

СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СИЛОВОМУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ АКТИВНОЙ ЧАСТИ

Ставинский А.А., д.т.н., проф., Ставинский Р.А., к.т.н., Плахтырь О.О.
 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.aip.mk.ua

Розглянуто напрямки і технічні рішення забезпечення показників електромагнітної сумісності та удосконалення спеціальних трансформаторів на основі просторової структури активної частини з паралельними твірними поверхнями обмоткових вікон та стержнів.

Рассмотрены направления и технические решения обеспечения показателей электромагнитной совместимости и усовершенствования специальных трансформаторов на основе пространственной структуры активной части с параллельными образующими поверхностями обмоточных окон и стержней.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика и необходимость дальнейшего усовершенствования систем силового электрооборудования требуют разработки и освоения производства специальных статических индукционных устройств (СИУ). К таким устройствам относятся трансформаторы, реакторы и дроссели компактного маломагнитного исполнения, также регулируемые (управляемые) подмагничиванием магнитопровода, а также трансформаторные системы преобразования числа фаз и подавления высших гармоник тока и напряжения.

Согласно [1, 2] электромагнитная совместимость стала в последнее время весьма значимым фактором и среди традиционных требований и характеристик (масса, габаритные размеры ...) электромагнитных систем (ЭМС) таких СИУ, как например, преобразовательные трехфазные трансформаторы (ТТ) [3], выделяются требования по уровню внешнего магнитного поля [4].

Важной современной проблемой систем электроснабжения с потребителями, содержащими полупроводниковые преобразователи, является кондуктивный аспект электромагнитной совместимости или качество электроэнергии [5]. Преобразователи генерируют в сеть высшие гармоники тока, что приводит к появлению гармоник напряжения и негативно отражается на функционировании остальных потребителей, в частности электродвигателей.

Целью работы является определение направлений, технических решений и постановка задач усовершенствования специальных трансформаторов маломагнитного и регулируемого исполнения, а также преобразовательного назначения.

ПРОБЛЕМА РАЗРАБОТКИ МАЛОМАГНИТНОГО МНОГОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Анализ возможности разработки маломагнитного ТТ выполнен в [2]. ТТ рассматривается как сосредоточенный источник магнитного поля, характеризуемый вектором магнитного момента (ММ). Основной вклад во внешнее поле вносят обмотки, ММ которых отображает степень магнитной симметрии магнитопровода. В связи с этим, разработка маломагнитных ТТ в рамках вариантов классической планарной ЭМС [6, 7] представляет собой сложную задачу и без дополнительного усложнения и удорожания конструкции, на-

пример системой компенсационных обмоток, не представляется возможной [2, 3]. Теоретически внешний ММ ТТ равен нулю в вариантах симметричной пространственной ЭМС [6, 7] с распределением магнитных потоков в пространстве и времени (рис. 1).

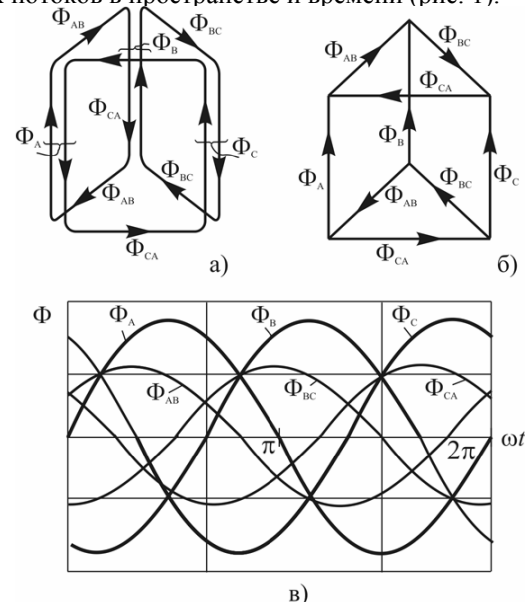


Рис. 1. Варианты симметричной аксиальной пространственной магнитной системы из магнитнонесвязанных контуров (а), а также со стержнями замкнутыми треугольником (б) и распределение магнитных потоков стержней и ярем во времени (в)

Однако при попытке разработки маломагнитного ТТ на основе симметричной ЭМС в виде трех магнитнонесвязанных контуров (рис. 1, а), согласно [2], установлено следующее. Компонента ММ в направлении оси обмоток близка к нулю и обусловлена технологическими отклонениями в ее изготовлении. При этом технологические отклонения Δ_{c1} , Δ_{c2} , Δ_{c3} , Δ_{o1} , Δ_{o2} , Δ_{o3} в расположении контуров магнитопровода и обмоток относительно осей симметрии (рис. 2) в пределах 1 % высоты обмоточного окна приводят к недопустимым радиальным компонентам ММ в направлениях, перпендикулярных осям обмоток. Результирующий ММ подобного ТТ отличен от нуля, а более

точное симметрирование элементов активной части (АЧ) с витыми магнитнонесвязанными контурами ЭМС (рис. 1, а) технологически весьма сложно.

