УДК 621.316

ПЕРЕТВОРЕННЯ КОНТУРІВ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ ДРОСЕЛІВ ТА РЕАКТОРІВ

Ставинський Р.А., к.т.н.
Миколаївський державний аграрний університет,
Тел.: (066)128-55-18.

Анотація **- показано можливості удосконалення електромагнітних систем індукційних апаратів на основі шестигранних утворювальних контурів перерізів стрижнів магнітопроводів і витків котушок обмоток і подано метод їх структурної оптимізації.**

Ключові слова **- магнітопровід, обмотка, шестигранні контури, удосконалення.**

Постановка проблеми. Значну роль в рішенні задач обмеження нелінійних спотворень і імпульсів струму, стабілізації напруги, а також регулювання потоків реактивної потужності відводиться дроселям і реакторам. Вказані індукційні апарати (ІА) наряду з обертовими і статичними індукційними перетворювачами є масовою продукцією електротехнічної промисловості. У відповідності з сучасними вимогами енергоресурсозбереження задачі подальшого зниження питомої і технологічної матеріалоємності, а також трудоємності виробництва електромеханічних пристроїв, зокрема ІА, є досить важливими і актуальними.

Аналіз попередніх досліджень. Варіанти електромагнітних систем (ЕМС) і виконань ІА з замкненим магнітопроводом повністю відповідають трансформаторам [1, 2]. Розроблені наприкінці XIX сторіччя принципові конструктивно-структурні рішення вказаних статичних ЕМС, які стали "традиційними" ("класичними"), залишаються незмінними на протязі більш ніж 100 років, у XX сторіччі розвивались на основі досягнень електроматеріалознавства і оптимізаційного проектування та практично досягли межі розвитку [3]. Деяке зниження втрат індукційних електромеханічних пристроїв очікується після розв’язання проблемних питань виробництва і вартості відносно нової аморфної електротехнічної сталі (ЕТС) [2].

© Р.А. Ставинський, к.т.н.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є аналіз можливості і передумов удосконалення ІА на основі структурних перетворень елементів ЕМС.

Основна частина. Особливістю, яка відрізняє більшість ІА від трансформаторів та обумовлена необхідністю відносної стабільності індуктивності при зміненні струму у широких межах, є наявність у магнітному колі конструктивних стикових зазорів [1, 2]. Немагнітні конструктивні зазори величиною $\delta_к$ виконуються між стрижнями і ярмами (рис. 1, а), а також у стрижнях і заповнюються ізоляційними прокладками, зокрема у реакторах встановлюються фарфорові шайби [2]. Виходячи із визначеної особливості, в ЕМС ІА використовуються стикові конструкції витих (стрічково-рулонних) і пластинчато-шихтованих магнітопроводів [2, 3]. Також, в однофазних і трифазних ІА використовуються планарні і просторові ЕМС [2] з варіантами структур, які характеризуються класифікаційними признаками утворюючих поверхонь (УП) стрижнів і обмоткових вікон [4]. "Традиційні" утворюючі контури (УК) елементів ЕМС (рис. 1) складаються плоскими паралельними і циліндричними УП.

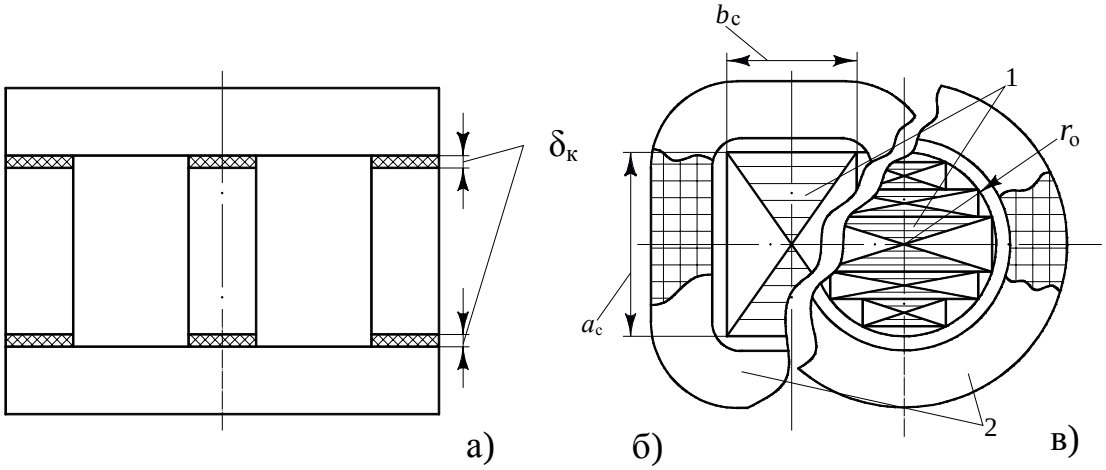

Рис. 1. Структура елементарного шару (а) і традиційні конфігурації перерізів стрижнів 1, а також котушок 2 електромагнітних систем с прямокутними (б) і круговими (в) утворюючими контурами.

