

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 усовершенствования различных структур ЭМС на основе нетрадиционных конфигураций магнитопроводов и катушек обмоток. Целью настоящей первой части работы является рассмотрение эволюции, предпосылок усовершенствования 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 усовершенствования 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 броневаемую (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].

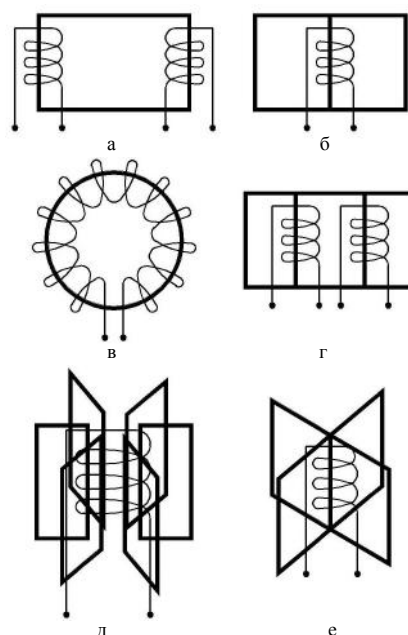


Рис. 1. Структурные схемы симметричных планарных (а, б, г) и пространственных (в, д, е) однофазных электромагнитных систем

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].

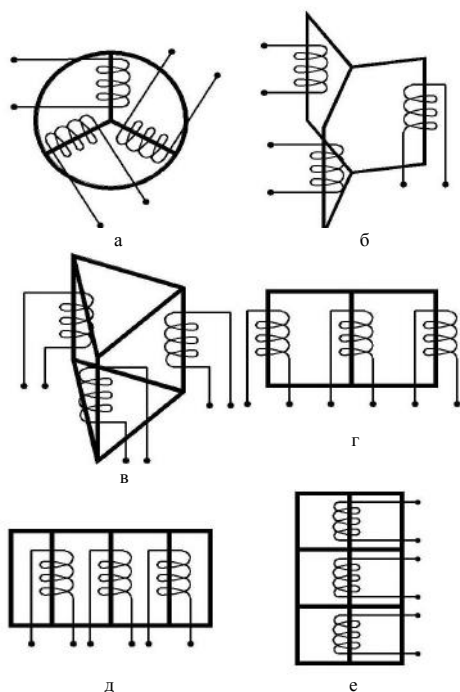


Рис. 2. Структурные схемы пространственных (а-в) и планарных (г-е) трехфазных электромагнитных систем на трехфазных магнитопроводах

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.

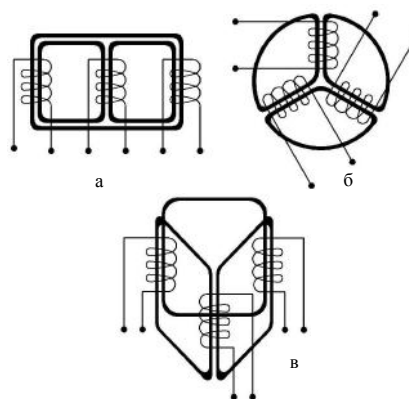


Рис 3. Структурные схемы планарной (а) и пространственных (б, в) трехфазных электромагнитных систем на трехфазных магнитопроводах с двухконтурными фазными элементами

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 ϵ_i (рис. 4,а) которые создают в проводнике

шириной b_{Π} 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 ε_{Σ} создается на наружном радиусе контура окружности изгиба витка со средним диаметром D_B [12]:

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

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

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 σ_{Σ} 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; σ_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 σ_{Σ} и ε_{Σ} [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 пресующими 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].

