

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ КОНСТРУКТОРКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
МАГНИТОПРОВОДОВ

Oleg Plakhtyr

Mykolayiv State Agrarian University, Ukraine

11th Prodolnaya Street 31a, Mykolayiv 54040, Ukraine

Аннотация. В работе выполнен анализ конструктивно-геометрических и технологических особенностей пространственных магнитопроводов трехфазных статических индукционных устройств поставленных на производство и предложенных к использованию. На основе последних возможно создание трехфазных трансформаторов с улучшенными массогабаритными и энергетическими показателями.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, пространственная электромагнитная система, геометрические соотношения.

ВСТУПЛЕНИЕ

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. Ранее улучшение качественных показателей трехфазных трансформаторов основывалось на совершенствовании электротехнических материалов и развитии методов электромагнитных расчетов, а также оптимизационного проектного синтеза в рамках активной части с планарным магнитопроводом [1-6]. В [1-4] указано, что дальнейшее повышение технического уровня СИУ возможно на основе пространственных электромагнитных систем (ПЭМС), которые отличаются видом пространственных схем [4,5] (рис. 1), а также наличием различных вариантов и комбинаций конструкторско-технологических решений [7].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью настоящей работы является сравнительный анализ конструкторско-технологических решений магнитопроводов трехфазных СИУ с последующим выбором наиболее целесообразных технологий производства электромагнитных систем с оптимальными массогабаритными и энергетическими показателями.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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.

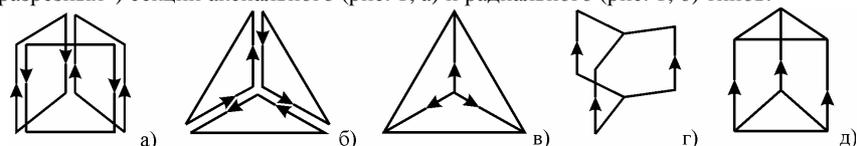


Рис. 1. Схемы симметричных пространственных магнитопроводов:

а – аксиальная разомкнутая; б – радиальная разомкнутая; в – радиальная замкнутая «треугольником»; г – аксиальная замкнутая «звездой»; д – аксиальная замкнутая «треугольником».

Fig. 1. Schemes of symmetric spatial magnetic cores:

а – axial-flow; б – radial-flow; в – radial-flow «triangle»-closed; г – axial-flow «star»-closed; д – axial-flow «triangle»-closed

Подобные магнитопроводы обеспечивают пониженный ток холостого хода ПЭМС и отличаются минимальной трудоемкостью изготовления. Однако их применение обуславливает низкий коэффициент заполнения контуров катушек сталью стержней и повышенную материалоемкость ПЭМС. При отсутствии взаимной магнитной связи поток одной секции в стержне в $\sqrt{3}$ раз меньше потока стержня, что обуславливает необходимость завышения сечения стержней в $2\sqrt{3}$ раз [4,5]. Для обеспечения стыковки стержневой части каждой из смежных секций (рис. 2, а) непрерывные участки магнитопровода формируются посредством термического и деформационного воздействия (радиус R_k на рис. 2, б) и для вписывания в контур окружности выполняются составными.

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

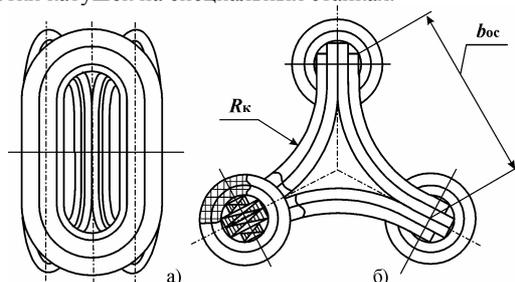


Рис. 2. Пространственная электромагнитная система с аксиальным магнитопроводом из непрерывных секций:
а – магнитопровод (вид сбоку); б – схема активной части.

Fig. 2. Spatial electromagnetic system with axial-flow magnetic core of continuous sections:
а - магнитопровод (side-view); б - scheme of the active part

Стержни непрерывных и стыковых магнитопроводов радиального типа образуются плоскостными пересекающимися образующими поверхностями (ОП), причем ПЭМС с

магнитопроводами (рис. 1, а и б) по показателям и характеристикам существенно не отличаются друг от друга [1-7]. Одностыковым шихтованным вариантом схемы (рис. 1, в) является цельноштампованный магнитопровод (рис. 3, а). Данный вариант обеспечивает пониженный ток холостого хода ПЭМС. Недостатками являются ухудшенные массогабаритные показатели при использовании традиционной для СИУ прямоугольной формы сечения катушек и весьма низкий коэффициент использования $k_{ис} = 0,3...0,35$. Показатель технологической материалоемкости радиальной схемы улучшается в конструкции комбинированного магнитопровода (рис. 3, 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. 3, б) по показателям удельной материалоемкости уступает шихтованной конструкции (рис. 3, 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.