Найбільш поширеними при виробництві ІА і трансформаторів в Україні є варіанти планарної ЕМС з традиційними УП. Згідно до [5 – 7] за кордоном і в СРСР (Вірменія, Білорусія) у другій половині минулого століття освоєно виробництво однофазних і трифазних просторових ЕМС (рис. 2). Однак за структурою елементів магнітопроводів і обмоток ЕМС [5, 6] конструктивні схеми (рис. 2) відповідають планарним ЕМС (рис. 1). На основі ЕМС (рис. 2, а) зі стиковим магнітопро-

водом створені кращі (на той час) за питомими показниками матеріалоємності і втрат однофазні трансформатори потужністю 100 МВ·А і 133 МВ·А [5]. Використання комбінованих стрічково(рулонно)-листових і витих магнітопроводів дозволяє знизити матеріалоємність і втрати в сталі трифазних трансформаторів на основі просторових ЕМС (рис. 2, б і в) [6]. Виходячи із вказаної можливості підвищення технічного рівня трансформаторів, уявляється доцільним розширення використання при виробництві ІА просторових ЕМС зі стиковими шихтованими, комбінованими і витими розрізними магнітопроводами.

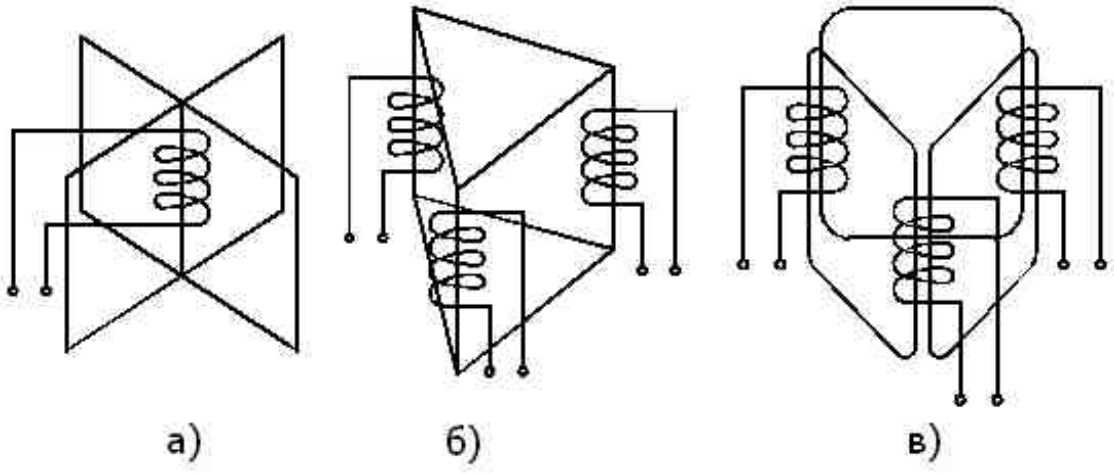

Рис. 2. Конструктивно-структурні схеми симетричних просторових однофазної (а) і трифазної (б і в) статичних електромагнітних систем.

Традиційні структури ЕМС (рис. 1) характеризуються відомими конструктивно-технологічними особливостями. Плоскі паралельні і взаємно-перпендикулярні УП планарних ЕМС забезпечують низьку трудоємність виробництва шихтованих і витих магнітопроводів на основі ідентичності ширини b_c шарів ЕТС, утворюючи прямокутну форму, що визначається розмірами a_c і b_c і підвищену середню довжину витка котушок (рис. 1, б). Знижується надійність виткової ізоляції обмоток у відігнутих на 90° провідниках кутових зон котушок [6]. Циліндричні УП зменшують середню довжину витка до мінімальної кругової, але значно ускладнюють і здорожують технологію виробництва магнітопроводів необхідністю секціонування перерізів стрижнів зі зміненням ширини секцій для вписування їх у кругові УК радіуса r_0 (рис. 1, в). Відносно висока дислокація секцій (пакетів) ЕТС в окружності з коефіцієнтом заповнення кругового УК $К_{ко}$ = 0,927…0,93 досягається встановленням 22 – 36 секцій ЕТС різної ширини [6]. При цьому теоретично і експериментально встановлено, що кільцевий ви-

гин провідників при намотуванні кругових витків котушок призводе до зниження електродинамічної стійкості (ЕДС) обмоток [8].

