

КЛАССИФИКАЦИИ СТРУКТУР И ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ИНДУКЦИОННЫХ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ставинский А.А., д.т.н., проф.; Ставинский Р.А., к.т.н., доц.
Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова
Украина, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, Институт автоматики и электротехники
тел. (0512) 39-94-53, E-mail: ph@udmtu.dip.mk.ua

Подано варіанти класифікації структур і елементів електромагнітних систем електромеханічних та індукційних статичних перетворювачів, а також напрямки вдосконалення електричних машин на основі просторових структур їх активної частини.

Представлены варианты классификации структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей, а также направления усовершенствования электрических машин на основе пространственных структур их активной части.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эволюции электромеханических устройств разработаны разнообразные структурные разновидности электромагнитных систем (ЭМС) и конструкторско-технологические решения элементов активной части (АЧ) вращательных, линейных и статических электрических машин (ЭМ). Согласно [1], предпринимавшиеся ранее попытки создания общей классификации ЭМ были неудачными, что стало основанием для вывода: "Любое деление ЭМ на классы является условным [2]. При этом в [1] разработана структурная систематизация ЭМ с подвижными элементами АЧ в которой не рассмотрены статические индукционные преобразователи (трансформаторы).

Целью работы является определение обобщенной и частных классификаций структур ЭМС и элементов АЧ подвижных и статических ЭМ. Также представлены направления усовершенствования ЭМ на основе пространственных структур магнитопроводов и ЭМС.

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Положения и выводы систематизации [1] основаны на структурно-системном подходе, понятиях генетической классификации и пространственной геометрии первичных источников магнитного поля (МП). В число основных разновидностей структур источников МП входят варианты цилиндрических и других форм. На основе указанных положений и понятия "структура" которое означает строение, взаимное расположение и связь основных частей целого объекта, все электромеханические устройства можно квалифицировать по признакам пространственной геометрии и взаимной ориентации токонесущих и магнитных поверхностей. В качестве общего признака структурной классификации вращательных, линейных и статических ЭМ можно использовать предложенное в [3] понятие "образующие поверхности" (ОП).

Упомянутые геометрию и ориентацию ЭМС с подвижными элементами АЧ определяют ОП рабочего зазора между статором и ротором (подвижным элементом), в пределах которых сосредоточена энергия МП. В организации распределения силовых линий МП в пространстве с сосредоточенными контурами токов основная роль принадлежит магнитопроводу. Совместное влияние источника (обмотки) и концен-

тратора (магнитопровода) на распределение главного МП трансформатора определяется признаком ОП обмоточных окон и стержней.

Вариант структурной классификации ЭМ по главному признаку ОП и другим указанным ниже признакам представлен на рис. 1.

Согласно признакам ОП, основные разновидности ЭМС вращательных, линейных и статических ЭМ делятся, в зависимости от направления прохождения нормальных составляющих напряженности МП в рабочем зазоре и соответственно силовых линий МП в стержнях, на радиальные, аксиальные, конические и сферические (рис. 2). Кроме того структуры ЭМС, в зависимости от назначения, скорости движения, числа фаз, могут иметь различные числа обмоток, неподвижных (индуктор) и подвижных (ротор, якорь...) элементов АЧ и могут отличаться количеством элементов магнитопровода (полюсов, зубцов, стержней, ярем). Также ЭМС линейных и статических ЭМ подразделяются на планарные и пространственные.

Основное развитие из входящих в классификацию (рис. 1) ЭМС двигателей, генераторов и трансформаторов получили ЭМС с цилиндрическими (рис. 2,а, б и з) и плоскими параллельными (малые трансформаторы) ОП. Применяются структуры ЭМС специальных линейных и вращающихся преобразователей с плоскими параллельными, коническими и сферическими ОП (рис. 2,в – ж). Возможны и существуют структуры с комбинацией нескольких ОП, в частности цилиндрических и сферических. Подобные комбинации обеспечивают специальные функциональные возможности, например вращательно-поступательного движения [1].

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МАГНИТОПРОВОДОВ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Основу возможных вариантов ЭМС электромеханических преобразователей составляют традиционные шихтованные, витые и комбинированные магнитопроводы. Такие магнитопроводы, а также их элементы, состоят из плоских (рис. 2,а и б) или спирально-эквидистантных (рис. 2,в и г) слоев электротехнической стали (ЭТС) содержащих зубцово-пазовые участки и ярма.



