MOTROL. COMMISSION OF MOTORIZATION AND ENERGETICS IN AGRICULTURE – 2013, Vol.15, No. 2, 177–183

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ МОЩНОСТЬЮ ДО 10000 кВ·А

Олег Плахтырь
Николаевский национальный аграрный университет
54020, г. Николаев, ул. Парижской коммуны, 9
Oleg Plakhtyr
Nikolaev National Agrarian University
54020, Nikolaev, st. Paris Commune, 9

Аннотация. В работе выполнен анализ конструктивно-геометрических и технологических особенностей и представлена классификация пространственных магнитопроводов трехфазных статических индукционных устройств. В качестве основных признаков типа магнитопровода приняты направление магнитного потока стержней, форма и расположение образующих поверхностей стержней и обмоточных окон.

Ключевые слова: пространственный магнитопровод, трехфазные статические индукционные устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные трансформаторы, реакторы и дроссели, являясь габаритными, металлоемкими и энергоемкими статическими индукционными устройствами (СИУ), оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели электротехнических систем и комплексов, а также блоков комплектного электрооборудования. На протяжении прошедшего века практические достижения в части снижения удельной и технологической материалоемкости СИУ отечественного производства базировались, в основном, на совершенствовании электротехнических материалов и развитии методов электромагнитных расчетов, а также оптимизационного проектного синтеза в рамках активной части с планарным магнитопроводом [1-6]. При этом, например в [1-4], указано, что дальнейшее повышение технического уровня СИУ мощностью до 6300 кВ·А возможно на основе пространственных электромагнитных систем (ПЭМС). Такие системы отличаются видом пространственных схем [4,5] (рис. 1), а также наличием различных вариантов и комбинаций конструкторско-технологических решений [7].

В связи с актуальностью и необходимостью решения задач дальнейшего усовершенствования СИУ, возникла необходимость количественно-качественного сравнительного анализа вариантов ПЭМС.

В [8] в качестве количественных показателей совершенства ПЭМС предлагаются экстремальные значения целевых функций геометрической оптимизации. Указанные функции представлены в виде относительных и независящих от исходных данных и электромагнитных нагрузок коэффициентов [9-12] изменения основных потерь, массы и стоимости активной части. Дополнительно качество СИУ предлагается определять коэффициентом $k_{ко}$ использования геометрического или контурного объема и коэффициентом $k_{ис}$ использования электротехнической стали при производстве пространственных магнитопроводов. Однако указанные коэффициенты не учитывают особенности конструкции и технологии, обуславливающие добавочные потери и трудоемкость производства.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основной целью настоящей работы является систематизация технических решений и дополнение количественных показателей сравнительного анализа ПЭМС [8] вспомогательной группой признаков, характеризующих геометрические и конструктивно-технологические особенности.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из [1-7] следует, что ПЭМС подразделяются, в соответствии с расположением осей обмоток в пространстве, на радиальное и аксиальное исполнения, а конфигурация витков и положение осей катушек обмоток определяются типом магнитопровода (рис. 2).

В качестве основных признаков типа магнитопровода предлагается направление магнитного потока стержней, а также форма и расположение образующих поверхностей (ОП) стержней и обмоточных окон (рис. 2). В свою очередь типы магнитопроводов подразделяются на группы, которые могут состоять из подгрупп. Группы и подгруппы отличаются определенными конструктивно-геометрическими особенностями. Плоские пересекающиеся, цилиндрические или плоские параллельные поверхности формируют стержни соответственно прямоугольного сечения, сечения вписываемого в окружность, а также более сложного сечения секторной или ромбической формы. При этом стержни образуются участками разомкнутых контуров (рис. 1, а и б), а также могут соединяться с ярмами «треугольником» (рис. 1, в и д) или «звездой» (рис. 1, г). Соответственно образуются обмоточные окна изменяющегося или постоянного сечения.