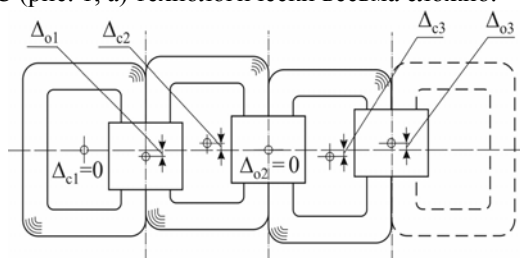


Рис. 2. Схема плоской развертки и возможные технологические погрешности несимметрии пространственной электромагнитной системы с магнитнонесвязанными контурами магнитопровода

В [8–10] представлено новое направление усовершенствования СИУ на основе симметричных ЭМС с вариантами нетрадиционных конструкций и конфигураций АЧ объединенных понятием параллельных образующих поверхностей (ОП) обмоточных окон и стержней. В пространственных магнитопроводах [6] традиционных конструкций (рис. 3, а и б) и в вариантах магнитопроводов [8–10] с параллельными ОП (рис. 3, в–е) расположение активных стыковых поверхностей стержней и ярем в одной плоскости обеспечивает возможность совместной шлифовки указанных поверхностей стержней (элементов всех стержней) и, как результат, идентичность высот стержней и минимально возможную величину собственно технологического зазора.

Рис. 4 демонстрирует технологические и конструктивные преимущества сборки стержней ЭМС (рис. 1, б) с параллельными ОП для совместной шлифовки их торцевых поверхностей. Первое преимущество заключается в повышенной монолитности сопряжения стержней в технологической сборочной единице (рис. 4, а) относительно сборочной единицы (рис. 4, б) с цилиндрическими ОП. Другим преимуществом является возможность вписывания в заданный технологический габарит стержней (рис. 4, а) с площадью сечения в 1,4...1,6 раза превышающей площадь сечения стержней (рис. 4, б). В связи с указанным фактом и высокой компактностью ($b'_{\text{мо}} < b_{\text{мо}}$), параллельность ОП обеспечивает возможность существенного повышения мощности СИУ в заданных габаритах, а также высокую степень симметрии положения стержней и обмоток в пространстве при сборке ЭМС с постановкой технологических калиброванных прокладок (КП на рис. 3, д) и удовлетворение требования маломagnetности.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время регулируемый коллекторный электропривод постоянного тока вытесняется частотно регулируемым асинхронным и синхронными вентильными электроприводами. Известные выпрямительно-преобразовательные агрегаты электромеханических систем регулируемого электропривода постоянного и переменного тока, электромеханических комплексов электрической тяги, а также электротехнологических процессов, например, сварочных, электролизных и металлургических производств, содержат преобразовательные трансформаторы (ПТ)

стержневой планарной магнитной системы. Трансформаторы агрегатов мощностью до 4000 кВт выполняются, как правило, по эквивалентным шестифазным, а мощностью свыше 4000 кВт – двенадцатифазным схемам [11]. При этом вторичные (вентильные) обмотки подразделяются на секции с соединением в «зигзаг» или в две «обратные звезды», связанные через однофазный уравнивающий реактор с ферромагнитным сердечником, а также «расщепляются» на четное число частей [11, 12]. Однако конструктивно-схемные решения ПТ с секционированными обмотками значительно повышают их типовую мощность S_m относительно мощности P_n нагрузки (в схеме «шестифазный зигзаг» $S_m = 1,42 \cdot P_n$, а в схеме с «обратными звездами» суммарная мощность ПТ и реактора $S_m + S_{\text{ур}} = 1,33 \cdot P_n$).

Особенностью тяговых и преобразовательных трансформаторов для электрического транспорта, металлургической и химической промышленности [11] является регулирование напряжения под нагрузкой. Регулирование напряжения на первичной или вторичной стороне ПТ осуществляется как дискретно-контактным способом встроенными механическими переключателями с токоограничивающими реакторами, так и плавно-ступенчато и плавно дополнительными автотрансформаторами и дросселями насыщения, а в полупроводниковых выпрямителях – силовыми транзисторами и тиристорами [11–13]. Устройства регулирования существенно усложняют электромеханические и электротехнологические системы, а силовые выпрямители являются основным источником высших гармоник тока и напряжения распределительных сетей.

Кроме того, существует необходимость преобразования трехфазного тока в двухфазный в различных устройствах преобразовательной техники, сварочных источниках питания и устройствах питания электрометаллургических печей [13, 14]. Также специальными ПТ с вращающимся магнитным полем двухфазный ток преобразуется в однофазный, и однофазный ток преобразуется в трехфазный ток [15].

Повышение технического уровня ПТ путем исключения разделения и расщепления вторичных фаз возможно на основе конструкторско-технологических решений симметричных пространственных ЭМС. Обеспечение компактности и снижение материалоемкости таких ЭМС может быть достигнуто использованием стержневых элементов с сечением, образованным средними участками сторон треугольника [16] способами навивки ленты или шихтовки идентичных пластин во взаимно пересекающихся плоскостях [17]. В указанных элементах могут быть предусмотрены центральные отверстия установки катушек обмотки регулирования напряжения (при необходимости) поперечным подмагничиванием [18].

Преобразование числа фаз первичной и вторичной обмоток в соотношении m_1/m_2 и повышение использования объема АЧ (приближение S_m к P_n) ПТ на основе пространственных ЭМС возможно тремя способами.