Рис. 1. Диаграмма обобщенной классификации электромагнитных систем электрических машин

Разработаны и опробованы экспериментально нетрадиционные магнитопроводы целостных и стыковых структур для цилиндрических ЭМ. Указанные магнитопроводы содержат витые спирально-плоскостные слои или состоят из витых и аксиально-шихтованных (гофрированных) элементов образующих ярма и зубцово-пазовые зоны.

Известны также целостные композитные и составные магнитопроводы из шихтованных, гофрированных, порошковых и литых массивных элементов. Систематизация указанных нетрадиционных разработок в значительной части выполнена в [4] и может быть дополнена также апробированными на промышленной основе нетрадиционными магнитопроводами пространственных структур. Такие магнитопроводы отличаются тангенциально неоднородными (рис. 3,а) и пространственными многоплоскостными (рис. 3,б), конусно-плоскостными (рис. 3,в) и конусно-цилиндрическими (рис. 3,г) слоями ЭТС [5 - 8]. Структуры представленные на рис. 3, а и б обеспечивают снижение отходов ЭТС при использовании стандартного технологического оборудования. В це-

лом конструкции (рис. 3) реализуют возможности повышения технического уровня ЭМ нетрадиционными способами [9, 10].

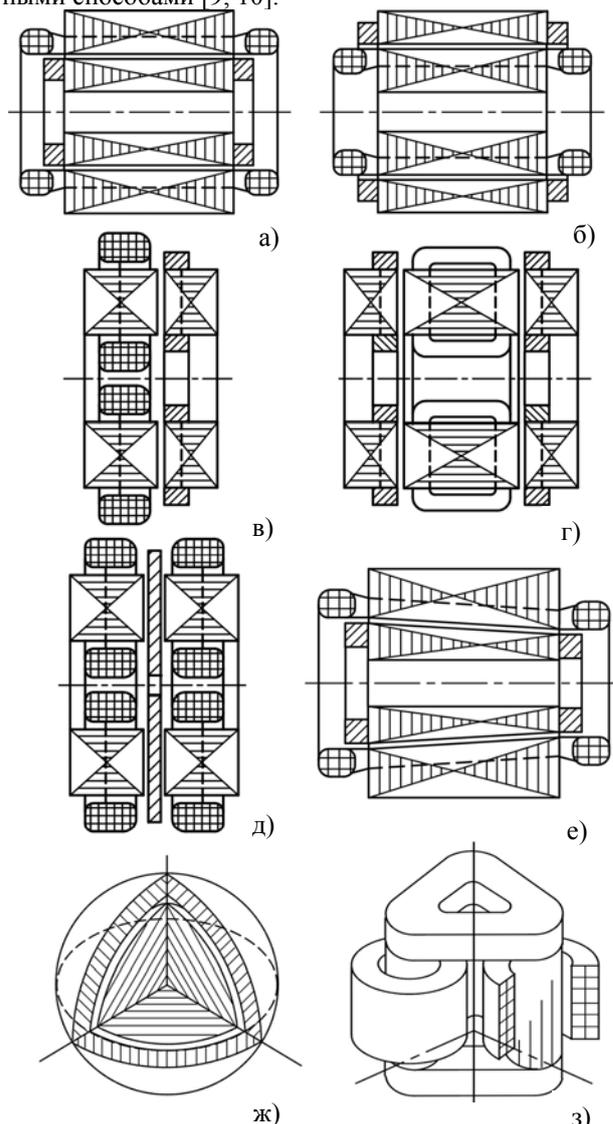


Рис. 2. Конструктивные схемы активной части вари... вращающихся (а – ж) и статической (з) электрических машин:

а – классическая; б – обращенная; в – торцевая; г – торцевая двухроторная; д – дисковая; е – коническая; ж – сферическая; з – пространственная аксиальная

В общем структурно-технологические возможности реализации конструкций и способов изготовления магнитопроводов электромагнитных преобразователей характеризуются рис. 4.

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУР И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В соответствии с разновидностями ОП (рис. 1) промышленных традиционных [11] и известных к настоящему времени нетрадиционных, например [3], структур ЭМС трансформаторов, возможны варианты образующих геометрических форм (рис. 5) средних длин витков катушек обмоток и сечений магнитопроводов.