Согласно [2-4,6,7] наиболее технологичными являются магнитопроводы выполняемые способом навивки из ленты (рулона) электротехнической стали. Максимально свойства рулонной анизотропной стали используются в магнитопроводах из непрерывных («неразрезных») секций аксиального (рис. 1, а) и радиального (рис. 1, б) типов.

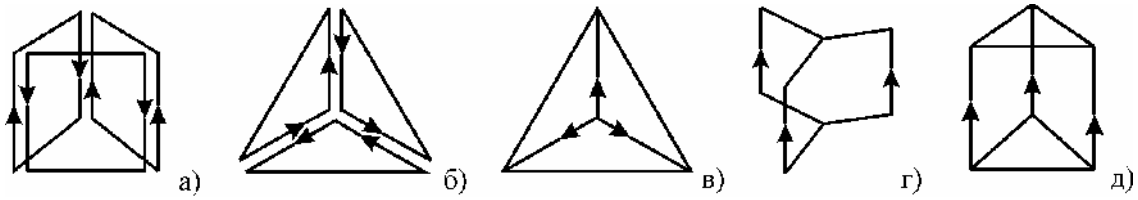

Рис. 1. Схемы симметричных пространственных магнитопроводов:
а – аксиальная разомкнутая; б – радиальная разомкнутая; в – радиальная замкнутая «треугольником»; г – аксиальная замкнутая «звездой»;
д – аксиальная замкнутая «треугольником»

Fig. 1. Schemes symmetric space of cores: a - axial open-loop, б - radial open loop, в - radial closed "a triangle"; г - axial closed "star", and д - axial closed "triangle"

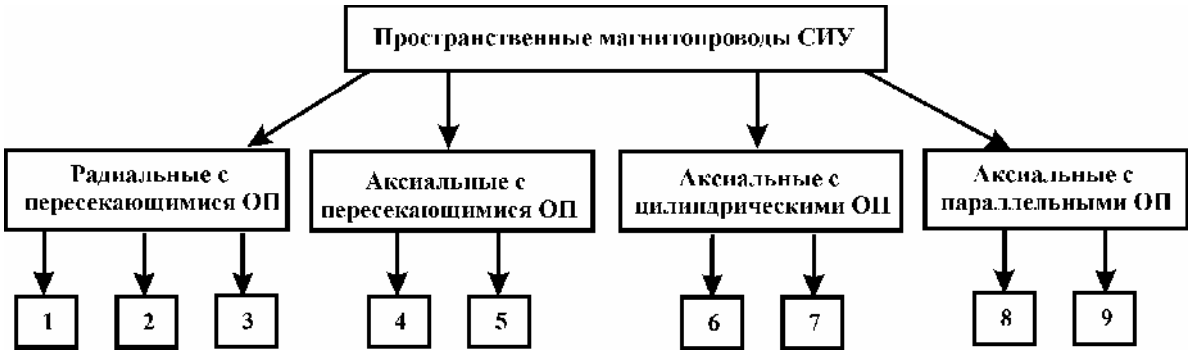

Рис. 2. Типы и группы магнитопроводов пространственных электромагнитных систем:
1 – разомкнутые из непрерывных секций; 2 – с радиальным стыком; 3 – с аксиальным стыком; 4 – соединение стержней «звездой»; 5 – соединение стержней «треугольником»; 6 – с трехплоскостным стыком; 7 – с двумя одноплоскостными стыками; 8 – из коаксиально-эквидистантных элементов стержней; 9 – с ромбическими образующими стержней

Fig. 2. Types and groups of magnetic spatial electromagnetic systems:1 - open the continuous sections 2 - radial junction 3 - with axial butt-com, 4 - connect the rods "star", 5 - connect the rods "triangle", 6 - with a three-plane junction 7 - with two single-plane joints; 8 - of coaxial elements equidistant rods, 9 - with rhombic forming rods

Подобные магнитопроводы обеспечивают пониженный ток холостого хода ПЭМС и, в случае плоскостной конфигурации и прямоугольного сечения отдельных секций, отличаются минимальной трудоемкостью изготовления. Однако их применение обуславливает низкий коэффициент заполнения контуров катушек сталью стержней и повышен-

