

## ГЕНЕЗИС СТРУКТУР И ПРЕДПОСЫЛКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ КОНТУРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ (ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И СИСТЕМЫ СО СТЫКОВЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ)

*Розглянуто результати і перспективи подальшої еволюції, особливості та способи забезпечення електродинамічної стійкості електромагнітних систем трансформаторів і реакторів, а також наведено приклади структурного перетворення просторової аксіальної системи з стрічково-пластинчатим стиковим магнітопроводом на основі багатоплощинних твірних поверхонь стрижнів і обмоткових вікон.*

*Рассмотрены результаты и перспективы дальнейшей эволюции, особенности и способы обеспечения электродинамической устойчивости электромагнитных систем трансформаторов и реакторов, а также представлены примеры структурного преобразования пространственной аксиальной системы с ленточно-пластинчатым стыковым магнитопроводом на основе многоплоскостных образующих поверхностей стержней и обмоточных окон.*

### ВВЕДЕНИЕ

Развитием теории и практикой производства определены различные структурные схемы магнитопроводов и электромагнитных систем (ЭМС) трансформаторов и реакторов [1-8]. По взаимному расположению осей стержней и ярем магнитопроводы, а по расположению осей витков обмоток и элементов магнитопроводов в пространстве, структуры ЭМС в целом, подразделяются на планарные (плоские) и пространственные. В планарных и пространственных симметричных ЭМС элементы активной части установлены на равных расстояниях относительно центральной оси и оси этих элементов расположены соответственно в одной плоскости и в нескольких плоскостях повернутых друг относительно друга. Также известно использование планарных и пространственных несимметричных ЭМС [2-4], а магнитопроводы подразделяются на стержневые, броневаемые и бронестержневые [2-8]. Их конструктивно-технологические особенности существенно влияют на технический уровень указанных выше индукционных статических устройств (ИСУ). Согласно, например [9], эволюция электромеханических устройств в конце XX века "приостановлена". В связи с особой важностью и актуальностью повышения технического уровня ИСУ как главных элементов систем распределения энергии, необходимы новые нетрадиционные подходы [9, 10] к решению задач их дальнейшего развития.

Целью работы является анализ особенностей и оценка возможности совершенствования различных структур ЭМС на основе нетрадиционных конфигураций магнитопроводов и катушек обмоток. Целью настоящей первой части работы является рассмотрение эволюции, предпосылок совершенствования и возможностей структурного преобразования активной части на примере вариантов аксиальной ЭМС с комбинированными стыковыми магнитопроводами.

### КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТРУКТУР СТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Исходным устройством практического использования явления электромагнитной индукции и прототипом для дальнейшего совершенствования явилась планарная ЭМС однофазного трансформатора с замкнутым стержневым магнитопроводом из изолирован-

ных стальных колец или витков проволоки. Такая ЭМС изобретена в Англии Д. Гопкинсом и Э. Гопкинсом в 1884 г. и использована для разработки М. Дери, Б. Блати и К. Циперновским (Венгрия) в 1885 г. и последующего первого промышленного производства однофазных трансформаторов. Указанные разработки представляли планарные стержневую (рис. 1,а) и броневую (рис. 1,б), а также пространственную тороидальную (рис. 1,в) структуры. Их развитием стали ЭМС планарной (рис. 1,г) и пространственных конфигураций (рис. 1,д и е) с многоконтурными элементами магнитопроводов [1-8].