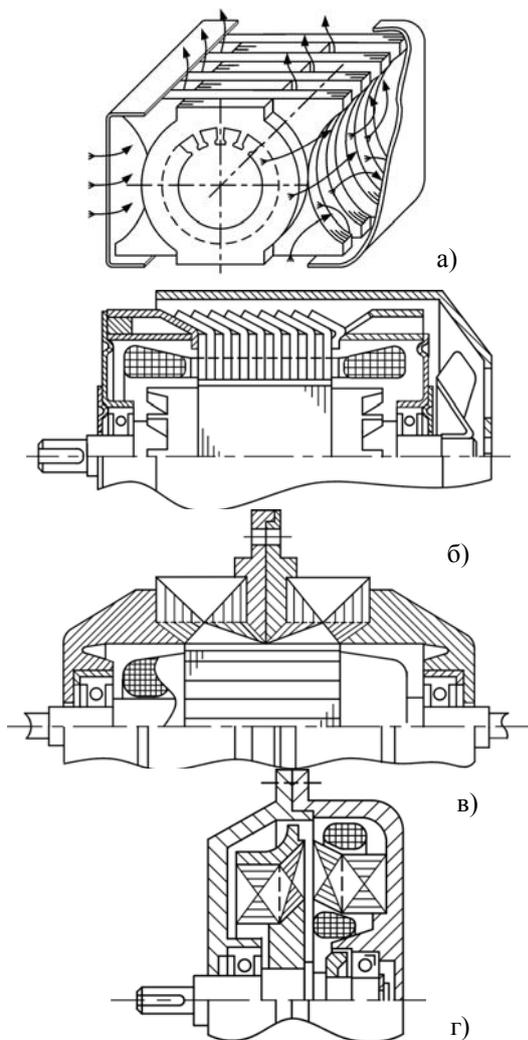


Рис. 3. Конструктивные схемы магнитопроводов и асинхронных двигателей нетрадиционной конструкции: а – тангенциальный магнитопровод статора с аксиально-тангенциальным обдувом; б – многоплоскостной магнитопровод статора; в – конусно-плоскостной магнитопровод ротора; г – конусно-цилиндрические магнитопроводы статора и ротора

Основу традиционных планарных и освоенных в производстве пространственных ЭМС составляют конструкторско-технологические решения "отходных" и "безотходных" магнитопроводов основывающиеся на способах штамповки-шихтовки или навивки ленты (рулона) ЭТС [11 – 13]. Также известны варианты технологии изготовления магнитопроводов, использующие способы опрессовки витых, штампованных или гофрированных заготовок и технологии прессовки ферромагнитного композиционного материала [3, 13]. В целом структурно-технологические возможности реализации перечисленных вариантов и способов характеризуются конструктивно-технологическими признаками представленными на рис. 6.

Наиболее приспособленными для использования традиционных технологий шихтовки являются планарные ЭМС и их основным преимуществом является возможность сборки магнитопровода из слоев ЭТС "впереплет", что снижает ток холостого хода и добавочные потери. В связи с этим, несмотря на магнитную асимметрию и повышенную (относительно пространственных систем) удельную материалоемкость,

в настоящее время основу структур многих трехфазных трансформаторов (ТТ) и реакторов составляют планарные ЭМС. Указанные системы на протяжении столетия конструктивно существенно не изменялись и практически достигли предела своего развития. Поэтому на основе освоения производства рулонной ЭТС во второй половине XX века некоторые фирмы (Броун Бовери – Швейцария, Телкон Магнетикс Корс – Англия ...) освоили производство ТТ с пространственными стыковыми и непрерывными витыми трехконтурными магнитопроводами [11, 12].

Известными преимуществами [12] стыковых пространственных ЭМС с "классическим" ступенчатым сечением стержней являются возможности снижения материалоемкости и потерь холостого хода ТТ на 9...10% за счет меньшего объема стали ярем в конструкции (рис. 2,3). Также, согласно [11], затраты связанные с повышенным на 50...90% током холостого хода, окупаются благодаря более высокой технологичности стыковой конструкции ЭМС по сравнению с планарной системой.

Известными преимуществами [12] пространственных ЭМС с витыми трехконтурными магнитопроводами является 5...7% снижение удельного объема ЭТС, а также снижение в 2...3 раза потерь и тока холостого хода при использовании текстурованной ЭТС с пониженными удельными потерями и повышенной индукцией насыщения.