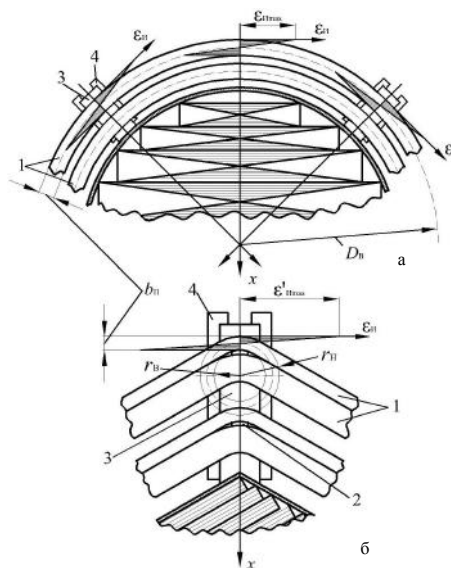


Рис. 4. Изгиб и деформации начального изгиба проводника по круговому контуру витка (а) и концентрация деформаций изгиба в угловых зонах многогранного контура витка (б): 1 – проводник; 2 – вертикальная прокладка; 3 – прошивная рейка; 4 – опорная прокладка

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 $K_{\text{КШ}} \approx 1$.

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.

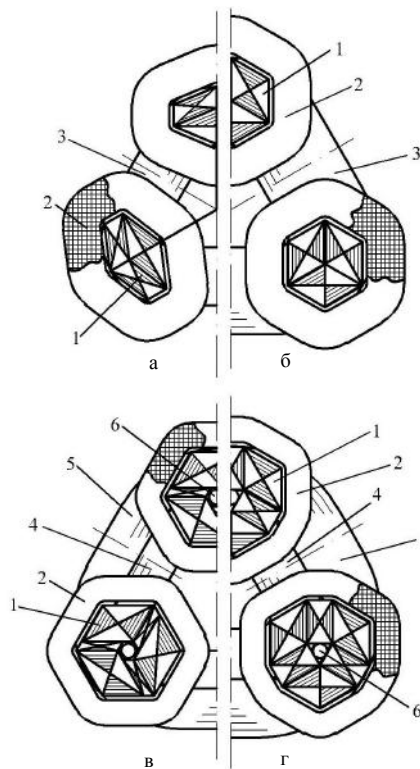


Рис. 5. Конструктивные схемы (в поперечном сечении) трехфазных аксиальных электромагнитных систем с шестигранным (а-в) и девятигранным (г) сечением стержней, а также одноконтурными (а, б) и двухконтурными (в, г) ярмами магнитопровода:
1 – стержень; 2 – катушка обмотки; 3 – ярмо;
4 – внутренний контур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

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. Электродинамічна 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 podmagichivaniem. - 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 `elektromehaniki. 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'nejshoj `evolucii ustrojstv `elektromehaniki // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2004. - № 1. - S. 57-61. 11. Stavinskij A.A., Stavinskij R.A. Klassifikacija struktur i `elementov `elektromagnitnyh sistem `elektromehaničeskikh i indukcionnyh statičeskikh preobrazovatelej // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2008. - № 2. - S. 53-58. 12. Lazarev V.I. Vliyanie prochnostnyh harakteristik materiala provodnikov na kritičeskie napryazheniya radial'noj ustojčivosti obmotok transformatorov // Praci Institutu elektrodinamiki NAN Ukraini. - 2003. - №3(6). - S. 80-86. 13. Lazarev V.I. Obobščenie rezul'tatov issledovanij po probleme `elektrodinamičeskoj stojkosti silovyh transformatorov // Tehnična elektrodinamika. - 2005. - № 1. - S. 53-60. 14. Lazarev V.I. Elektrodinamična stijkist' silovyh transformatoriv (osnovi teorij, metodi rozrahunku, zasobi zabezpečennja). 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'nejshogo usovershenstvovaniya indukcionnyh `elektromehaničeskikh i statičeskikh preobrazovatelej // Elektrotehnični i komp'yuterni sistemi. - 2010. - № 1 (77). - S. 64-69. 16. Patent na korisnu model' 38596 Ukraїna, MPK(2009) H01F 27/28, H01F 27/30, H01F 27/32. Obmotka statičnogo indukcijnogo pristroyu // 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 Ukraїna, MPK(2009) H01F 27/28, H01F 27/24, H01F 21/00. Prostorova elektro magnitna sistema // A.A. Stavinskij, R.A. Stavinskij. - a200604817; Zayavl. 03.05.2006; Opubl. 10.12.2009, Bol. №23. 18. Patent na vinahid 91755 Ukraїna, MPK(2009) H01F 3/00, H01F 27/24. Magnitoprovod trifaznogo statičnogo indukcijnogo pristroyu // 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.