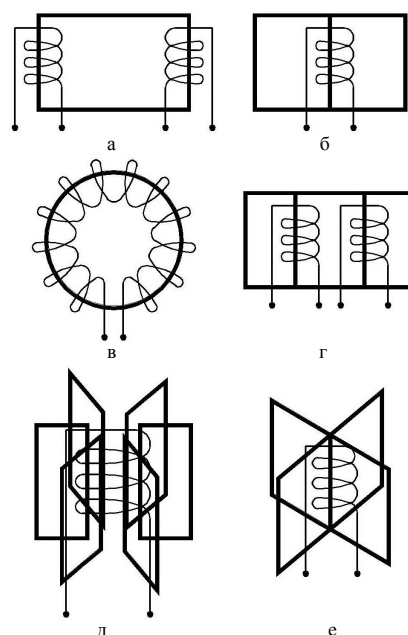


Рис. 1. Структурные схемы симметричных планарных (а, б, г) и пространственных (в, д, е) однофазных электромагнитных систем

Технологическую революцию конца XIX и начала XX веков обеспечили изобретения в 1889 году М.О. Доливо-Добровольским (Россия) трехфазной системы тока и трехфазного трансформатора на основе симметричных пространственных радиальной (рис.2,а) и аксиальных (рис. 2,б и в) ЭМС. Эти структуры М.О. Доливо-Добровольский дополнил в 1891 году несимметричной (в электромагнитном отноше-

нии) планарной ЭМС (рис. 2,г) которая стала основной и достаточно востребованной при разработках ИСУ на протяжении всего XX века [1-8].

В первой половине XX века в США и Франции появились разработки ИСУ соответствующие структурам планарных однофазной бронестержневой (рис.1,г) и трехфазных бронестержневой (рис. 2,д) и броневой (рис. 2,е) ЭМС (фирмы Вестингауз и Жемон), а в середине этого века была предложена однофазная ЭМС схемы (рис. 1,е) с пространственным магнитопроводом, содержащим четырехконтурные ярма [3, 4]. Согласно [3], на основе ЭМС (рис. 1,е) созданы лучшие (в то время) по удельным показателям материалоемкости и потерь однофазные трансформаторы мощностью 100 МВ·А и 133 МВ·А (фирмы Броун-Бовери, Швейцария и Электромеханик Броун-Бовери, Франция). В результате освоения производства холоднокатаной рулонной электротехнической стали (ЭТС) было организовано производство однофазных и трехфазных ИСУ малой мощности с использованием структурных схем (рис. 1, а-д) и (рис.3,а и б) и витых магнитопроводов [2, 4].

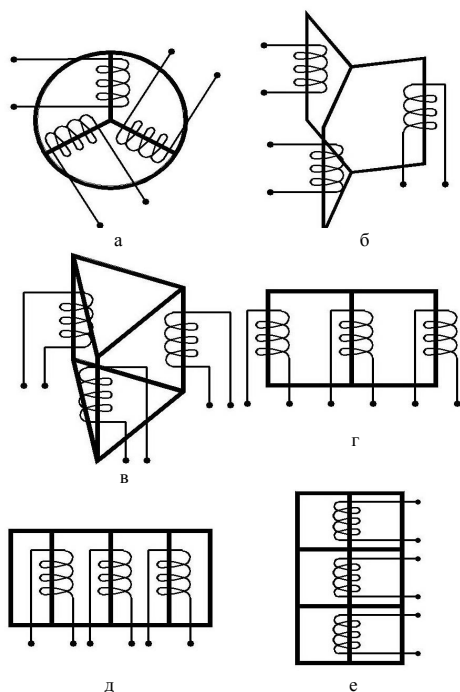


Рис. 2. Структурные схемы пространственных (а-в) и планарных (г-е) трехфазных электромагнитных систем на трехфазных магнитопроводах

В начале второй половины XX века впервые фирмами Броун-Бовери и Телкон магнетик корс (Англия) [3, 4], а затем и другими фирмами, в том числе на Армэлектрзаводе (Армения) и Минском электротехническом заводе (Беларусь) [7] разработаны симметричные пространственные комбинированные стыковые (стержни из листов, ярма витые), а также витые с двухконтурными фазными элементами магнитопроводы. На их основе созданы ЭМС структурных схем (рис. 2,в и рис. 3,в), в частности трансформаторов мощностью соответственно до 1000 и 300 КВ·А [6]. Согласно [4-7] трехфазные пространственные ЭМС отличаются от планарных ЭМС меньшими потерями холостого хода и материалоемкостью по ЭТС и конструкционной стали.