На основі викладеного, традиційні конструкції і структури елементів планарних і просторових ЕМС ІА і трансформаторів не позбавлені серйозних недоліків. Необхідні пошук і розробка нових способів і конструкторсько-технологічних рішень удосконалення індукційних статичних пристроїв [3].

Підвищення технічного рівня одно- і багатофазних ІА можливо способом структурного перетворення ЕМС на основі заміни відомих традиційних УК (рис. 1, б і в) на "нетрадиційні", наприклад шестигранні УК [4, 7].

Технічні рішення (рис. 3 – рис. 5) ЕМС з шестигранними УК дозволяють зменшити середню довжину витка і підвищити надійність (відносно конструкції рис. 1, б), а також знизити трудоємність виробництва магнітопровода і підвищити компактність і ЕДС (відносно конструкції рис. 1, в) однофазних і трифазних індукційних статичних пристроїв. Надійність обмоток з $n \geq 6$-гранними УК підвищується збільшенням кута вигину провідників $\alpha_{ип}$ с 90° до $\alpha_{ип} \geq 120°$, що знижує деформацію ізоляції кутових зон витків.

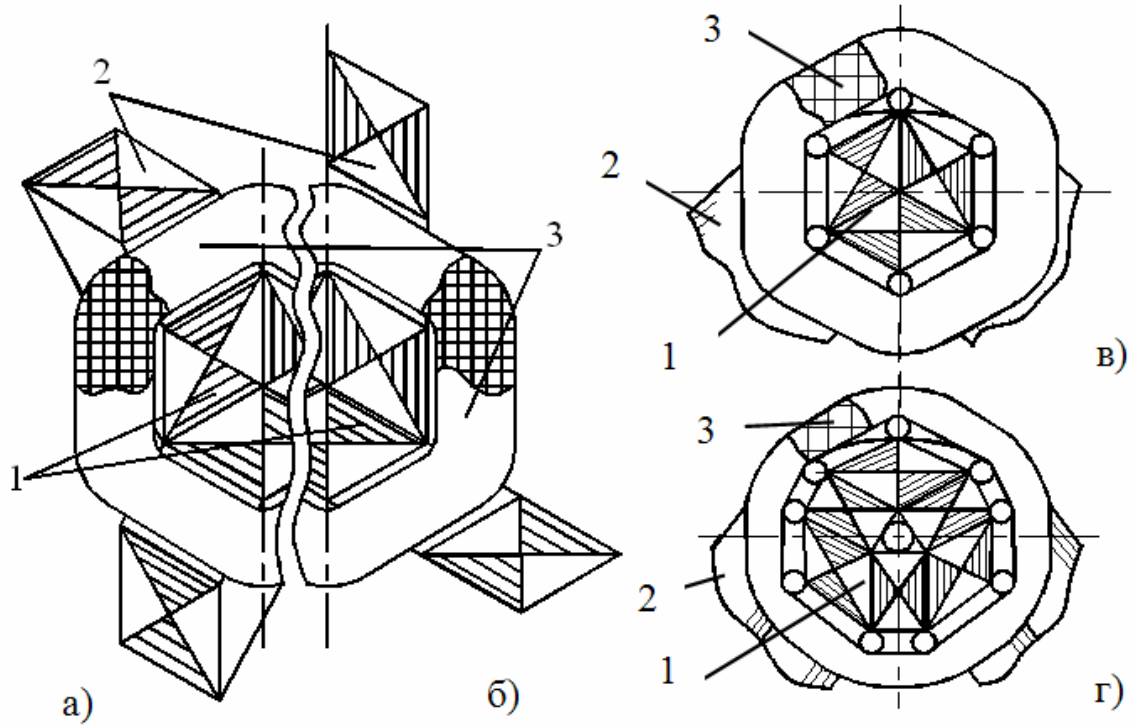

Рис. 3. Конфігурація елементів варіантів однофазних (а, б) і трифазних (б – г) електромагнітних систем (в поперечному перерізі) з багатогранними утворюючими контурами котушок обмоток і перерізів стрижнів: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Компактність підвищується забезпеченням максимально високого заповнення шестигранного