

ПРОБЛЕМА И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭВОЛЮЦИИ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Ставинский А.А., д.т.н., проф.

Украинский государственный морской технический университет им. адмирала Макарова
Украина, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, Институт автоматики и электротехники
тел. (0512) 39-94-53, E-mail: ph@udmtu.air.mk.ua

Розглянуто засоби удосконалення електричних машин і трансформаторів. На основі огляду літератури та конкретних технічних рішень активної і конструктивної частини показано зростання значення спеціальних виконань і нетрадиційних технічних рішень пристроїв електромеханіки.

Рассмотрены способы усовершенствования электрических машин и трансформаторов. На основе обзора литературы и конкретных технических решений активной и конструктивной части показано возрастание значимости специальных исполнений и нетрадиционных технических решений устройств электромеханики.

Электромеханика (ЭМ) – фундаментальная наука с более чем 160-летней историей развития, усовершенствования и постепенного расширения структурного и видового состава электрических генераторов (Г), двигателей (Д) и трансформаторов (Т) [1].

Основным направлением развития ЭМ в XXI веке является комплексное энергосбережение и всемерное внедрение ресурсосберегающих технологий [2,3].

В связи с особой важностью и актуальностью постановки и решения задач дальнейшего развития, представляется целесообразным обозначение и систематизация способов повышения технического уровня устройств ЭМ.

Первый способ предусматривает усовершенствование Г, Д и Т на основе использования новых магнитных и изоляционных электротехнических материалов путем снижения потерь холостого хода и величин изоляционных промежутков, а также повышения стойкости изоляционных оболочек обмоточных проводов, секций и катушек обмоток термическим и механико-технологическим воздействиям.

Второй способ основывается на постоянном совершенствовании методик расчетов и оптимизации.

Указанные два способа являлись кардинальными на протяжении XX века и позволили многократно снизить удельную материалоемкость устройств ЭМ. Однако к концу столетия возникла ситуация относительной стабильности свойств электротехнической стали (ЭТС) и изоляции [4,5] и возможно лишь незначительное ресурсосбережение на основе применения, например, монокристаллической или аморфной ЭТС. В части материала обмоток альтернатива использованию меди и алюминия отсутствует, весьма актуальными являются вопросы их экономии и эффективной утилизации.

За последние десятилетия обеспечено расширение границ и возможностей многокритериальной оптимизации на основе непрерывного развития методов и средств автоматизированного проектирования.

Во второй половине XX века эволюция устройств ЭМ способствовало усовершенствованию энергетических установок транспортных средств, развитие теории и практики систем автоматики, вычислительной техники, авиации и космонавтики, а также электрон-

ных систем. Это явилось причиной возникновения определенных направлений усовершенствования устройств ЭМ и другими способами.

Согласно третьему способу, снижение удельной материалоемкости достигается повышением электромагнитных нагрузок и применением технических решений, способов и устройств интенсификации охлаждения (форсированного воздушного, жидкостного, криогенного) [2,3].

Четвертый способ обеспечивает существенное снижение удельной материалоемкости индукционных преобразователей использованием повышенной частоты (200, 400 Гц) при числе полюсов $2p \leq 4$ [6].

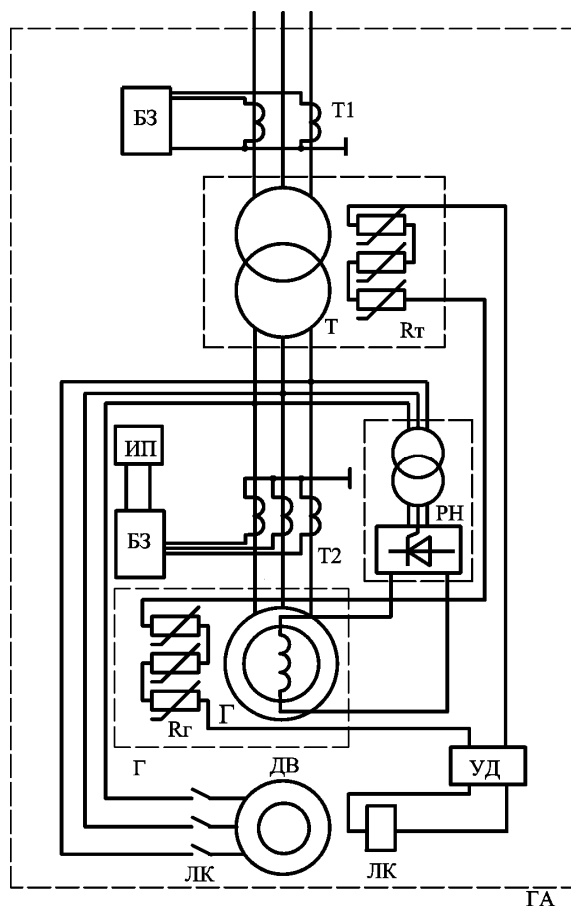
Однако некоторые способы требуют существенного усложнения и увеличения стоимости конструкций за счет применения дополнительных систем и устройств (нетрадиционное охлаждение, газовые или магнитные подшипники, редукторы [2,6]) и используются в технически обоснованных случаях.