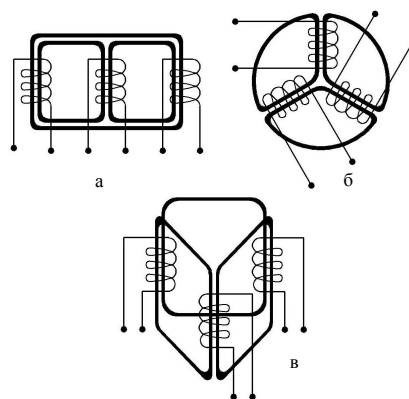


Рис 3. Структурные схемы планарной (а) и пространственных (б, в) трехфазных электромагнитных систем на трехфазных магнитопроводах с двухконтурными фазными элементами

В целом особенности различных структур ЭМС ИСУ можно охарактеризовать классификационными признаками образующих поверхностей (ОП) стержней и обмоточных окон [11]. Общей особенностью всех существующих планарных и пространственных ЭМС ИСУ [1-8] являются "традиционные" конфигурации стержней образованных плоскими, цилиндрическими круговыми или эллиптическими ОП.

Плоские параллельные и взаимно перпендикулярные ОП планарных ЭМС массового выпуска обеспечивают низкую трудоемкость производства шихтованных "впереплет" и витых магнитопроводов на основе фактора идентичности ширины слоев ЭТС в сечении стержня, но создают прямоугольную форму витков катушек обмоток. Прямоугольная форма повышает среднюю длину витка, снижает механическую прочность обмотки при коротком замыкании и снижает прочность витковой изоляции при малом радиусе прямоугольного изгиба проводника [6]. Круговая или эллиптическая формы витков катушек ЭМС уменьшают среднюю длину витка, но значительно усложняют и удорожают технологию производства магнитопроводов необходимостью секционирования сечений стержней с изменением ширины секций (пакетов) ЭТС исходя из условия вписывания в криволинейные образующие контуры (ОК).

Относительно высокая дислокация ЭТС в контуре минимальной длины витка обмотки с коэффициентом заполнения ОК сечения стержня в виде окружности  $K_{KO} = 0,927...0,93$  достигается установкой 14-16 секций (пакетов) ЭТС различной ширины в одной половине окружности [4, 6]. При этом теоретически и экспериментально установлено, что кольцевой изгиб проводников при намотке круговых витков катушек приводит к резкому снижению электродинамической устойчивости (ЭДУ) ИСУ [12-14].

#### ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ПРЕДПОСЫЛКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МНОГОГРАННЫХ КОНТУРОВ КАТУШЕК ОБМОТОК

В процессе намотки круговых или эллиптических витков катушек обмоток ИСУ средней и большой мощности возникают деформации начального изгиба  $\epsilon_i$  (рис. 4,а) которые создают в проводнике

шириной  $b_{\Pi}$  механические напряжения начального изгиба  $\sigma_{И}$ . При коротком замыкании ИСУ деформации  $\varepsilon_{И}$  складываются с деформациями от электромагнитных сил, в частности с деформациями  $\varepsilon_{ЭМР}$  от радиальной сжимающей силы, причем максимальное значение  $\varepsilon_{\Sigma \max}$  полной деформации  $\varepsilon_{\Sigma}$  создается на наружном радиусе контура окружности изгиба витка со средним диаметром  $D_B$  [12]:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_{И} + \varepsilon_{ЭМР};$$

$$\varepsilon_{\Sigma \max} = \varepsilon_{И \max} + \varepsilon_{ЭМР}; \quad \varepsilon_{И \max} = b_{\Pi} / D_B. \quad (1)$$