Первый способ заключается в использовании сдвига фаз магнитных потоков стержней и ярем трехстержневых ЭМС (рис. 1) на 30° и установки вторичных обмоток на ярямах при традиционном положении первичной обмотки на стержнях [19, 20] (рис. 5, рис. 6).

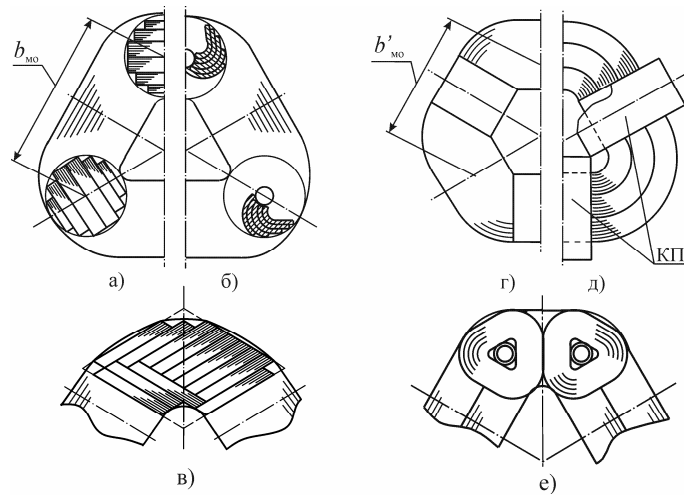


Рис. 3. Схемы пространственных стыковых магнитопроводов: а – стержни ступенчатого сечения из плоских слоев; б – стержни из эвольвентных слоев; в – стержни из идентичных плоских слоев; г, д – стержни из витых разрезных заготовок; е – стержни витые двухсекционные

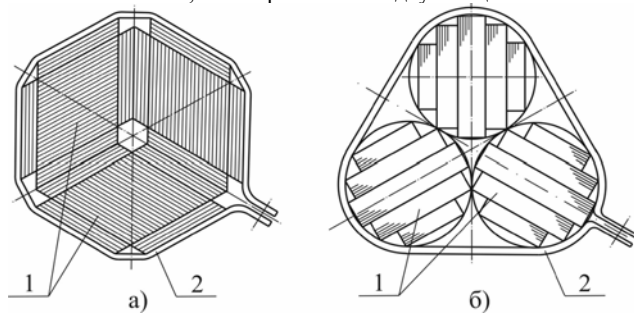


Рис. 4. Сборка для обработки торцевых поверхностей стержней пространственных магнитных систем с параллельными (а) и цилиндрическими (б) образующими поверхностями: 1 – стержень; 2 – крепежное приспособление (хомут)

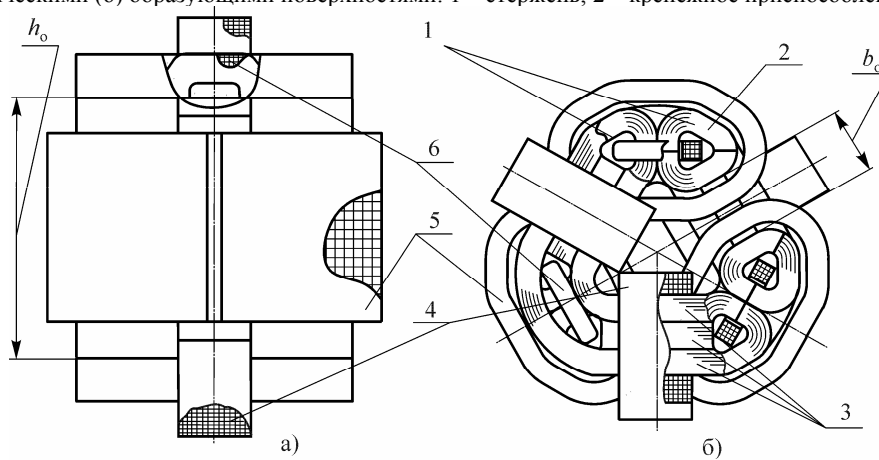


Рис. 5. Вид сбоку (а) и вид сверху (б) активной части трансформаторного преобразователя числа фаз с регулированием напряжения поперечным подмагничиванием: 1 – стержень; 2 – элемент стержня; 3 – составное ярмо; 4 – катушка нагрузочной обмотки; 5 – катушка сетевой обмотки; 6 – катушка обмотки управления

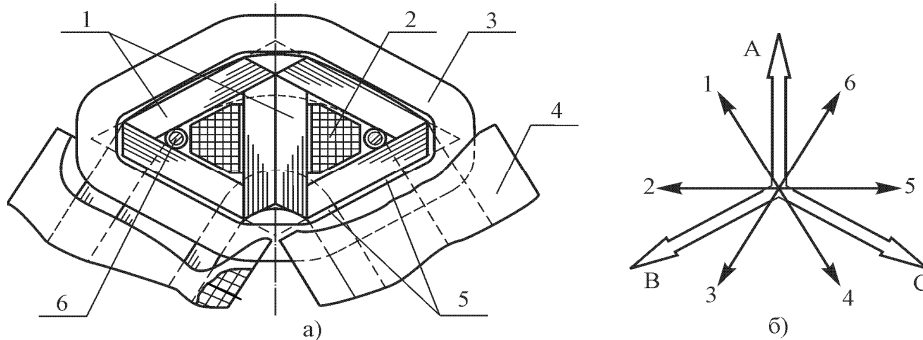


Рис. 6. Элемент активной части (а) и векторная диаграмма ЭДС (б) электромагнитной системы преобразования числа фаз с регулированием напряжения поперечным подмагничиванием: 1 – элемент стержня; 2 – катушка обмотки управления; 3 – катушка сетевой обмотки; 4 – катушка нагрузочной обмотки; 5 – элементы ярма; 6 – шпилька