Пятый способ базируется на системном подходе – интеграция с электронно-полупроводниковыми устройствами функционирования и регулирования, а также элементами конструкций приводимых в движение механизмов [7,8].

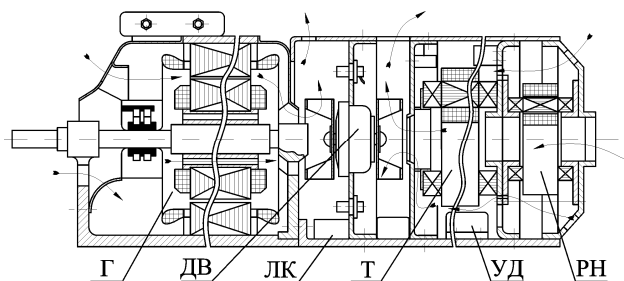
В рамках указанного способа целесообразно объединение комплектного электрооборудования в единые функционально-связанные агрегаты.

На рис.1 представлены принципиальная электрическая и конструктивная схемы блока Г – Т с автоматической принудительной вентиляцией (АПВ) [9]. Как правило, блочные и транспортные генерирующие агрегаты содержат генератор Г, трансформатор Т, блоки защиты БЗ с измерительными трансформаторами Т1 и Т2 и контрольно-измерительными приборами ИП, а также устройством автоматического регулирования напряжения РН (рис.1, а). С целью снижения потерь на режимах недогрузки и повышения КПД вентилятора, в конструктивной части (КЧ) Г (рис.1,б) отсутствует самовентиляция. Форсированное охлаждение Г, Т и комплектного оборудования обеспечивается блочным вентилятором с асинхронным приводом (двигатель ДВ, пускатель ЛК, устройство управления УД) с пуском посредством датчиков температуры.

Указанные датчики (R_{Γ} , R_T) встраиваются в максимально нагреваемые участки фаз обмоток Γ и T .



а)



б)

Рис.1. Принципиальная электрическая (а) и конструктивная (б) схемы блока генератор - трансформатор

При проектировании трехфазных Т блочного исполнения представляется целесообразным применение пространственной магнитной системы (рис.1, б). Такие Т [10] обеспечивают конструктивное соответствие цилиндрической форме Γ и D , лучшие массогабаритные показатели и соответствие конфигурации своей активной части (АЧ) направленному вдоль оси агрегата потоку охлаждения.

Шестой способ заключается в поиске и разработке нетрадиционных решений АЧ и КЧ. Данный способ может обеспечить снижение как удельной, так и технологической материалоемкости устройств ЭМ, а также органически сочетаться с другими способами.

Примером комбинации способов являются нетрадиционные конструкторские решения системы АПВ закрытого Д [9]. В указанном асинхронном двигателе (АД) (рис.2) ротор 1 закреплен на валу 2 с внутренней осевой полостью 3. Система АПВ содержит встроенный в полость вала АД 4 с $2p = 2$ и малым наружным диаметром [11], а также малые 5 и большие 6 лопатки двоякого рабочего колеса вентилятора. Лопатки 5 возбуждают движение воздуха в полости вала и в зоне каналов 7 под лобовыми частями статора 8 со стороны выхода вала. Посредством лопаток 6 и кожуха 9 обеспечивается наружный обдув корпуса 10.

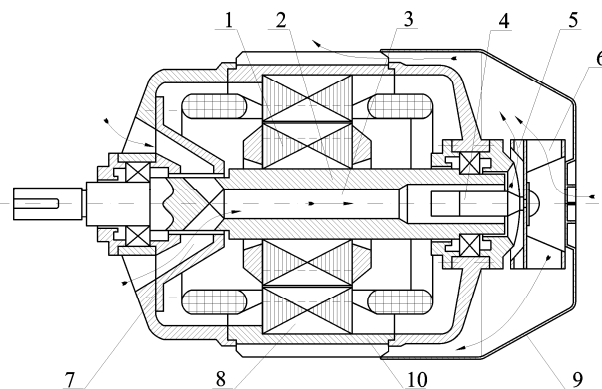


Рис.2. Закрытый двигатель с принудительной форсированной вентиляцией

Конструкция (рис.2) практически исключает градиент температуры между противоположными лобовыми частями статора АД с наружным обдувом и обеспечивает интенсивное охлаждение и минимальную массу АД системы АПВ. Минимальный диаметр статора встроенного АД может быть обеспечен "безвальной" конструкцией ротора [12] с пространственной структурой стали магнитопровода.