ную материалоемкость ПЭМС. При отсутствии взаимной магнитной связи поток одной секции в стержне в $\sqrt{3}$ раз меньше потока стержня вместо 2 раз в случае наличия стыков секций, что обуславливает необходимость завышения сечения стали стержней в $2\sqrt{3}$ раз [4,5]. Для обеспечения стыковки стержневой части каждой из смежных секций (рис. 3, а) непрерывные участки магнитопровода формуются посредством термического и деформационного воздействия (радиус $R_к$ на рис. 3, б) и для вписывания в контур окружности выполняются составными. Другим способом формовки и совмещения участков стержней с цилиндрическими ОП является использование лент (рулонов) стали с изменяющейся шириной и их намотка со смещением витков для обеспечения плоскости стыка [4].

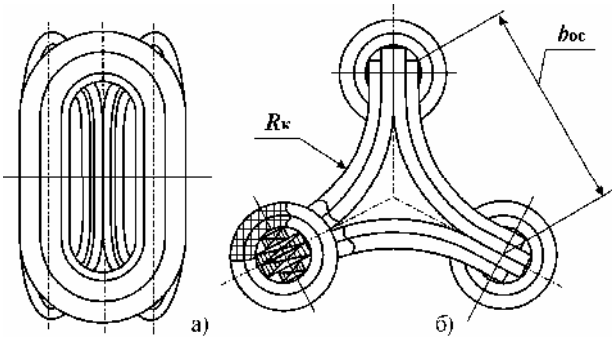

Рис. 3. Пространственная электромагнитная система с аксиальным магнитопроводом из непрерывных секций:
а – магнитопровод (вид сбоку); б – схема активной части

Fig. 3. Space by an electromagnetic system with axial magnetic circuit of continuous sections:
and - magnetic (side view), б - diagram of an active part

В целом сборные конструкции ПЭМС как с непрерывными секциями разомкнутого магнитопровода, так и со стыком частей стержня, характеризуются повышенным расстоянием $b_{ос}$ между геометрическими центрами сечения стержней и минимальным $k_{ко} = 0{,}25...0{,}35$, обусловленными необходимостью вмотки катушек на специальных станках.

В случае обеспечения магнитной связи секций (рис. 3), в связи с пересечением плоскостей сопряжения (трехплоскостной стык по схеме «звезда»), магнитная связь возможна лишь при заполнении стыковых зазоров ферромагнитным клеем. Технологические сложности формовки магнитопровода и выполнения обмотки ограничивают мощность систем подобных ПЭМС (рис. 3) до 1000 кВ·А [2,4].

Из [1-7] и патентной документации следует, что количество разновидностей радиальных магнитопроводов (рис. 1, б и в) представлено всего одним признаком ОП (рис. 2). Стержни непрерывных и стыковых магнитопроводов радиального типа образуются плоскостными пересекающимися ОП, причем ПЭМС с магнитопроводами (рис. 1, а и б) по показателям и характеристикам существенно не отличаются друг от друга. Одностыковым шихтованным вариантом схемы (рис. 1, в) является цельноштампованный магнитопровод (рис. 4, а). Данный вариант характеризуется относительно сложным для СИУ производством по традиционной технологии магнитопроводов вращающихся машин. Его применение обеспечивает пониженный ток холостого хода ПЭМС. Недостатками являются ухудшенные массогабаритные показатели при использовании традиционной для СИУ прямоугольной формы сечения катушек и весьма низкий $k_{ис} = 0{,}3...0{,}35$. Показатель технологической материалоемкости радиальной схемы улучшается в конструкции комбинированного магнитопровода (рис. 4, б) с $k_{ис} = 0{,}8...0{,}85$. Такое техническое решение отличается наличием витых ярем и их аксиальной стыковкой со стержнями, выполненными изгибом полос стали. Однако магнитопровод (рис. 4, б) по показателям удельной материалоемкости уступает шихтованной конструкции (рис. 4, а) в связи с наличием дополнительных объемов стали в зонах стыков. Эти объемы обеспечивают изменение направления магнитного потока из радиального в аксиальное. Кроме того, в местах соприкосновения участков магнитопровода направления слоев стали взаимно перпендикулярны, что повышает добавочные потери и требует изоляции стыков.