ЭМС регулируемого ПТ (рис. 5) с аксиальным стыковым магнитопроводом соответствует конструктивной схеме (рис. 1, б). Элементы стержней ПТ малой и средней мощности могут быть выполнены витыми и разрезными (рис. 5, б). Каждое из составных ярем образуется из двух витых трехгранных контуров разделенных промежутком. В участках промежутков ярем над центральной частью стержней расположены «лобовые» участки катушек регулирования, а их «пазовые» части установлены в центральных отверстиях сопряженных элементов стержней. В участках промежутков ярем между «лобовыми» частями катушек регулирования устанавливаются дополнительные (средние) элементы ярем в виде пакетов идентичных прямоугольных пластин.

В регулируемых СИУ, в частности мощных реакторах с поперечным подмагничиванием, согласно [18], взамен витых используются шихтованные стержни прямоугольного сечения с участками замыкания потока подмагничивания вдоль и поперек слоев стали, причем на зону стержней с немагнитными зазорами между слоями приходится значительные части длин силовых линий управляющего поля. Рис. 6, а характеризует элемент ЭМС схемы (рис. 5, а) для регулируемого ПТ повышенной мощности. В данной ЭМС стержни собраны из идентичных прямоугольных листов стали шихтованных во взаимно пересекающихся плоскостях и сгруппированных в элементах с сечением в виде параллелограмма. Подобные элементы образуют средние и периферийные участки сечения стержня, а угловые зоны с изоляционными промежутками между листами сокращаются до 15...20 % длины силовых линий поля управления.

На рис. 6, б представлена векторная диаграмма ЭДС первичных ($m_1 = 3$) и вторичных ($m_2 = 6$) фаз силовых обмоток ЭМС (рис. 5, рис. 6, а). Векторы А, В, С соответствуют фазным ЭДС первичной (сетевой) обмотки, а векторы 1, 3, 5 и 2, 4, 6 отображают фазные ЭДС вторичной обмотки с катушками, расположенными, соответственно на «верхнем» и «нижнем» ярямах.

Особенностью ЭМС с установкой фазных катушек на ярямах является повышенный поток рассеяния, как следствие, повышенные наклон внешней характеристики и напряжение короткого замыкания ПТ [20]. Поэтому предпочтительной областью применения указанных ЭМС (рис. 5, рис. 6, а) являются электросварочные ПТ.

Поперечное подмагничивание магнитопроводов достигается сдвигом осей (плоскостей) катушек силовых обмоток относительно осей катушек обмотки управления на угол $\pi/2$. При этом в элементах магнитопровода действуют две ортогональные МДС обмоток рабочих и управления. Перпендикулярность осей обмоток практически исключает взаимную индуктивность, однако посредством изменения состояния ферромагнетика под действием двух МДС обеспечивается регулирование, практически по линейному закону, главных индуктивностей и взаимоиндуктивности силовых обмоток. Другим преимуществом поперечного подмагничивания является малая зависимость потерь ферромагнетика от интенсивности поля управления [18].

Второй способ преобразования числа фаз в пространственной ЭМС заключается в установке между стержнями трех фаз первичной (сетевой) обмотки дополнительных (промежуточных) стержней и использо-

вании магнитнонесвязанных контуров по типу (рис. 1, а). Идентичные катушки шести фаз вторичной (нагрузочной) обмотки устанавливаются симметрично по окружности на трех "промежуточных" стержнях и трех "сетевых" стержнях. Катушки первичной обмотки охватывают катушки вторичной обмотки "сетевых" стержней (рис. 7, а). Ярма, как и стержни, выполнены в виде пакетов, шихтованных из идентичных пластин и обеспечивают взаимную магнитную связь смежных пар стержней (рис. 7, а). В случае отсутствия необходимости регулирования напряжения ПТ подмагничиванием постоянным током используется система замкнутых стержней по типу (рис. 1, б). При этом стержни выполняются из идентичных пластин шихтованными во взаимно пересекающихся плоскостях [17], а ярма могут быть витыми (рис. 7, б). В подобных технических решениях ЭМС ПТ магнитные потоки и ЭДС 1, 3, 5 катушек вторичных фаз "сетевых" стержней направлены встречно магнитным потокам и ЭДС 2, 4, 6 промежуточных стержней (рис. 7, в), а магнитный поток рассеяния и соответствующие индуктивности снижаются относительно ЭМС (рис. 5, а).

При установке на шихтованных элементах ярма (рис. 7, а) или участках ярма между стержнями (рис. 7, б) дополнительных катушек их ЭДС, совместно с ЭДС нагрузочных стержневых катушек, образует (при $m_1=3$) $m_2=12$ – фазную систему.