На современном этапе практические достижения в электромашино- и трансформаторостроении в рамках традиционных конструкций, в частности АД с шихтованными цилиндрическими магнитопроводами статора из плоских пластин ЭТС в аксиально оребренных корпусах или трехфазных планарных магнитных систем Т со стержнями из пакетов листов ЭТС различной ширины, достигли определенного предела развития. Согласно, например [13], развитие электромашиностроения в конце XX века "приостановлено".

В связи с возникшей проблемой повысилась значимость шестого, а также третьего, четвертого и пятого способов усовершенствования устройств ЭМ и электромеханических систем.

В 70...80-х годах прошедшего века проводились комплексные исследования возможности разработки АД классической схемы на основе шестого способа и технологий изготовления магнитопроводов гофрированием и навивкой на ребро ленты ЭТС, а также комбинированных магнитопроводов. Основные результаты указанных работ систематизированы в [14].

Однако в связи со специфическими особенностями, обуславливающими снижение коэффициента заполнения паза или повышенные добавочные потери

и, главное, технологической сложностью реализации управляемой деформации ЭТС, требующей коренной перестройки существующего производства [15], промышленного освоения указанных технологий не последовало. Новые серии [16] концептуально не отличаются от АД разработок 60-х и 80-х годов XX века.

Практическая сложность решения конструкторско-технологической задачи разработки нетрадиционных малоотходных магнитопроводов стимулировала разработку компромиссных предложений и использование резервов классической технологии [13,14,17-19]. Резервы классической технологии заключаются в штамповке пластин ЭТС с незначительным количеством отходов. Как выход из "тупика" [13] классической технологии шихтовки цилиндрических магнитопроводов предлагается использовать угловые отходы для развития поверхностей охлаждения путем сдвига пакетов или отдельных пластин некруглой формы в тангенциальном направлении при бескорпусном исполнении Г и Д. Однако общим недостатком тангенциальных магнитопроводов (ТМ) является отсутствие возможности перераспределения магнитного поля зон яра с минимальной $h_{я\ min}$ и максимальной $h_{я\ max}$ высотами. Указанный недостаток практически устраняется в многоплоскостных магнитопроводах (ММ) [17-19] (рис.3) из пространственных элементарных слоев (ПЭС) ЭТС.

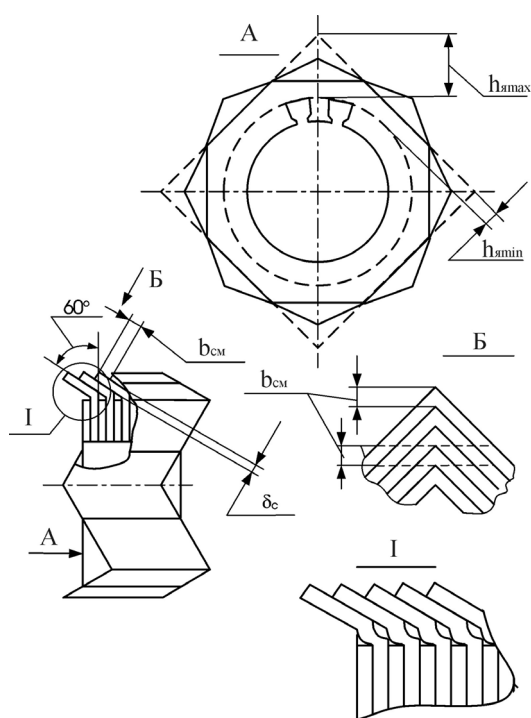


Рис.3. Многоплоскостной магнитопровод статора из пространственных элементарных слоев электротехнической стали

ПЭС стали выполняются отгибом на 60° по линиям граней (рис.3) участков с $h_{я\ max}$ каждого исходного плоского слоя, что создает возможность перераспределения силовых линий поля из участков пластин с $h_{я\ min}$. При сборке соседние слои смещаются тангенциально до совпадения осей $h_{я\ max}$ и $h_{я\ min}$, что

при угле отгиба 60° обеспечивает монолитный ММ без зазоров между слоями. Скрепление пакета статора восемью сварными швами создает в каждом отдельном слое четыре шва, а точки сварки соседних слоев сдвинуты. Это ограничивает добавочные потери и тепловую деформацию. В средней части пакета швы могут быть прерывисты.