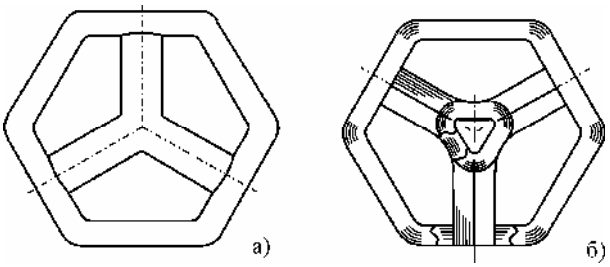

Рис. 4. Варианты конструкции радиального стыкового магнитопровода:
а – шихтованный с радиальным стыком; б – комбинированный с аксиальными стыками витых ярем и шихтованно-прессованных стержней

Fig. 4. Variations in the design of radial magnetic butt: and - a laminated with a radial junction, б - combined with axial joints twisted yokes and laminated, extruded rods.

Из [1-7] и анализа патентной документации также следует, что наибольшее конструктивно-технологическое развитие получили ПЭМС аксиального исполнения с тремя признаками ОП (рис. 2). При этом в системах с пересекающимися ОП стержни соединяются по схеме «звезда» (рис. 1, г) и по схеме «треугольник» (рис. 1, д), а в системах с цилиндрическими и параллельными ОП стержни замыкаются «треугольником».

В схеме с соединением «звезда» используются стыковые шихтованные (рис. 5, а и б) или витые магнитопроводы конфигурации, соответствующей (рис. 5, б) с вариантами «сложного» стыка, например по рис. 5, в и г. Недостатками магнитопровода (рис. 5, а) является наличие стыков с пересечением плоскостей сопрягаемых поверхностей (трехплоскостной стык по схеме «треугольник») и взаимная перпендикулярность слоев стали стержней и ярем. Согласно [6] магнитопроводы с одноплоскостным стыком стержней (рис. 5, б) применялись в США. Такие магнитопроводы формируются изгибом выступов в пакете плоских пластин посредством опрессовки и образования стыковых поверхностей механической обработкой периферийных участков. Преимущество конструкции (рис. 5, б) – пониженное магнитное сопротивление, существенный недостаток – самый высокий уровень отходов электротехнической стали с $k_{ис} = 0{,}25...0{,}3$. В отличие от конструкции (рис. 4, а и рис. 5, б), малоотходному производству соответствуют магнитопроводы из витых заготовок с прямоугольным внутренним контуром и «косыми» разрезами, $k_{ис} = 0{,}9...0{,}95$. Подобные разрезы формируют трехплоскостной (рис. 5, в) или шестиплоскостной (рис. 5, г) стыки. Магнитопроводы (рис. 5, в и г) обеспечивают низкие добавочные потери, снижение которых обусловлено совпадением направлений слоев стали стыкуемых элементов. Наиболее совершенным из конструкций (рис. 5) представляется магнитопровод (рис. 5, г), характеризующийся повышенной площадью стыкуемых поверхностей. Однако сложные стыки также требуют использования ферромагнитного клея, при этом конструкции ПЭМС становятся неразборными.