Третий способ преобразования числа фаз в пространственной ЭМС заключается в использовании вращающегося магнитного поля и Z – стержневого аксиального магнитопровода (рис. 8, а) с витыми ярями. Поле с числом полюсов $2p = 2$ создается первичными и индуцированными вторичными токами сосредоточенных катушек или распределенных катушечных групп сетевой и нагрузочной обмоток. Стержни могут быть шихтованными (рис. 7, б) или выполненными способом [21] навивки и разрезки кольцевой заготовки (рис. 8, б). Кроме того, стержни могут быть выполнены способом [22] навивки и разрезки или опрессовки эквидистантных кольцевых заготовок (рис. 8, в), а также способом [23] штамповки выемок при намотке ленточного сердечника.

Соединение сосредоточенных первичных катушек с $Z = 6$, $p = 1$ и $q = 1$ по схеме двухслойной сетевой обмотки (рис. 9) создает при $m_1=3$ вращающуюся МДС с обмоточным коэффициентом k_w , равным коэффициенту укорочения шага на треть периода поля ($k_w = 0,5$). При этом каждая вторичная сосредоточенная катушка представляет фазу $m_2 = 6$ – фазной нагрузочной обмотки.

При установке на стержни ЭМС (рис. 8, а) катушек сетевой обмотки с $p = 1$, $m_1 = 3$ и $q_1 = 2$, катушки нагрузочной обмотки можно включить по схеме с $p = 1$, $m_2 = 2$ и $q_2 = 3$ ($Z = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2p \cdot m_2 \cdot q_2 = 12$) и получить преобразование числа фаз $m_1/m_2 = 3/2$. Указанный ПТ отличается независимой от нагрузки или наличия нулевого провода полной практической симметрией ЭДС фаз первичных и вторичных обмоток, что является весьма значимым преимуществом по сравнению с вариантами планарных ЭМС преобразования числа фаз $m_1/m_2 = 3/2$ которые, согласно [14], представляют для сети несимметричную нагрузку.

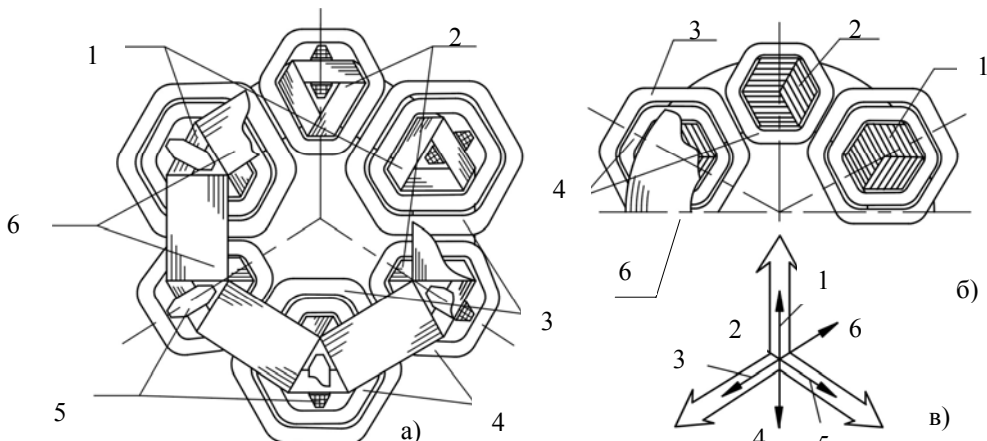


Рис. 7. Схемы (вид сверху) активной части (а, б) и векторная диаграмма фазных ЭДС (в) трансформаторного преобразователя числа фаз:

1 – сетевой стержень; 2 – промежуточный стержень; 3 – катушка сетевой обмотки; 4 – катушка нагрузочной обмотки; 5 – катушка обмотки управления; 6 – ярмо

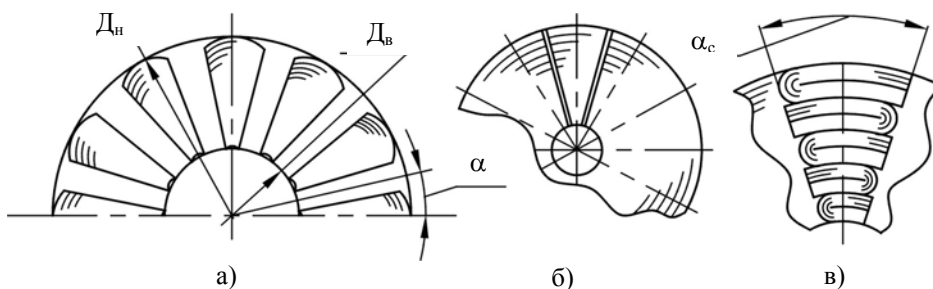


Рис. 8. Аксиальный стыковой магнитопровод (а) со стержнями из витой разрезной заготовки (б) или коаксиальных разрезных опрессованных элементов (в)