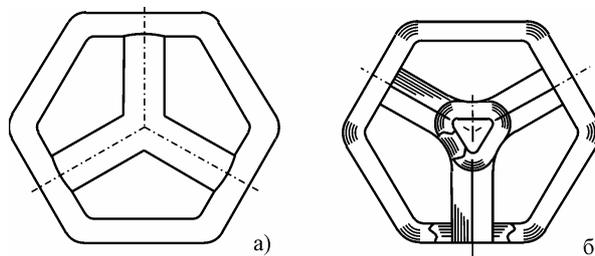


Рис. 3. Варианты конструкции радиального стыкового магнитопровода:

а – шихтованный с радиальным стыком; б – комбинированный с аксиальными стыками витых ярем и шихтованно-прессованных стержней.

Fig. 3. Variants of construction of radial jointed magnetic core:

а – laminated with radial joint; б – combined with the axial-flow joints of twisted yokes and laminated-pressed bars

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. 4, а и б) или витые магнитопроводы конфигурации, соответствующей (рис. 4, б) с вариантами «сложного» стыка, например по рис. 4, в и г. Недостатками магнитопровода (рис. 4, а) является наличие стыков с пересечением плоскостей сопрягаемых поверхностей и взаимная перпендикулярность слоев стали стержней и ярем. Магнитопроводы (рис. 4, б) формируются изгибом выступов в пакете плоских пластин посредством опрессовки и образования стыковых поверхностей механической обработкой периферийных участков. Преимущество конструкции (рис. 4, б) – пониженное магнитное сопротивление, существенный недостаток – самый высокий уровень отходов электротехнической стали с $k_{ис} = 0,25...0,3$. В отличие от конструкции (рис. 3, а и рис. 4, 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. 4, в) или шестиплоскостной (рис. 4, г) стыки. Магнитопроводы (рис. 4, в и г) обеспечивают низкие добавочные потери, снижение которых обусловлено совпадением направлений слоев стали стыкуемых элементов. Наиболее совершенным из конструкций (рис. 4) представляется магнитопровод (рис. 4, г), характеризующийся повышенной площадью стыкуемых поверхностей. Однако сложные стыки также требуют использования ферромагнитного клея, при этом конструкции ПЭМС становятся неразборными.

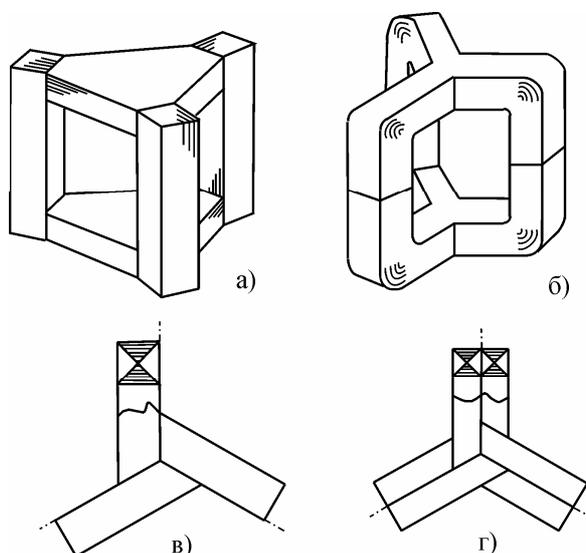


Рис. 4. Варианты конструкторско-технологических решений стыковых магнитопроводов с соединением стержней по схеме «звезда»: а – шихтованный; б – шихтованно-прессованный; в, г – разрезной из витых заготовок.

Fig. 4. Variants of design-engineering decisions of jointed magnetic cores with connection of bars on «star» scheme: а – laminated; б – laminated-pressed; в, г – cut from the twisted purveyances

В отличие от схем (рис. 1, а, б и г) и конструкции (рис. 2), в магнитопроводах (рис. 1, в и д) магнитный поток ярма в $\sqrt{3}$ меньше потока стержня. Поэтому ярма следует выполнять отдельно от стержней с сечением составляющим 58% сечения стержня [4,5]. Стыковые магнитопроводы с ярмом замкнутым треугольником и цилиндрическими ОП 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.