Кроме указанных преимуществ, рассматриваемые в настоящей работе аксиальные пространственные ЭМС заключают в себе резервы повышения технического уровня на основе пятого и шестого способов [9] усовершенствования электромеханических устройств.

В работах [3, 14 – 18] представлено направление усовершенствования пространственных ЭМС на основе использования нетрадиционных структур магнитопроводов с параллельными ОП и обмоточными окнами постоянной ширины b_0 (рис. 7).

Подобные системы обеспечивают существенный выигрыш по стали и некоторый выигрыш по объему используемой меди относительно планарных и пространственных ЭМС малой и средней мощности с прямоугольными образующими конфигурации витков катушек и сечения стержней [17]. Однако сравнительный анализ известных пространственных ЭМС, выполненный в [18], показал, что выигрыш ЭМС с параллельными ОП относительно ЭМС с цилиндрическими ОП (рис. 2,3) снижается и по массе и основным потерям АЧ с медными обмотками составляет 2...8% и 1...7%. Из выполненных в [18] исследований также следует, что объем используемой меди в ЭМС (рис. 1,3) является минимальным относительно других систем со стыковыми пространственными магнитопроводами. Другими словами, в ЭМС (рис. 7) использование ЭТС лучше, а использование меди хуже, чем в ЭМС (рис. 2,3). При этом важным преимуществом пространственных систем с параллельными ОП является высокое использование активного объема (заполнение зоны, ограниченной на рис. 7 диаметрами $D_{ан}$ и $D_{ав}$) и пониженные габаритные размеры.

Другим направлением усовершенствования пространственных ЭМС является разработка технических решений АЧ в которых добавочные потери в технологических зазорах стыковых магнитопроводов или ос-

новые потери в дополнительных объемах стали трех магнитно-несвязанных контуров непрерывных витых магнитопроводов компенсируются снижением основных потерь и материалоемкости обмоток. Указанное направление заключается в использовании ЭМС с двух- и трехплоскостными ОП, то есть АЧ с граненой формой образующих сечения стержней и средней длины витков обмоток [15, 16].

Рис. 8 характеризует пространственную ЭМС с конфигурацией сечения стержней стыкового пространственного магнитопровода в виде равностороннего шестигранника $abcdef$. Данная конфигурация и конструкция обеспечивают ряд преимуществ АЧ (рис. 8) трансформаторов относительно известных планарных и пространственных аналогов [11 - 13]. Первым преимуществом является значительное снижение трудоемкости производства стержней на основе использования идентичных плоских прямоугольных пластин (листов) ЭТС при сборке пакетов стержней с ромбическим сечением $abco$. Второе преимущество заключается в снижении расхода и основных потерь ЭТС уменьшением объема ярем (относительно ЭМС на рис. 2, 3) в связи с наличием участков cd обмоточных окон с параллельными ОП. Третье преимущество обусловлено шестигранной конфигурацией стержня с максимально высоким заполнением ЭТС контура сечения стержня относительно всех "классических" вариантов [11 - 13]. В результате снижается расход обмоточного материала и основные потери в медиисходя из факта, что периметр равностороннего шестигранника $abcdef$ меньше длины описанной окружности стержня с радиусом ao , а контур средней длины витка обмотки (рис. 8) образован периметром равностороннего шестигранника $a'b'c'd'e'f'$ и меньше длины средней окружности обмотки эквивалентной ЭМС с цилиндрическими ОП.

Конструкция ЭМС на рис. 9 соответствует пространственной ЭМС с двухплоскостными ОП и непрерывными витыми элементами трехконтурного магнитопровода. Такая ЭМС отличается конфигурацией контуров сечения стержней и катушек обмоток в виде симметричных шестигранников $abcdef$ и $a'b'c'd'e'f'$. Это также обуславливает, как и в конструкции (рис. 8), возможность улучшения массогабаритных и энергетических характеристик.

Контур сечения стержня (рис. 9) обеспечиваются лентой (рулоном) с прямоугольным и клиновидным участками $jkmn$ и klm развертки (рис. 10,а).

Заданная форма сечения $abcf$ каждого контура достигается навивкой рулона ЭТС (рис. 10,а) с аксиальным смещением витков (рис. 10,б). Согласно [11, 12] современное оборудование позволяет наматывать контуры из ленты (рулона) изменяющейся ширины при безотходном раскрое.