утворюючого контуру ідентичними прямокутними пластинами (навитими шарами постійної ширини, рис. 3, а) ЕТС. ЕДС підвищується за умовою підсилення ізоляції і встановлення механічних кріплень витків і обмоток в цілому в кутових зонах котушок [7], усуненням остаткових деформацій у контурах витків кругових вигинів провідників [8]. Для максимального підвищення електричної міцності і ЕДС обмотки та вертикальні опорно-ізоляційні прокладки повинні виконуватись з формою поперечного перерізу, яка відповідає внутрішньому $r_{в}$ і зовнішньому $r_{н}$ радіусам скруглень витків (рис.5).

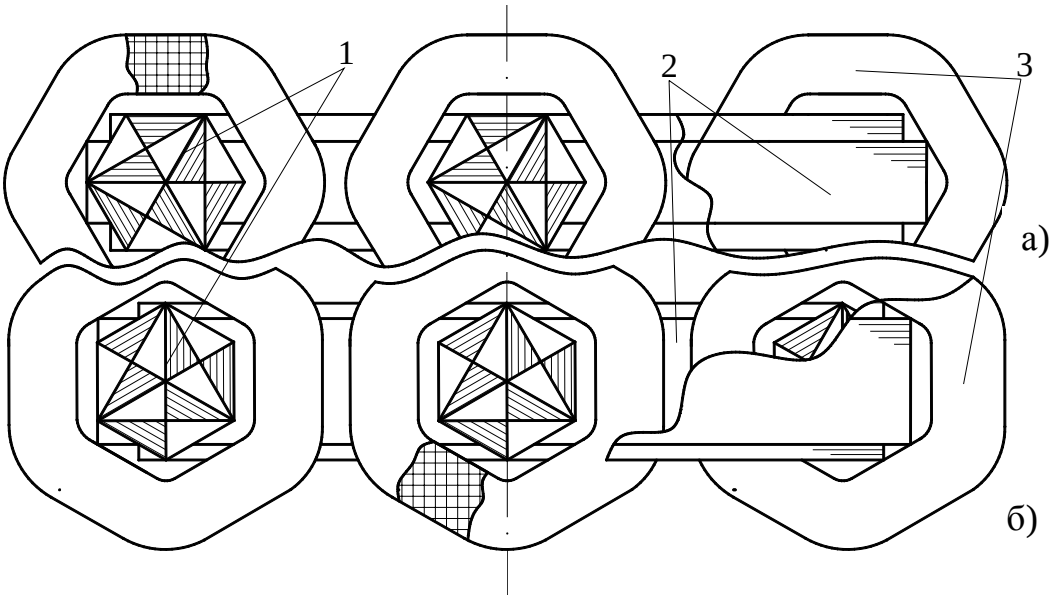

Рис. 4. Варіанти конструктивної схеми
трифазної планарної стикової електромагнітної системи
з двохплощинними (а) і триплощинними (б) утворюючими
поверхнями і шестигранними контурами стрижнів і котушок:
1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки.

Для підтвердження можливості удосконалення ЕМС на основі технічних рішень (рис. 3, рис. 4) у даній роботі уявляється доцільним визначення коефіцієнту заповнення шарами ЕТС шестигранного УТ $k_{кш}$ стрижнів.

Коефіцієнт $k_{кш}$ визначається на основі схеми поперечного перерізу фазного елемента просторової ЕМС (рис. 5). У вказаній ЕМС число елементарних шарів $n_{эс}$ ЕТС в перерізі стрижня обмежено шістьма гранями $b_{г}$

$$n_{эс} = 3ad/(k_{зс}\delta_{этс}) = 1{,}5\sqrt{3}b_г/(k_{зс}\delta_{этс}), \quad (1)$$

