с. 2. *Тихомиров П.М.* Расчёт трансформаторов: учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с. 3. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2-х ч. Ч.1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для вузов. – Л.: Энергия. 1972. – 544 с. 4. *Ставинский А.А., Ставинский Р.А.* Классификации структур и элементов электромагнитных систем электро-механических и индукционных статических преобразователей // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 2. – С. 53-58. 5. Асинхронные двигатели общего назначения / *Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М.* и др.; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с. 6. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / *А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина* и др. // *Электропанорама*. – 2001. – № 1. – С. 14-15. 7. *Ставинский А.А.* Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2004. – № 1. – С. 57-61. 8. *Лазарев В.І.* Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (основи теорії, методи розрахунку, засоби забезпечення) Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.09.01 / Ін-т електродинаміки НАН України. – К.: 2006. – 37 с. 9. *Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.* Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2003. – № 4. – С. 79-82. 10. *Бородулин Ю.Б., Гусев В.А., Попов Г.В.* Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с. 11. *Паластин Л.М.* Электрические машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1972. – 464 с. 12. *Казанский В.М., Зонов В.Н., Британчук В.М.* К вопросу о сравнении асинхронных электродвигателей торцевого и цилиндрического исполнения малой мощности // *Материалы межвузовской научно-технической конференции "Асинхронные микромашины"* – Каунас: КПИ. – 1969. – С. 216-219. 13. *Ставинський А.А., Ставинський Р.А.* Визначення головних розмірів та геометричних співвідношень трифазного трансформатора малої потужності з просторовим магнітопроводом // *Збірник наукових праць УДМТУ*. – Миколаїв: УДМТУ. – 2000. – №4 – С. 118-123. 14. *Ставинский А.А., Коновалов А.П., Ставинский Р.А.* Анализ массо-стоимостных показателей однофазного тороидального трансформатора // *Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук. техн. зб.* – 2001. – Вип. 57. – С. 85-89. 15. *Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Плахтир О.О.* Геометричні співвідношення та масо-вартісні показники трифазних просторових трансформаторів малої потужності // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 181-183. 16. *Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.* Зависимости потерь трехфазных пространственных трансформаторов с параллельными стенками обмоточных окон от геометрических соотношений активной части // *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля*. – 2003. – №4. – С. 95-100.

*Поступила в редколлегию 28.08.08*