Дополнительным преимуществом ЭМС с граненой формой катушек является наличие прямых участков витков.

Известно [12], что в обмотках и между обмотками и стержнями устанавливаются прошивные рейки для дистанционирования катушек обмотки и создания изоляционных промежутков, а также фиксации положения элементов и повышения жесткости ЭМС в це-

лом. Из [19] известно также, что остаточные деформации изгиба, которые возникают при намотке катушек с криволинейными образующими, приводят к значительному снижению жесткости, и как следствие, ослаблению электродинамической стойкости проводников обмоток. Исходя из изложенного, в конструкциях (рис. 8, рис. 9) деформации изгиба сосредоточатся в угловых зонах шестигранных образующих витков. В указанных зонах должны быть размещены прошивные рейки и другие крепления катушек, обеспечивающие заданную жесткость. При этом прямые участки витков катушек способствуют повышению электродинамической стойкости трансформаторов при переходных процессах.

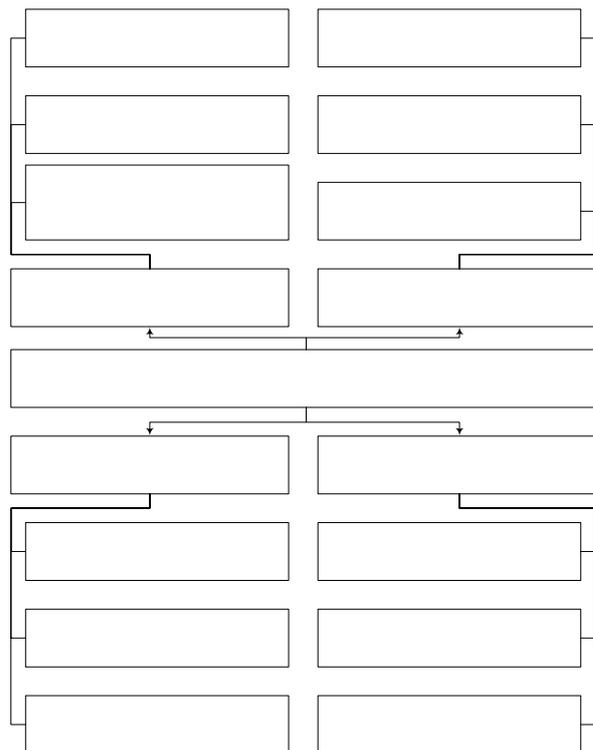


Рис. 4. Диаграмма классификации магнитопроводов электромеханических преобразователей по конструктивно-технологическим признакам



Рис. 5. Диаграмма классификации образующих геометрических форм катушек обмоток и сечения стержней магнитопроводов трансформаторов