Наложение деформаций начального изгиба и деформаций от сил сжатия приводит к возрастанию напряжения по всей длине сжимаемых участков окружности витка. За время длительности короткого замыкания суммарные напряжения  $\sigma_{\Sigma}$  не должны превышать критических значений (с определенным запасом), что является условием ЭДУ ИСУ:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{И} + \Delta\sigma_{ЭМР}; \quad \sigma_{\Sigma} + \Delta\sigma_3 \leq \sigma_K, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_{ЭМР}$  – возрастание напряжений под действием деформации  $\varepsilon_{ЭМР}$ ;  $\Delta\sigma_3$  – запас напряжений;  $\sigma_K$  – критическое значение напряжений которое для кругового витка ( $\sigma_{КО}$ ) зависит от его геометрических параметров и числа  $n_B$  волн деформационного изгиба по окружности под действием электромагнитных сил, а также зависит от величины обобщенного модуля упругости материала проводника  $E_{Y\Sigma}$  [12],

$$\sigma_{КО} = b_{\Pi} (n_B^2 - 1) E_{Y\Sigma} / (\sqrt{3} D_B). \quad (3)$$

Модуль  $E_{Y\Sigma}$  зависит от предела текучести материала  $\sigma_{ПТ}$  и геометрических параметров изогнутого по окружности проводника, а также функционально связан с  $\sigma_{\Sigma}$  и  $\varepsilon_{\Sigma}$  [12]:

$$E_{Y\Sigma} = f_{\Sigma}(\sigma_{ПТ}, \sigma_{\Sigma}, b_{\Pi} / D_B); \quad \sigma_{\Sigma} = f_{\sigma}(\varepsilon_{И}, \varepsilon_{ЭМР}). \quad (4)$$

Согласно [12-14] использование методик расчета ЭДУ ИСУ без учета  $\varepsilon_{И}$  и  $\sigma_{И}$  приводит к завышению критических напряжений и критических сил полегаия проводников обмоток. Погрешности расчетов достигают соответственно 100 % и 500 %.

Традиционными способами и конструктивными решениями ЭДУ ИСУ являются: упрочнение материала проводников и их склеивание, опрессовка катушек в осевом и радиальном направлениях пресуемыми кольцами и вертикальными упорно-изоляционными (прошивными) рейками, установка жестких опорно-изоляционных цилиндров и горизонтальных прокладок, повышение монолитности и симметрирование витков и фазных катушек по высоте стержня [6, 13, 14]. При этом число вертикальных реек и горизонтальных прокладок ограничено необходимыми сечениями каналов и площадями поверхностей охлаждения катушек обмотки. Практика эксплуатации ИСУ свидетельствует, что использование указанных способов и решений полностью не гарантирует ЭДУ обмоток. Согласно международным данным, в общей аварийности трансформаторов доля повреждений, обусловленных недостаточной ЭДУ, весьма велика [13].

На основе изложенного, можно констатировать, что рассмотренные выше ЭМС ИСУ не лишены серьезных недостатков и, согласно например [10, 11, 15], их почти досконально отработанные, в рамках традиционных структур, конструктивно-технологические решения практически достигли предела развития. Поэтому необходимы поиск и разработка новых способов и технических предложений по усовершенствованию

активной и конструктивной части ИСУ. Такими способами являются системный подход и структурное преобразование ЭМС [9, 10], в том числе на основе предложений в виде нетрадиционных конфигураций ОК катушек обмоток и стержней магнитопроводов [11]. Также представляется целесообразным расширение практики использования пространственных структур ЭМС позволяющих дополнительно к снижению материалоемкости упростить конструктивную часть и усовершенствовать систему принудительного охлаждения ИСУ [15].

Перспективным вариантом преобразования ЭМС представляется замена плоских параллельных и криволинейных ОП на многоплоскостные ОП создающие многогранные ОК витков обмоток и сечений стержней [11].