Недостатками магнитопровода (рис. 5, а) являются трехплоскостной стык и взаимная перпендикулярность шихтовки стержней и ярма. Магнитопроводы (рис. 5, б) используются в трехфазных реакторах [3] и отличаются наличием добавочных потерь в периферийных витках стержней. Взамен витых стержней в трансформаторах схемы, подобной (рис. 5, 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. 4, 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. 5, в) предполагает использование аналогичной (рис. 4, в и г) технологии навивки и резки цилиндрических заготовок для стержней и, в связи с совпадением ориентации слоев стали стержней и витого ярма, обеспечивает пониженные добавочные потери. Магнитопровод (рис. 5, г) отличается повышенной технологичностью (стержни выполняются из идентичных плоских листов). Однако, как и другие конструкции (рис. 5, а и б) с взаимным пересечением направлений расположения слоев стали стержней и ярма, требует изоляции стыков.

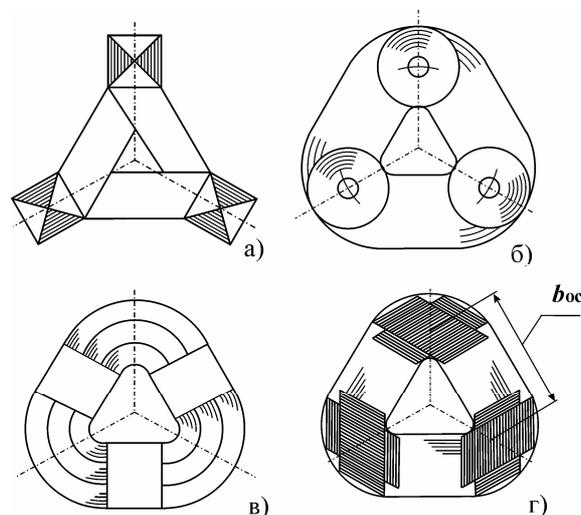


Рис. 5. Конструктивно-технологические решения стыковых магнитопроводов с соединением стержней по схеме «треугольник»: а – шихтованный; б – витой; в – витой разрезной; г – комбинированный (шихтованно-витой).

Fig. 5. Structural-technological decisions of jointed magnetic cores with connection of bars on «triangle» scheme: а – laminated; б – twisted; в – twisted-cut; г – combined (laminated-twisted)

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_{oc} (рис. 5, г), а также высоким $k_{к0} = 0,65...0,85$ и позволяет повысить мощность СИУ пространственной схемы до 10000 кВ·А.

ВЫВОДЫ

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. Вспомогательными признаками на качества 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.

Наибольшее повышение качественных параметров трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей возможно на основе использования ПЭМС аксиального исполнения со стыковыми витыми разрезными и комбинированными магнитопроводами, а также параллельными ОП.

ЛИТЕРАТУРА

- Петров Г.Н.: Электрические машины. ч.1 – М.: Энергия, 1974 –240 с.
 Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование)/ А.И. Майоренц, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др.: – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

- Дорожко Л.И., Либкинд М.С.: Реакторы с поперечным подмагничиванием. – М.: Энергия, 1977. – 176 с.
- Тихомиров П.М.: Расчет трансформаторов: Учеб. Пособие для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
- Лейтес Л.В.: Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
- Бальян Р.Х.: Трансформаторы малой мощности. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 368 с.
- Плахтырь О.О.: Варианты конструкции и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов// *Электротехніка і електромеханіка*. – 2002. – №3. – с. 64-65.
- Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.: Показатели качества и структурной оптимизации пространственных электромагнитных систем трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей// *Электротехніка і електромеханіка*. – 2003. – №4. – с. 79-82.
- Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.: Зависимость 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.
- Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.: Зависимости массо-стоимостных показателей трехфазных пространственных трансформаторов с ромбическими катушками обмоток от геометрических соотношений активной части// *Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб.* – 2002. – Вип. 58 – с. 85–91.
- Ставинский А.А., Плахтырь О.О.: Сравнительный анализ материалоемкости вариантов трехфазных пространственных электромагнитных систем// *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ*. – Кременчук: КДПУ, 2003. - №2 (19), том 1. – с. 53-56.
- Ставинский А.А., Плахтырь О.О.: Массо-стоимостная модель оптимизации пространственных магнитных систем статических индукционных устройств// *Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб.* – 2003. – Вип. 61. – с. 66–74.

IMPROVEMENT OF THREE-PHASED STATIC INDUCTION DEVICES ON THE BASIS OF UNCONVENTIONAL CONSTRUCTURAL-TECHNOLOGIC DECISIONS OF SPATIAL MAGNETIC CORES' PRODUCTION

Summary: The analysis of structural, geometrical and technological features of spatial magnetic conductors of the three-phase static induction devices that are manufactured and offered to use has been made. On the basis of the latter, it is possible to create the three-phase transformers with the improved overall dimensions and power indices.

Key words: three-phase transformer, spatial electromagnetic system, geometrical correlations.

Reviewer: Andrey Stavinskiy, Prof. Sc. D. Eng.