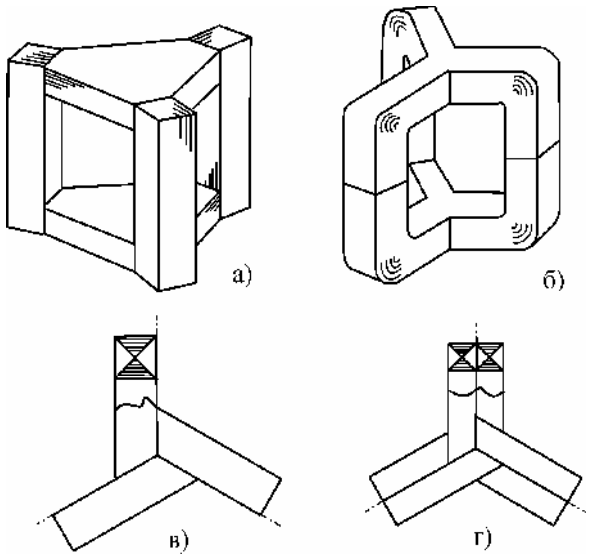

Рис. 5. Варианты конструкторско-технологических решений стыковых магнитопроводов с соединением стержней по схеме «звезда»:
а – шихтованный; б – шихтованно-прессованный;
в, г – разрезной из витых заготовок

Fig. 5. Variants of design and technological such solutions with the butt of magnetic connection rods on a "star": and - a laminated б - laminated-pressed; в, г - split, twisted pieces

В отличие от схем (рис. 1, а, б и г) и конструкции (рис. 3), в магнитопроводах (рис. 1, в и д) магнитный поток ярма в $\sqrt{3}$ меньше потока стержня. Поэтому ярма следует выполнять раздельно от стержней с сечением составляющим 58% сечения стержня [4,5]. Стыковые магнитопроводы с ярмом замкну-

тым треугольником и цилиндрическими ОП выпускаются зарубежом и их применение, согласно [4], уменьшает массу активной части и потери холостого хода ПЭМС на 9…10%. Варианты конструкций магнитопроводов схемы (рис.1, д) с тремя возможными признаками ОП и различными технологиями изготовления представлены на рис. 6.

Магнитопроводу (рис. 6, а) присущи недостатки, обусловленные трехплоскостным стыком и взаимной перпендикулярностью шихтовки стержней и ярма. Магнитопроводы (рис. 6, б) используются в трехфазных реакторах [3] и отличаются наличием добавочных потерь в периферийных витках стержней. Взамен витых стержней в трансформаторах схемы, подобной (рис. 6, б), используется стержни вписываемого в окружность ступенчатого сечения из шихтованных пакетов стали различной ширины, а также стержни из эвольвентно изогнутых листов стали [2-4]. Предельная мощность СИУ с ПЭМС ограничена железнодорожным габаритом (ширина платформы), соответствует схеме (рис. 5, б) с шихтованными стержнями и составляет 6300 кВ·А [4].

На рис. 6, в и г представлены некоторые из возможных вариантов [7-12] магнитопроводов с параллельными ОП и «сложной» конфигурацией стержней. Конструкция (рис. 6, в) предполагает использование аналогичной (рис. 5, в и г) технологии навивки и разрезки цилиндрических заготовок для стержней и, в связи с совпадением ориентации слоев стали стержней и витого ярма, обеспечивает пониженные добавочные потери. Магнитопровод (рис. 6, г) отличается повышенной технологичностью (стержни выполняются из идентичных плоских листов). Однако, как и другие конструкции (рис. 6, а и б) с взаимным пересечением направлений расположения слоев стали стержней и ярем, требует изоляции стыков. Следует отметить, что в конструкциях (рис. 4, б, рис. 5, б и рис. 6, б-г) технологические зазоры могут быть сведены к минимуму в связи с расположением стыков в одной плоскости.

Согласно [11,12] ПЭМС с параллельными ОП обеспечивают лучшие массогабаритные показатели относительно систем, в которых используются рассмотренные выше магнитопроводы с традиционной конфигурацией стержней. Компактность ПЭМС с параллельными ОП обусловлена минимальным межосевым расстоянием $b_{\text{ос}}$ (рис. 6, г), а также высоким $k_{\text{ко}} = 0{,}65...0{,}85$ и позволяет повысить мощность СИУ пространственной схемы до 10000 кВ·А.