Из (1) – (4) следует способ повышения ЭДУ ИСУ заключающийся в формировании катушек обмоток на основе  $n \geq 6$ -гранных ОК витков [16]. Особенностью подобных катушек является наличие участков витков сформированных прямыми линиями пересекающимися под тупыми углами изгиба витков  $\alpha_B \geq 120^\circ$  (рис.4,б). В отличие от круговых витков (рис. 4,а), на прямых участках которые составляют основную часть длины многогранного витка, исключаются составляющие деформаций и напряжений (1) и (2), обусловленных изгибом. Эти составляющие, согласно (3), (4), как и возможные повреждения витковой изоляции при изгибе, концентрируются в зонах витков на осях вершин многогранника. Поэтому в этих зонах должна быть усилена изоляция и сосредоточены механические крепления обмотки, в частности установлены столбы горизонтальных прокладок и прошивные рейки [16]. Для максимального повышения электрической прочности и ЭДУ обмотки, в угловых зонах граней между витками должны быть установлены дополнительные вертикальные прокладки (рис. 4,б). Вертикальные прокладки и рейки, а также отверстия и выемки под них в горизонтальных прокладках, могут выполняться с формой которая соответствует внутреннему  $r_B$  и наружному  $r_H$  радиусам скруглений обмоточных витков [16].

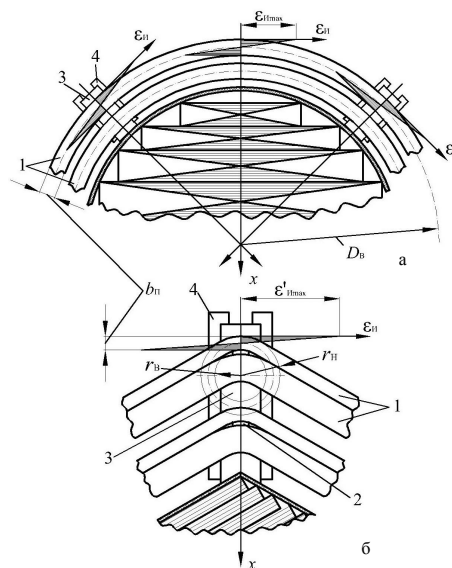


Рис. 4. Изгиб и деформации начального изгиба проводника по круговому контуру витка (а) и концентрация деформаций изгиба в угловых зонах многогранного контура витка (б): 1 – проводник; 2 – вертикальная прокладка; 3 – прошивная рейка; 4 – опорная прокладка

Числу граней ОК витков обмотки (рис. 4,б) должны соответствовать контуры сечений стержней магнитопроводов с конструктивно-технологическими решениями, удовлетворяющими требованию конструктивной "безотходности", то есть безотходности выполнения элементарных слоев магнитопровода из прямоугольной полосы (ленты) являющейся долевой частью стандартного прокатного рулона ЭТС. Многогранные конфигурации ОК сечений стержней и магнитопроводов в целом позволяют усовершенствовать известные структуры (рис. 1-3) и создать новые структуры ЭМС.

#### НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СТЫКОВЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

Варианты ЭМС со стыковыми магнитопроводами являются более технологичными [4], так как не требуют расширтки верхнего ярма при установке катушек обмотки, а раздельное изготовление стержней и ярм позволяет успешно решать задачи механизации и автоматизации производства. Однако недостатками подобных ЭМС (не относятся к ненасыщенным реакторам и дросселям с конструктивными зазорами в магнитопроводах) являются необходимость изолирования стыков и повышенный ток холостого хода [4, 6]. В связи с этим, некоторые фирмы практикуют механическую обработку стыковых поверхностей [4]. Согласно [6], структура ЭМС (рис. 2,в) с цилиндрическими ОП и комбинированным стыковым магнитопроводом позволяет снизить массу активной стали и потери холостого хода на 9-10%. При этом её эффективность понижена наличием "добавочного" структурного объема ЭТС ярм обусловленного несоответствием радиусов ОК стержней и угловых зон наружных контуров ярм, а также традиционным "ступенчатым" сечением стержней.