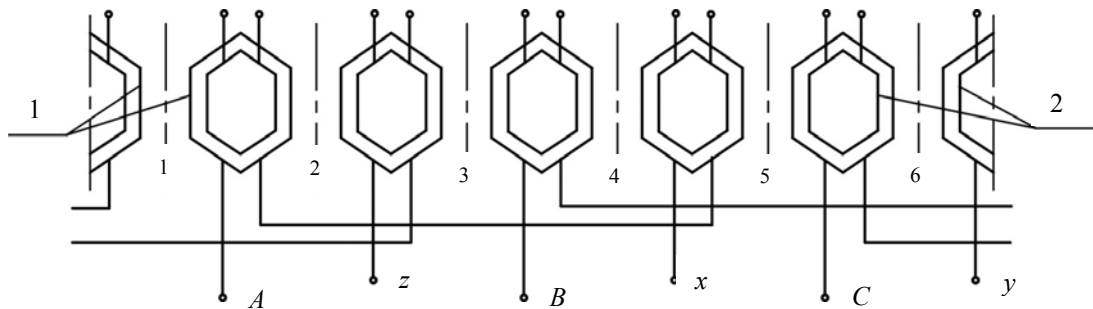


Рис. 9. Схема соединений катушек (1) сетевой обмотки и расположение катушек (2) нагрузочной обмотки шестистержневой системы преобразования числа фаз $m_1/m_2 = 3/6$

При выборе варианта конструктивно-технологического решения ЭМС (рис. 5 – рис. 9) необходимо учитывать как назначение и диапазон мощности, так и ожидаемые технико-экономические показатели. Решение задачи повышения технического уровня ПТ и других СИУ возможно на основе системного сравнительного анализа (структурной оптимизации) ЭМС. Представленный в [8, 9] метод анализа обеспечивает возможность сопоставления ЭМС при использовании специальных целевых функций и математических моделей геометрической оптимизации, а также количественных показателей технического уровня и вспомогательных признаков совершенства конструкции магнитопровода. В указанных моделях целевые функции отображаются произведением двух сомножителей. Первый сомножитель является коэффициентом $k_{ид}$ исходных данных и электромагнитных нагрузок. Второй сомножитель представляет из себя относительный коэффициент $k_{цфи}$ изменения i -го показателя технического уровня от универсальных (для любого варианта симметричной про-

странственной аксиальной или радиальной ЭМС) геометрических управляемых переменных

$$F_{цф} = k_{ид}(S_n, U_1, U_2, B_c, f, j_{01}, j_{02}, k_{30})k_{цфи}(\lambda_o, a_m, \alpha_c).$$

Коэффициент $k_{ид}$ отображает номинальную мощность S_n , первичное (вторичное) напряжение $U_{1(2)}$, среднюю индукцию B_c стержня, плотность тока $j_{01(2)}$ первичной (вторичной) обмоток и коэффициент k_{30} заполнения обмоточного окна проводящим материалом. В качестве переменных приняты: отношение λ_o высоты h_o и ширины b_o обмоточного окна (рис. 5), отношение a_m диаметров D_n и D_b описанных контурных или фактических окружностей магнитопровода (рис. 8, а), а также центральный угол стержня α_c (рис. 8, в). Второй сомножитель (коэффициент) $k_{цфи}$ обеспечивает сравнительный анализ и возможность безусловной геометрической оптимизации ЭМС [8, 9], а также совместно с первым сомножителем позволяет выполнить поэтапную параметрическую оптимизацию СИУ.

ТРАНСФОРМАТОРЫ С ОСЛАБЛЕНИЕМ ГАРМОНИК ТОКА НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Задача обеспечения требования по качеству электроэнергии в части гармонического состава является достаточно сложной [1, 5]. Конечные и промежуточные участки систем электроснабжения с потребителями в виде полупроводниковых преобразователей должны содержать элементы, ограничивающие искажение формы кривой тока нелинейной нагрузкой электроэнергетической системы. В качестве указанных элементов используются устройства подавления высших гармоник (УПВГ) трехфазной нелинейной нагрузки. Известные способы снижения высших гармоник тока подразделяются на активные и пассивные и реализуются в комплектных трехфазных электрических аппаратах – фильтрокомпенсирующих устройствах [24, 25]. Как активные, так и пассивные фильтры содержат металлоемкие и габаритные аппараты – дорогостоящие емкостные блоки и управляемые или неуправляемые дроссели (реакторы). Активные и комбинированные УПВГ отличаются от пассивных наличием компонент и системных блоков силовой электроники [25], часто связанных с "пассивными" компонентами согласующими ТТ. Указанные компоненты предназначены для устранения известного комплекса недостатков пассивных УПВГ [24, 25]. Однако, согласно например [12], наличие "активных" электронно-полупроводниковых компонент обуславливает дополнительное существенное усложнение и, соответственно, удорожание и снижение надежности УПВГ.

Отдельную проблему создает однофазная выпря-

мительная нагрузка которая, в связи с массивностью, генерирует в трехфазную сеть 3-ю и кратные ей гармоники тока [12].

В соответствии с [11, 12] специальные трансформаторы позволяют подавлять высшие гармоники тока на основе повышения фазности и исходя из принципа сдвига ЭДС расщепленных фаз расположением фазных секций вторичных обмоток на различных стержнях ТТ или специальных схем включения фазных секций в двух или нескольких ТТ.