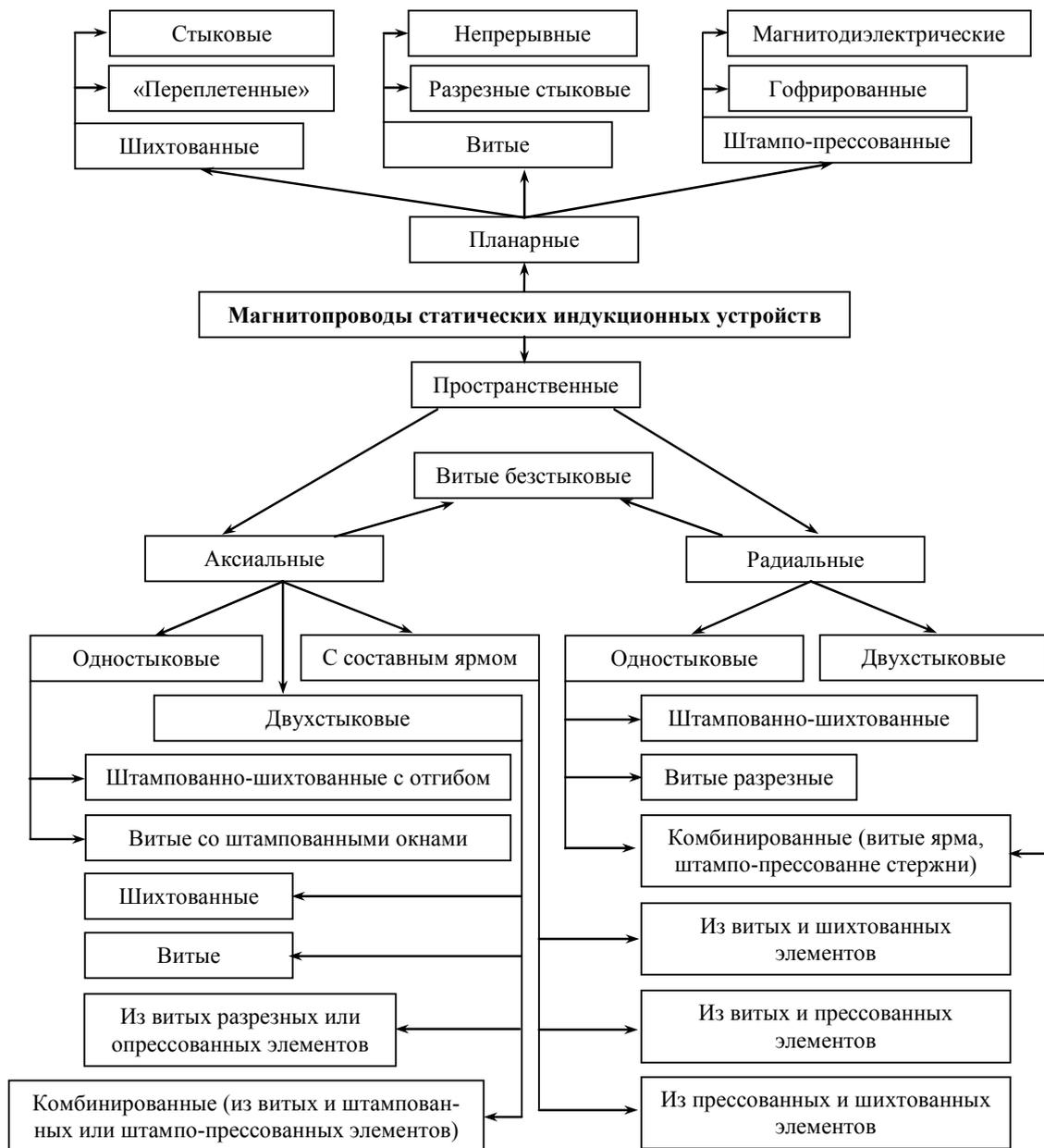


Рис. 6. Диаграмма классификации магнитопроводов статических индукционных устройств по конструктивно-технологическим признакам

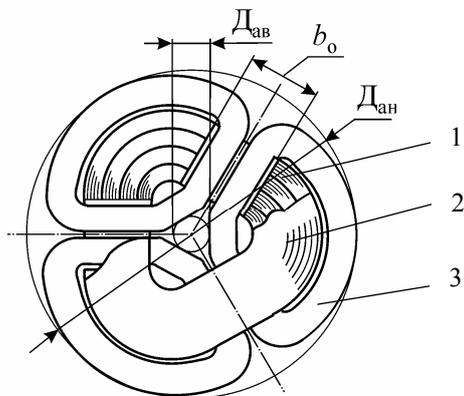


Рис. 7. Схема аксиальной стыковой пространственной электромагнитной системы с витым магнитопроводом и стержнями из разрезных кольцевых заготовок:
1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

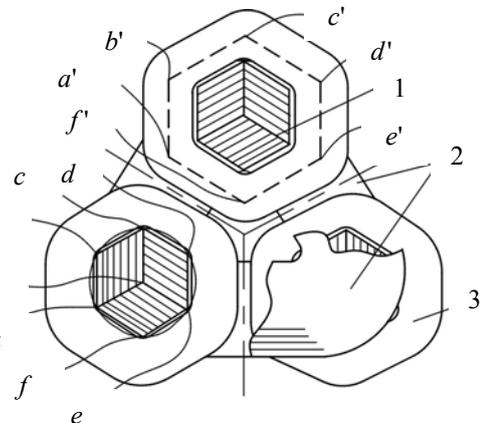


Рис. 8. Схема аксиальной стыковой пространственной электромагнитной системы с сечением стержней в виде равностороннего шестигранника:
1 – стержень 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