Технический уровень вариантов трехфазной ЭМС соответствующих структуре (рис. 2,в) повышается использованием шестигранных (рис. 5,а-в) и девятигранных (рис. 5,г) ОК в пространственных комбинированных стыковых магнитопроводах [17, 18]. Многогранные ОК обмоточных витков ЭМС (рис. 5) повышают ЭДУ ИСУ при сохранении традиционных прямоугольных конфигураций обмоточных окон и вертикальных сечений катушек обмоток. Указанные ОК создают стержни из пакетов параллелограмного или ромбического сечений [17] которые собираются из идентичных прямоугольных пластин (листов) ЭТС, что является весьма важным технологическим преимуществом. Другим важным структурным преимуществом шестигранной конфигурации стержней магнитопроводов ЭМС (рис. 5,а-б) и других типов магнитопроводов является максимальный коэффициент заполнения ОК сечением стержня  $K_{\text{зп}} \approx 1$ .

Прямые грани стержней магнитопроводов ЭМС (рис. 5,а, б и г) создают плоские параллельные участки поверхностей обмоточных окон, что снижает упомянутый выше "добавочный" структурный объем ярм, массу и потери в стали ИСУ. Излишний "добавочный" объем также снижается, совместно с радиусами угловых зон наружного контура ярма, в конструкциях магнитопроводов ЭМС [18] (рис. 5,в и г), выполненных с двухконтурными ярмами. Внутренняя

и наружная части (контуры) каждого ярма навиваются так, что в их угловых зонах образуются промежутки (отверстия). Стержни также выполняются с центральными отверстиями и собираются из шести пакетов идентичных пластин (листов) ЭТС. Отверстия между внутренними и наружными поверхностями соответственно внешнего и внутреннего контуров ярм, совпадающие с отверстиями стержней, используются как аксиальные каналы охлаждения и для установки шпилек стяжки магнитопровода.

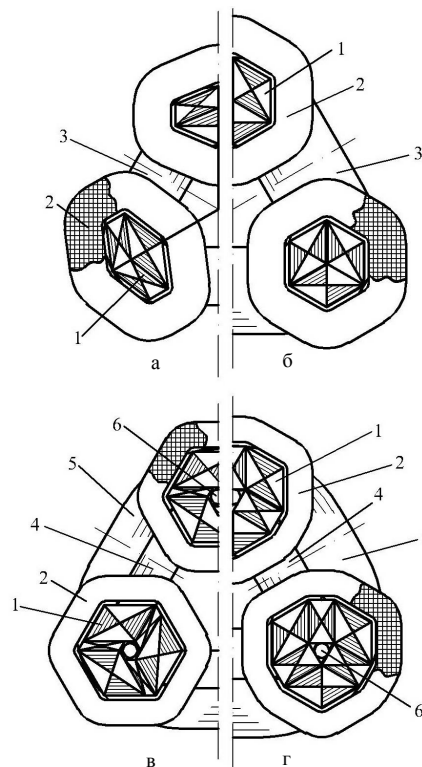


Рис. 5. Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трехфазных аксиальных электромагнитных систем с шестигранным (а-в) и девятигранным (г) сечением стержней, а также одноконтурными (а, б) и двухконтурными (в, г) ярмами магнитопровода:  
1 – стержень; 2 – катушка обмотки; 3 – ярмо;  
4 – внутренний контур ярма; 5 – наружный контур ярма;  
6 – стяжная шпилька

#### ВЫВОДЫ

1. На протяжении более чем 125-летнего развития ИСУ разработаны различные варианты конструкторско-технологических решений планарных, а также радиальных и аксиальных пространственных ЭМС из которых основными стали два типа систем характеризующихся общими структурными признаками плоских параллельных и криволинейных ОП.

2. Плоские параллельные и криволинейные ОП создают "традиционные" конструктивно-структурные исполнения ЭМС с прямоугольными, круговыми или эллиптическими ОК витков катушек обмоток и сечений стержней шихтованных, а также витых и комбинированных магнитопроводов которые практически досконально отработаны и, в связи с этим, лишены перспектив.