В дополнение к указанным "трансформаторным" способам обеспечения кондуктивной совместимости, в настоящей работе формулируется принцип тангенциального смещения (по координате α , рис. 8, а) высших гармоник МДС и магнитного поля в секциях стыковых магнитопроводов специальных ТТ и ПТ. Данному принципу соответствует разделение симметричной пространственной ЭМС с $m_{1(2)} \geq 2$ на секции и сдвиг секций на заданный угол $\gamma_{см}$ (рис. 10, а) с целью практического исключения трансформации заданной (доминирующей) высшей гармоники в сеть и ослабления остальных высших гармоник разложения функции тока нагрузки в ряд Фурье. Тангенциальное смещение гармоник МДС и поля реализуется разделением магнитопровода по стержням и соответственно разделением катушек первичной и вторичной обмоток на симметричные секции, а также поворотом автономных секций (блоков) ЭМС по координате α на половину периода гармоники поля, соответствующей подавляемой гармоники тока.

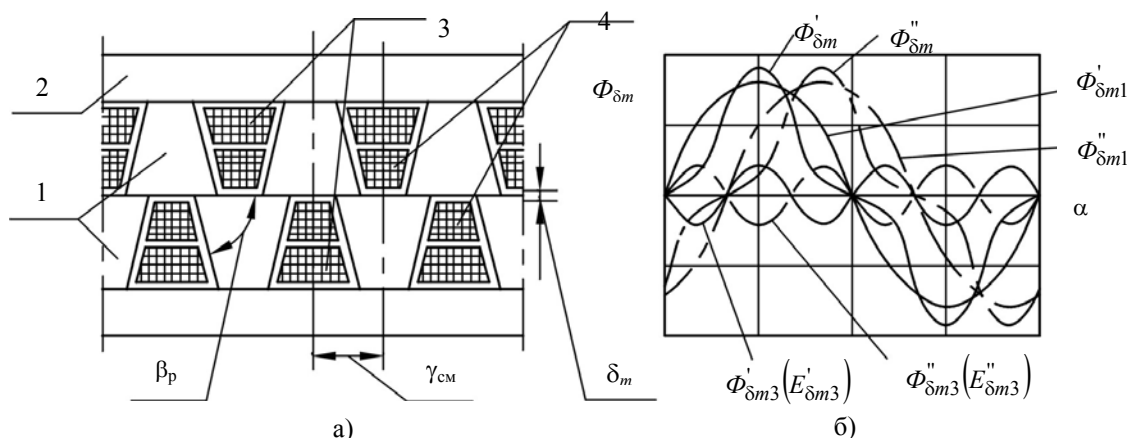


Рис. 10. Схема развертки электромагнитной системы (а) и распределение гармонических составляющих главного магнитного поля (б) в зоне стыкового зазора δ_m трансформатора с подавлением третьей гармоники тока нагрузки:

1 – стержневые участки секций; 2 – ярмо; 3 – секция сетевой обмотки; 4 – секция нагрузочной обмотки

Для подавления третьей гармоники тока однофазной выпрямительной нагрузки секции ЭМС с параллельными ОП и трехстержневым пространственным магнитопроводом выполняются с периферийными контурами в виде окружностей и поворачиваются на $\gamma_{см} = \pi/3$. При этом ЭДС $E'_{\delta m3}$ и $E''_{\delta m3}$ от третьих гармоник потока $\Phi'_{\delta m}$ и $\Phi''_{\delta m}$ двух секций ЭМС разделенных стыковым технологическим зазором δ_m (рис. 10, а) взаимно компенсируются (рис. 10, б).

Для изготовления варианта магнитопровода (рис. 10, а) может быть использован, например способ [21], с наклонной разрезкой (под углом β_p) заготовки стержней (рис. 8, б).

Аналогично для подавления, например пятой

(седьмой) гармоники нелинейной нагрузки, секции специального трансформатора с круглыми периферийными контурами и параллельными ОП магнитопровода, должны быть повернуты (с регулировкой точности установки угла поворота в преобразовательном агрегате) соответственно на угол $\gamma_{см} = \pi/5(7)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показаны нетрадиционные направления и способы усовершенствования специальных трансформаторов и других СИУ с $m_{1(2)} \geq 2$. Представляется, что предлагаемые конструкторско-технологические решения АЧ будут способствовать решению комплексной проблемы обеспечения электромагнитной совместимости и повышения технического уровня силового

электрооборудования на основе системного анализа устройств преобразовательной техники и структурной оптимизации СИУ специального назначения. На основе представленных материалов можно обозначить следующие выводы.

1. Для разработки многофазных трансформаторов маломощного исполнения без компенсационных обмоток и с улучшенными массогабаритными показателями необходимо использовать аксиальную пространственную ЭМС с параллельными ОП и варианты стыковых магнитопроводов.

2. Снижение материалоемкости и габаритных размеров регулируемых ТТ и ПТ, а также трансформаторных преобразователей числа фаз возможно на основе использования пространственной структуры АЧ и вращающегося магнитного поля в аксиальных ЭМС.