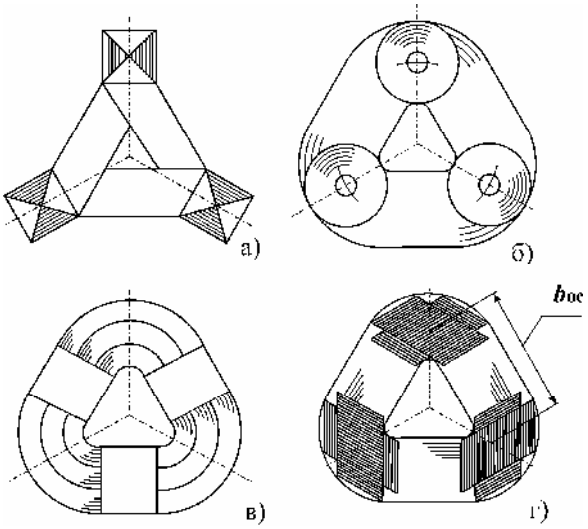

Рис. 6. Конструктивно-технологические решения стыковых магнитопроводов с соединением стержней по схеме «треугольник»:
а – шихтованный; б – витой; в – витой разрезной; г – комбинированный (шихтованно-витой)

Fig. 6. Design and technology of the solution with the butt of magnetic compound of cores on a "triangle": and - a laminated, б – helical, в - helical-carved times; г - combined (laminated-twisted)

ВЫВОДЫ

1. Технический уровень ПЭМС определяется конструктивно-геометрическими и технологическими признаками, основными из которых являются тип магнитопровода, форма и расположение ОП стержней и обмоточных окон, а также расположение (наличие и число пересекающихся плоскостей) стыков.

2. Вспомогательными признаками магнитопроводов, оказывающими влияние на качество ПЭМС являются: число стыков на фазу; наличие совпадения и угол расхождения направлений слоев стали в плоскостях стыков; количество единиц используемой технологической оснастки; наличие единиц специального технологического оборудования (штампов, гибочных прессов…). 3. Наи-