3. Дальнейшее усовершенствование ИСУ возможно на основе разработки нетрадиционных структур

тур, в частности с многогранными ОК элементов ЭМС, позволяющими повысить ЭДУ обмоток.

4. Вариантом структурного преобразования ЭМС, наиболее перспективным для решения задач усовершенствования трехфазных реакторов, является использование шести или девятигранных ОК катушек обмоток и стержней в пространственных ЭМС с аксиальными комбинированными стыковыми магнитопроводами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев С.А. Очерки по истории развития электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 216 с.
2. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. – Л.: Судпромиз, 1961. – 368 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч., Ч.1 – Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.
4. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелок и др. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
5. Дорожко Л.И., Либкинд М.С. Реакторы с поперечным подмагничиванием. – М.: Энергия, 1977. – 176 с.
6. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
7. Воеводин И.Д., Дейнега И.А., Сисуненко О.И. Итоги и задачи развития трансформаторостроения // Электротехника. – 1976. – № 4. – С. 1-7.
8. Веселовский О.Н., Копылов И.П. У истоков электромеханики. Столетие трансформатора // Электротехника. – 1984. – № 11. – С. 62-63.
9. Volkrodt W. Neue Wege im Electromashinenbau // Electrojobr. – 1985. – S. 29-38.
10. Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Электротехника и электромеханика. – 2004. – № 1. – С. 57-61.
11. Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Классификация структур и элементов электромагнитных систем электромеханических и индукционных статических преобразователей // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 53-58.
12. Лазарев В.И. Влияние прочностных характеристик материала проводников на критические напряжения радиальной устойчивости обмоток трансформаторов // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – №3(6). – С. 80-86.
13. Лазарев В.И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 53-60.
14. Лазарев В.И. 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.
15. Ставинский А.А., Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Перспективы и особенности дальнейшего совершенствования индукционных электромеханических и статических преобразователей // Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 1 (77). – С. 64-69.
16. Патент на корисну модель 38596 Україна, МПК(2009) H01F 27/28, H01F 27/30, H01F 27/32. Обмотка статичного індукційного пристрою // А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. – u200809425; Заявл. 18.07.2008; Опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.
17. Патент на винахід 88883 Україна, МПК(2009) H01F 27/28, H01F 27/24, H01F 21/00. Просторова електромагнітна система // А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський. – a200604817; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 10.12.2009, Бол. №23.
18. Патент на винахід 91755 Україна, МПК(2009) H01F 3/00, H01F 27/24. Магнітопровід трифазного статичного індукційного пристрою // А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.М. Циганов. – a200813522; Заявл. 24.11.2008; Опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gusev S.A. Oчерki po istorii razvitiya `elektricheskikh mashin. - M.: Gos'energoizdat, 1955. - 216 s. 2. Bal'yan R.H. Transformatory maloj moschnosti. - L.: Sudpromiz, 1961. - 368 s. 3. Kostenko M.P., Piotrovskij L.M. `Elektricheskie mashiny. V 2-h ch., Ch.1 - Mashiny postoyannogo toka i transformatory. Uchebnik dlya vuzov. - L.: `Energiya, 1972. - 544 s. 4. Magnitoprovody silovyh transformatorov (tehnologiya i oborudovanie) / A.I. Majorec, G.I. Pshenichnyj, Ya.Z. Chechelyuk i dr. - M.: `Energiya, 1973. - 272 s. 5. Dorozhko L.I., Libkind M.S. Reaktory s poperechnym podmaglichivaniem. - M.: `Energiya, 1977. - 176 s. 6. Tihomirov P.M. Raschet transformatorov: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - 5-e izdanie. Pererab. i dop. - M.: `Energoatomizdat, 1986. - 528 s. 7. Voevodin I.D., Dejnega I.A., Sisunenko O.I. Itogi i zadachi razvitiya transformatorostroeniya // `Elektrotehnika. - 1976. - № 4. - S. 1-7. 