3. Для возможности обоснования выбора варианта ЭМС специального (маломощного, сварочного или преобразовательного) многофазного трансформатора, необходим комплекс исследований на основе метода коэффициентов исходных данных и относительных коэффициентов структурно-геометрической оптимизации [8, 9].

4. Замена в статическом регулируемом выпрямительном агрегате вентильного регулирования на глубокое регулирование магнитного потока (вторичных ЭДС) поперечным подмагничиванием магнитопровода ПТ, а также использование в групповом ТТ питания преобразовательной и однофазной нагрузки, или блочном ПТ секционированной ЭМС с тангенциальным смещением секций, обеспечит существенное ослабление искажения формы кривых тока и напряжения нелинейной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К. и др.; Под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
- [2] Анализ типичных ошибок проектирования трансформаторов в маломощном исполнении / В.С. Луников, А.Г. Середя, И.В. Крюкова и др. // Электротехника і електромеханіка. – 2004. – №2 – с. 26 – 33.
- [3] Ногин И.С., Шахрай Д.М., Внешнее магнитное поле трехфазного бронированного группового преобразовательного трансформатора с компенсационными обмотками // Тр. всесоюз. науч.-исслед. ин-та электромеханики. Т. 66. Вентильные преобразователи и машинно-вентильные системы. – М.: 1981. – с. 71 – 76.
- [4] ДСТУ 2465 – 94. Сумісність технічних засобів електромагніта. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с.
- [5] Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 257 с.
- [6] Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
- [7] Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
- [8] Ставинский А.А., Плахтыр 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.
- [9] Stavinsky A., Plakhtyr O., Stavinsky R. Increase of limited power and structural optimization of static induction devices with spatial magnetic cores // Proceedings of the 6-th international conference UEES'04 on unconventional electrical and electrical systems 24–29 September, 2004, Alushta, Ukraine, Vol. 2, Poland: Szczecin. – 2004, pp. 411–414.
- [10] Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Плахтыр О.О. Результаты исследования и технические решения улучшения распределения магнитного поля в пространственных стыковых магнитопроводах трехфазных статических индукционных устройств // Электротехніка і електромеханіка: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 62. – с. 117 – 121.
- [11] Фишлер Я.Л., Урманов Р.Н. Преобразовательные трансформаторы. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.
- [12] Волков И.В., Пентегов И.В., Ларченко Б.Б. Пути улучшения качества электроэнергии в корабельных и береговых электрических сетях и электроустановках // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК. – 2004. – №3(396). – с. 60 – 70.
- [13] Сравнительный анализ спектральных и коммутационных характеристик двухфазной и трехфазной схемы частотно-регулируемого электропривода / Хворост Н.В., Чумак В.В. Гончаров Ю.П. и др. // Весник НТУ "ХПІ" "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика", вып. 10, т. 2. – Харьков: 2003. – с. 460 – 464.
- [14] Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов // Электротехніка і електромеханіка. – 2004. – №3. – с. 49 – 55.
- [15] Григораш О.В., Кабанков Ю.А. К вопросу применения трансформаторов с вращающимся магнитным полем в составе преобразователей электроэнергии // Электротехніка. – 2002. – №3. с. 22 – 26.
- [16] Просторова электромагнитная система: Патент 52271. Україна, МКВ Н01F 27/28, Н01F27/24 / А.А. Ставинський, О.О. Плахтир, Р.А. Ставинський (Україна). – №2002042582; Заявл. 02.04.02; Опубл. 17.01.05, Бюл. №1. – 3 с.
- [17] Просторова магнітна система: Патент 51438. Україна, МКВ Н01F 27/24, Н01F 27/28 / А.А. Ставинський, О.О. Плахтир, Р.А. Ставинський (Україна). – №2002042584; Заявл. 02.04.2002; Опубл. 15.02.05, Бюл. №2. – 3 с.
- [18] Дорожко Л.И., Либкинд М.С. Реакторы с поперечным подмагничиванием. – М.: Энергия, 1977. – 176 с.
- [19] Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
- [20] Трехфазные трансформаторы с пространственным сердечником и разнесенными обмотками / М.И. Козлов, В.Л. Гершенкрой, Н.И. Гордиенко и др. // Электричество. – 1986. – №4. – с. 54 – 55.
- [21] Способ изготовления зубчатого магнитопровода торцевой электрической машины: А.с. 788274 СССР, МКИ Н02К1/06/ А.А. Ставинский, А.Д. Сильченко (СССР). – №3768900/24-07; Заявлено 20.07.84; Опубл. 15.01.89. Бюл. №2. – 5 с.
- [22] Просторова магнітна система: патент 51437. Україна, МКВ Н01F27/24, Н01F27/26/ А.А. Ставинський, В.І. Крайнюк, Р.А. Ставинський и др. – №2002042583; Заявл. 02.04.02; Опубл. 17.01.05, Бюл. №1. – 2 с.
- [23] Ставинский Р.А. Варианты способов изготовления витых пространственных магнитопроводов с параллельными стенками обмоточных окон для трехфазных трансформаторов и дросселей // Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ. – 2003. – № 1 – с. 92 – 96.
- [24] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор)//Электротехніка. – 1998. - №3. - с. 10 – 17.
- [25] Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники//Электротехніка. – 1999. – № 4. – с. 28 – 32.

Поступила 25.08.2005