больший практический интерес представляют ПЭМС аксиального исполнения со стыковыми витыми разрезными и комбинированными магнитопроводами, а также параллельными ОП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Petrov G. 1974. Jelektricheskie mashiny. ch.1 – M.: Jenergija, –240.
2. Magnitoprovody silovyh transforma-torov (tehnologija i oborudovanie)/ A.I. Majorec, G.I. Pshenichnyj, Ja.Z. Checheljuk i dr. – M.: Jenergija, 1973. – 272.
3. Dorozhko L., Libkind M. 1977. Reaktory s poperechnym podmagnichivaniem. – M.: Jenergija,– 176.
4. Tihomirov P. 1976. Raschet transformatorov: Ucheb. Posobie dlja vuzov. – 4-e izd. pererab. i dop. – M.: Jenergija,– 544.
5. Lejtes L. 1981. Jelektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov. – M.: Jenergija,– 392.
6. Bal'jan R. 1961. Transformatory maloj moshhnosti. – L.: Sudpromgiz,– 368.
7. Plahtyr O. 2002. Varianty konstrukcii i klassifikacija prostranstvennyh magnitoprovodov trehfaznyh transformatorov i reaktorov// Elektrotehnika i elektromehanika. — №3. – 64-65.
8. Stavinskij A., Plahtyr O., Stavinskij R. 2003. Pokazateli kachestva i struk-turnoj optimizacii prostranstvennyh jelektromagnitnyh sistem trehfaznyh transformatorov, reaktorov i drosselej// Elektrotehnika i elektromehanika. – №4. – 79-82.
9. Stavinskij A., Plahtyr O., Stavinskij R. 2003. Zavisimost' poter' trehfaz-nyh prostranstvennyh transformatorov s parallel'nymi stenkami obmotochnyh okon ot geometricheskih sootnoshenij aktivnoj chasti// Visnik Shidnoukr. nac. un-tu im. V. Dalja. – №4. – 95-100.
10. Stavinskij A., Plahtyr O., Stavinskij R. 2002. Zavisimosti masso–stoimostnyh pokazatelej trehfaznyh pro-stranstvennyh transformatorov s rombiche-skimi katushkami obmotok ot geometriche-skih sootnoshenij aktivnoj chasti// Elekt-romashinobuduvannja ta elektroobladnannja: Mizhvid. nauk.-tehn. zb. — Vip. 58 – 85–91.
11. Stavinskij A., Plahtyr O. 2003. Sravnitel'nyj analiz materialoemkosti variantov trehfaznyh prostranstvennyh jelektromagnitnyh sistem// Visnik Kremen-chuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo univer-sitetu: Naukovi praci KDPU. – Kremenchuk: KDPU, - №2 (19), tom 1. – 53-56.
12. Stavinskij A., Plahtyr O. 2003. Masso-stoimostnaja model' optimizacii pro-stranstvennyh magnitnyh sistem statiche-skih indukcionnyh ustrojstv// Elektroma-shinobuduvannja ta elektroobladnannja: Mizh-vid. nauk.-tehn. zb. — Vip. 61. – 66–74.
13. Plahtir O. 2009. Usovershenstvovanie trehfaznyh staticheskih indukcionnyh ust-rojstv na osnove netradicionnyh konstruk-torsko-tehnologicheskih reshenij proizvod-stva prostranstvennyh magnitoprovodov // Lublin. — Volume 10B. – 58–63.
14. Plahtyr O. 2010. Matematicheskaja mo-del' aksial'noj prostranstvennoj jelektro-magnitnoj sistemy trehfaznogo transfor-matora s cilindricheskimi obrazujushhimi poverhnostjami sterzhnej magnitoprovoda// MOTROL. – Lublin. — Volume 12A. – 15–24.
15. Plahtir O., Koshkin D. 2012. Konstruktors'ko-tehnologichni rishennja udoskonalennja regul'ovanih statichnih indukcijnih pristroïv dlja elektronnih sistem i peretvorjuval'noï tehniki. – Visnik KNUTD. — №1. – 39–42.
16. Plahtyr O. 2011. Usovershenstvovanie reguliruemyh staticheskih indukcionnyh ustrojstv dlja jelektronnyh sistem i preob-razovatel'noj tehniki // MOTROL. – Lublin. — Volume 13A. – 81–86.
17. Stavinskij A., Stavinskij R., Plahtyr O., Ciganov A. 2008. Napravlenie uso-vershenstvovanija indukcionnyh staticheskih ustrojstv na osnove jelektromagnitnyh sistem s mnogoploskostnymi obrazujushhimi poverh-nostjami i metod ih strukturnoj optimizacii // Vestnik Nacional'nogo tehnicheskogo uni-versiteta «HPI». – Har'kov: HPI. -– Vip. 40. – 115–124.
18. Plahtyr O., Koshkin D. 2012. Povyshenie predel'noj moshhnosti i strukturnaja optimizacija staticheskih indukcionnyh ustrojstv s prostranstvennymi magnito-provodami. – Visnik agrarnoï nauki Prichornomor'ja : naukovo-teoretichnij fahovij zhu-rnal / V. S. Shebanin (gol. red.) ta in. — Mikolaïv,— T.1, Vip. 4 (68). — 228-234.

THE CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL PARTICULARITIES OF SPATIAL MAGNETIC CORES O THREE-PHASED STATIC INDUCTION DEVICES OF UP TO 10000 KV·A POWER

Summary. The analysis of constructive-geometrical and technological particularities is fulfilled and the classification of spatial magnetic cores of three-phased static induction devices is presented in the work. The direction of magnetic flux of rods, the shape and location of forming surfaces of rods and winding windows are accepted as the basic sings of magnetic core's type.

Key words: spatial magnetic core, three-phased static induction devices.