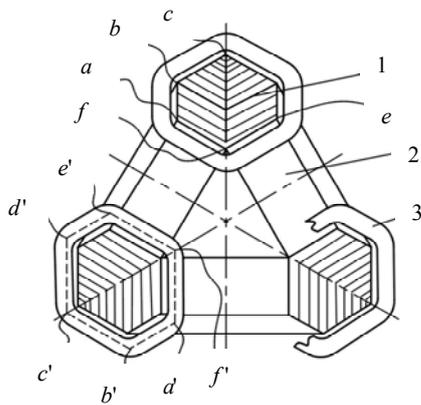


Рис. 9. Схема аксиальной пространственной электромагнитной системы с непрерывным витым трехконтурным магнитопроводом и образующими сечения стержней в виде симметричного шестигранника: 1 – стержень 2 – ядро; 3 – катушка обмотки

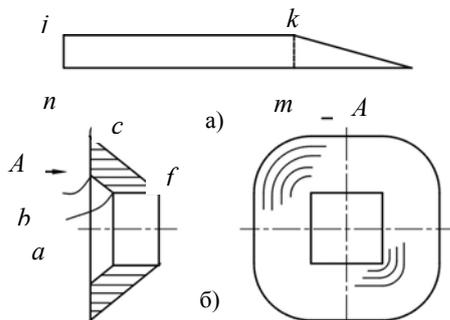


Рис. 10. Развертка ленты электротехнической стали (а) и элемент (б) трехконтурного магнитопровода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе систематизированы варианты структур ЭМС и магнитопроводов электромеханических и индукционных статических преобразователей, показаны нетрадиционные конструкторско-технологические решения пространственных магнитопроводов и ЭМС. Из представленных материалов следуют выводы.

1. На технико-экономические показатели и функциональные возможности электромеханических устройств существенное влияние оказывают структурные признаки ОП.

2. На основе выполненных разработок [5 - 10] можно заключить, что использование пространственной структуры магнитопроводов позволяет понизить удельную и технологическую материалоемкость вращающихся машин общепромышленного и специального назначения и улучшить их массогабаритные и виброакустические характеристики.

3. В связи с высокой компактностью разработка и применение ЭМС ТТ с параллельными ОП представляет особую актуальность для подвижных технических объектов, особенно в комплексах морского и авиационно-космического электрооборудования.

4. Представляется, что использование АЧ с двух- и трехплоскостными ОП является перспективным направлением усовершенствования трансформаторов как специального, так и силового назначения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
[2] Копылов И.П. Математическое моделирование электротехнических машин. – М.: Высш. школа., 2001. – 327 с.

[3] Ставинский А.А., Плахтырь О.О. Конструктивно-технологические особенности пространственных магнитопроводов трехфазных статических индукционных устройств мощностью до 10000 кВА // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ – Кременчук: КДПУ. – 2004. – Вип. 3(26). – С. 100–103.
[4] Яковлев А.И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью. – М.: Энергоатомиздат., 1989. – 240 с.
[5] Ставинский А.А. Нетрадиционные ресурсосберегающие конструкции асинхронных двигателей с классической технологией производства // Электротехника. – 1992.- №8, 9. – С. 11–14.
[6] Ставинский А.А. Особенности магнитопроводов асинхронных двигателей с конической структурой зубцов // Изв. РАН. Энергетика. – 1992. - №5. – С. 130–137.
[7] Ставинский А.А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоев стали статора // Электричество. – 1996.- №8. – С. 43–48.
[8] Ставинский А.А., Радченко Н.И., Радченко А.Н. Конструктивное и теплоаэродинамическое совершенствование статоров асинхронных бескорпусных двигателей //Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 54. – С. 49 – 53.
[9] Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – С. 57–61.
[10] Ставинский А.А. Проблема и нетрадиционные технические решения улучшения виброакустических характеристик асинхронных двигателей.// Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №4. – С. 81–85.
[11] Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
[12] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
[13] Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Сов. радио, 1971. – 720 с.
[14] 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.
[15] Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части// Електротехніка і електромеханіка. – 2005. - № 4. – С. 30–36.
[16] Ставинский Р.А. Рациональный подход к проектированию силовых трансформаторов// Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2006. – С. 202–210.
[17] Ставинський Р.А. Трифазні трансформатори з ефективним використанням конструктивного об'єму: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01/ Одеський нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2003.–20 с.
[18] Плахтир О.О. Удосконалення трифазних трансформаторів з просторовими магнітопроводами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01/ Одеський нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2005. – 24 с.
[19] 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.

Поступила 08.08.2007