де ad, $k_{зс}$ і $\delta_{этс}$ – відповідно висота утворюючого ромба $aboc$ перерізу стрижня, коефіцієнт заповнення сталлю [5] и товщина елементарного шару ЕТС магнітопровода

$$ad = ao\sin(\pi/3) = \sqrt{3}b_г/2. \quad (2)$$

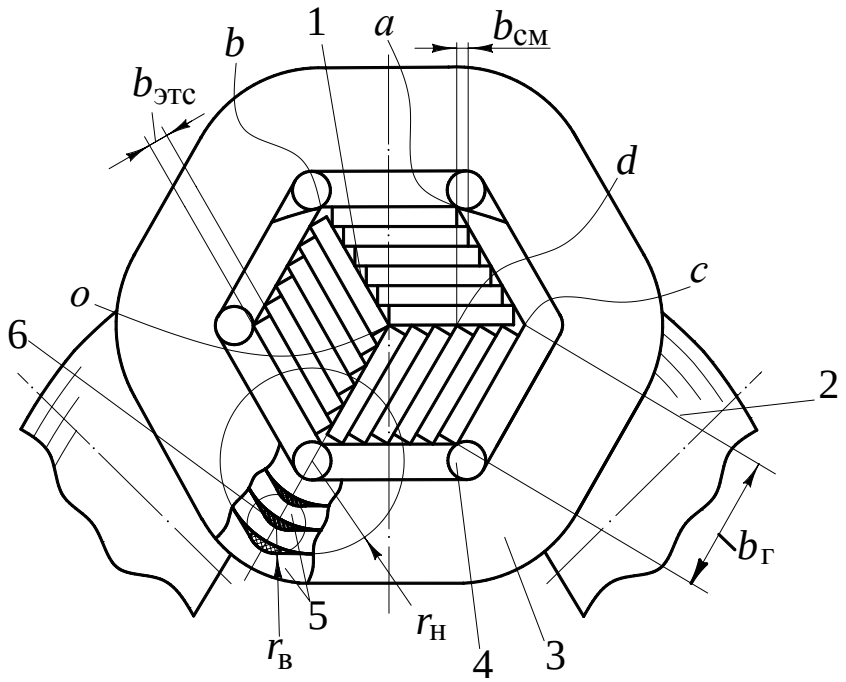

Рис. 5. Особливості структури і конструкції трифазної просторової електромагнітної системи з двохплощинними твірними поверхнями і шестигранними контурами стрижнів і котушок: 1 – стрижень; 2 – ярмо; 3 – котушка обмотки; 4 – опорний ізоляційний елемент; 5 – витковий елемент котушки; 6 – вертикальна ізоляційна прокладка.

Величина зсуву елементарного шару ЕТС у межах ромба $aboc$ визначається співвідношенням

$$b_{см} = k_{зс}\delta_{этс}tg(\pi/6) = k_{зс}\delta_{этс}/(\sqrt{3}). \quad (3)$$

Частина площі шестигранника, яка незаповнена шарами ЕТС, визначається, з використанням (1) і (3), співвідношенням

$$\Delta S_ш = n_{эс}\delta_{этс}b_{см} = 1{,}5b_г\delta_{этс}. \quad (4)$$

Площа рівностороннього утворюючого шестигранника стрижня визначається, використовуючи (2), співвідношенням

$$S_ш = 6oc \cdot ad/2 = 3b_г ad = 1{,}5\sqrt{3}b_г^2. \quad (5)$$

Складова площі контуру перерізу стрижня $S_{сш}$ в шестигранному УК (рис. 5) і коефіцієнт заповнення вказаного контуру перерізом стрижня $k_{кш}$ визначаються, на основі (4) і (5), виразами:

$$S_{сш} = S_{ш} - \Delta S_{ш} = 1{,}5\sqrt{3}b_{г}^{\,2} - 1{,}5b_{г}\delta_{этс} = 1{,}5b_{г}\left(\sqrt{3}b_{г} - \delta_{этс}\right),$$
$$k_{кш} = S_{мш}/S_{ш} = (1-\delta_{этс})/(\sqrt{3}b_{г}). \qquad (6)$$

З (6) слідує, що при $\delta_{этс}$=0,35 мм і $b_{с}$ =(0,1…1) м, коефіцієнт $k_{кш}$= 0,998…0,9998≈1.

В цілому, нетрадиційні конструктивно – структурні рішення ІА можуть відрізняться варіантами УК стрижнів та котушок обмоток і їх розміщенням відносно координатних осів планарних і просторових аксіальних та радіальних ЕМС. Оцінка результативності структурних перетворень та вибір найкращого варіанта виконання конкретного ІА можливі на основі розв'язання задач структурної оптимізації ЕМС.