8. Veselovskij O.N., Kopylov I.P. U istokov `elektromehaniки. Stoletie transformatora // `Elektrotehnika. - 1984. - № 11. - S. 62-63. 9. Volkrodt W. Neue Wege im Electromashinenbau // Electrojobr. - 1985. - S. 29-38. 10. Stavinskij A.A. Problema i napravleniya dal'nejshej `evolucii ustrojstv `elektromehaniки // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2004. - № 1. - S. 57-61. 11. Stavinskij A.A., Stavinskij R.A. Klassifikacija struktur i `elementov `elektromagnitnyh sistem `elektromehaniчeskikh i indukcionnyh staticheskikh preobrazovatelej // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2008. - № 2. - S. 53-58. 12. Lazarev V.I. Vliyanie prochnostnyh harakteristik materiala provodnikov na kriticheskie napryazheniya radial'noj ustojchivosti obmotok transformatorov // Praci Institutu elektrodinamiki NAN Ukraini. - 2003. - №3(6). - S. 80-86. 13. Lazarev V.I. Obobshchenie rezul'tatov issledovanij po probleme `elektrodinamicheskoy stojkosti silovyh transformatorov // Tehnichna elektrodinamika. - 2005. - № 1. - S. 53-60. 14. Lazarev V.I. Elektrodinamichna stijkist' silovyh transformatoriv (osnovi teorii, metodi rozrahunku, zasobi zabezpechennja). Avtoref. dis... dokt. tehn. nauk: 05.09.01 / In-t elektrodinamiki NAN Ukraini. - K.: 2006. - 37 s. 15. Stavinskij A.A., Tischenko I.A., Zelenyj N.I. Perspektivy i osobennosti dal'nejshego usovershenstvovaniya indukcionnyh `elektromehaniчeskikh i staticheskikh preobrazovatelej // Elektrotehniчni i komp'yuterni sistemi. - 2010. - № 1 (77). - S. 64-69. 16. Patent na korisnu model' 38596 Ukraina, MPK(2009) H01F 27/28, H01F 27/30, H01F 27/32. Obmotka statichnogo indukcionnogo pristroju // A.A. Stavinskij, R.A. Stavinskij, O.M. Ciganov. - u200809425; Zayavl. 18.07.2008; Opubl. 10.03.2009, Byul. № 5. 17. Patent na vinahid 88883 Ukraina, MPK(2009) H01F 27/28, H01F 27/24, H01F 21/00. Prostorova elektromagnitna sistema // A.A. Stavinskij, R.A. Stavinskij. - a200604817; Zayavl. 03.05.2006; Opubl. 10.12.2009, Bol. №23. 18. Patent na vinahid 91755 Ukraina, MPK(2009) H01F 3/00, H01F 27/24. Magnitoprovod trifaznogo statichnogo indukcionnogo pristroju // A.A. Stavinskij, R.A. Stavinskij, O.M. Ciganov. - a200813522; Zayavl. 24.11.2008; Opubl. 25.08.2010, Byul. № 16.

Поступила 17.06.2011

Ставинский Андрей Андреевич, д.т.н., проф.  
кафедра "Судовые электроэнергетические системы"  
Национальный университет кораблестроения  
имени адмирала Макарова  
54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9  
тел. (0512) 39-94-53,  
e-mail: andreystavynskiy@nuos.edu.ua

Stavinskiy A.A.

**Evolution of structures and preconditions for transformers and reactors improvement via electromagnetic system circuits transformation (electrodynamics stability and systems with combined butt magnetic cores).**

Results and prospects of further evolution, features and ways of electrodynamic stability control for electromagnetic systems of transformers and reactors are analyzed. Examples of structural transformation of a spatial axial system with a belt-plate butt magnetic circuit on the basis of multiplane forming surfaces of rods and coil windows are presented.

**Key words – structure evolution, magnetic circuit, coil, electrodynamic stability, improvement preconditions.**