Структурна оптимізація ЕМС ІА може бути виконана, аналогічно трансформаторам, методом відносних коефіцієнтів показників технічного рівня [9]. Даний метод полягає в представленні оптимізаційної цільової функції $F_{цфі}$ у вигляді добутку співмножників

$$F_{цфі} = \left(\sqrt[4]{\Pi_{идр}}\right)^{3} \cdot K_{i}\Pi_{i}, \qquad (7)$$

де $\Pi_{идр}$ – показник вихідних даних і електромагнітних навантажень, які залежать від реактивної потужності, частоти мережі, середнього значення амплітуди індукції в стрижні та густини фазового струму обмотки ІА; K_i – коефіцієнт, який визначається питомими показниками використаних електротехнічних матеріалів; Π_i – співмножник, який є функцією одного із трьох (i=3) відносних показників технічного рівня у вигляді відносних коефіцієнтів маси $\Pi_{м}$, вартості $\Pi_{с}$ та втрат енергії $\Pi_{п}$ в ЕМС.

Кожен Π_i, що входе у (7) є функцією коефіцієнта заповнення обмоткового вікна провідниковим матеріалом обмотки (класу напруги) і універсальних основних відносних геометричних керованих змінних відношення λ_0 висоти та ширини обмоткового вікна та відношення $a_{м}$ діаметрів розрахункових кіл магнітопровода. В деяких ЕМС може використовуватись додаткова третя геометрична змінна центрального кута стрижня $\alpha_{с}$

$$\Pi_i = f\left(K_{зо}, \lambda_0, a_{м}, \alpha_{с}\right).$$

Структурна оптимізація варіантів ЕМС ІА полягає в порівняльному аналізі сукупності екстремальних значень $\Pi_{i\min}$ при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентності. Перший множник (1), що

містить $П_{идр}$ в структурній оптимізації не використовується та приймається однаковим для порівнюваних ЕМС. Показник $П_{идр}$ може бути використаний в поетапній параметричній оптимізації ІА конкретного призначення при заданих проектних обмеженнях [9].

Висновки.

1. Заміна прямокутних та кругових УК стрижнів та котушок обмоток на шестигранні УК створює можливість підвищення надійності та компактності, а також зниження матеріалоємності та працевитрат виробництва дроселів та реакторів.

2. Для проектної оцінки ефективності структурних перетворень активної частини необхідна розробка математичних моделей структурної оптимізації та порівняльного аналізу варіантів ЕМС ІА.

Література

1. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности /*И. И. Белопольский*, *Е. И. Каретникова*, *Л. С. Пикалова*. – М.:Энергия, 1973. – 399 с.
2. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под ред. *С.Д. Лизунова*, *А. К. Лоханина*. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 616 с.
3. *Ставинский А. А.* Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / *А. А. Ставинский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. - №1. – с. 57 – 61.
4. *Ставинский А.А.* Классификация структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей / *А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. - №2. – с. 53 – 58.
5. *Костенко М. П.* Электрические машины: [В 2 – х ч. Ч.1. – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учебник для ВУЗов] / *М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский*. – Л. : Энергия, 1972 – 544 с.
6. *Тихомиров П. М.* Расчет трансформаторов: [Учебное пособие для ВУЗов] / *П.М. Тихомиров*. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
7. *Ставинский А. А.* Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) / *А. А. Ставинский* // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. - №5. – с. 43 – 47.
8. *Лазарев В. І.* Електродинамічна стійкість силових трансформаторів (теорет. основи; методи розрахунку, засоби забеспечення): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.09.01. "Електричні машини і апарати" / *В. І. Лазарев.* – К.: 2006. – 37 с.

9. *Ставинский Р. А.* Нетрадиционные технические решения, постановка задачи и метод структурной оптимизации индукционных статических устройств / *Р. А. Ставинский* // Вісник Кременчуцького державного університету імені М. Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. вип. 4/2010 (63) 4.2. – с. 91 – 94.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОНТУРОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ДРОССЕЛЕЙ И РЕАКТОРОВ

Ставинський Р.А.

Аннотация **– показаны возможности усовершенствования электромагнитных систем индукционных аппаратов на основе шетисгранного образования контуров сечений стержней манитопроводов и витков катушек обмоток, а также представлен метод их структурной оптимизации.**

TRANSFORMATION OF CIRCUIT AND TO SET TARGETS OF STRUCTURAL OPTIMIZATION ELECTROMAGNETIC OF SYSTEMS CHOKES AND REACTORS

R. Stavinski

Summary

Possibilities of improvement of the electromagnetic systems of induction vehicles are shown on the basis of hexahedral formative contours of bars of cores and spools of puttees and the method of their structural optimization is presented.