Главная особенность ММ – пространственная структура слоев ЭТС связана с их формообразованием. Обеспечение необходимой формы отдельного слоя технологических сложностей не представляет. Однако необходимы дополнительный гибочный штамп и операция отгиба образованных гранями выступов в каждой отдельной пластине. Недостаток отдельного формообразования каждого слоя исключается на основе способа интегрального отгиба участков пластин заготовки ММ (рис.4). Выполняется сборка пакета 1 заготовки плоских пластин (рис.4, а) и его установка на оправку – основание 2 гибочного приспособления. Формовка ММ (рис.4, б) осуществляется последовательным действием на заготовку деталей оснастки. Используется стандартный пресс двойного действия с цилиндром обжима 3 и гибочными выступами 4.

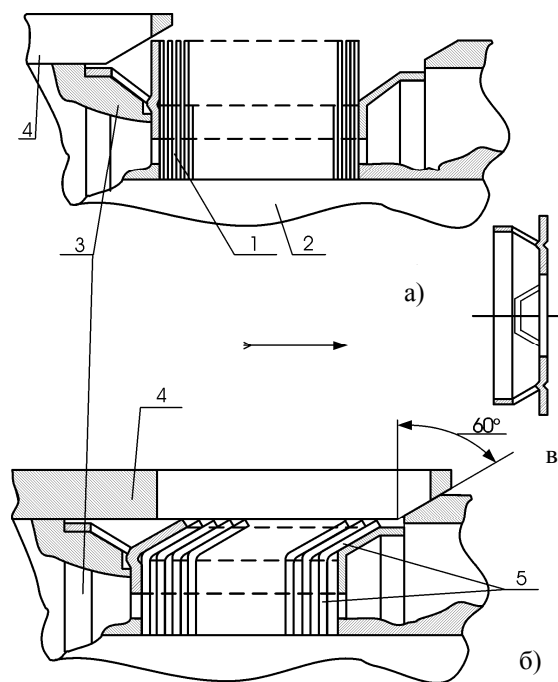


Рис.4. Приспособление формовки многоплоскостного магнитопровода: а – исходная позиция; б – конечная позиция; в – нажимной элемент

В связи с тем, что внешние или внутренние наклонные зоны яра могут служить элементами опоры (соединения с деталями оболочки), ММ обеспечивает снижение металлоемкости КЧ. При этом функции корпуса может выполнять зона яра из наложенных одна на одну и соединенных между собой наклонных участков каждого элементарного слоя. Стыковку ММ с подшипниковыми щитами можно обеспечить посредством нажимных элементов чашевидной формы (рис.4, в). Для полного совпадения сопрягаемых поверхностей активной и конструктивной частей, фор-

мовку ММ целесообразно осуществлять с установленными в приспособление (рис.4, б) нажимными элементами 5.

Другая особенность как ММ, так и ТМ, заключающаяся в тангенциальном сдвиге соседних пластин, или групп пластин, также усложняет технологию. Согласно [13] стандартное штамповочное оборудование необходимо дополнить специальным укладчиком, который периодически, после каждой секции (пластины), поворачивает заготовку пакета на заданный угол. Также повышаются требования к допускам угловых и линейных размеров пазовых и вспомогательных отверстий в слоях стали.

ММ (рис.3) может быть получен только при наличии взаимного сдвига ПЭС. Однако в связи с тем, что ярмо многоплоскостной структуры обеспечивает функцию корпуса, оно может выполняться, как и классическая станина, отдельно от центральной части магнитопровода с пазами. При этом следует отметить, что необходимая для совпадения пазов при сдвиге пластин точность, может быть обеспечена современным инструментальным производством.

К сказанному следует также добавить, что АЧ машин с малоотходными витыми и гофрированными магнитопроводами [14], в отличие от конструкций [13,17-19], предусматривает использование существующих решений КЧ и сохранение высокой металлоемкости, экологической опасности и других недостатков литейного производства станин.

Как уже указывалось, кроме отходов ЭТС и металлоемкости КЧ, конструкции и технологии производства магнитопроводов существенно влияют на теплообмен машины с внешней средой или хладагентом. Основная часть тепла, выделяемого в статоре, передается через тепловое сопротивление

$$R_{\theta} = \frac{h_{я}}{\lambda_{с} \Pi_{я}} + \frac{\delta'_{к}}{\lambda'_{к}} + \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к} \Pi_{о}} + \frac{1}{\alpha_{о} \Pi_{о}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{с}, \lambda'_{к}, \lambda_{к}$ - теплопроводности ЭТС, контактного зазора и корпуса; $\delta'_{к}, \delta_{к}$ - размеры контактного зазора и толщины корпуса; $\Pi_{я}$ и $\Pi_{о}$ - соответственно площадь внешней поверхности ярма высотой $h_{я}$ и корпуса; $\alpha_{о}$ - коэффициент теплоотдачи охлаждающей среде.

Из (1) следуют традиционные способы улучшения теплового состояния устройств ЭМ: увеличение $\Pi_{о}$ и уменьшение $\delta_{к}$ при сохранении жесткости корпуса путем оребрения; повышение $\alpha_{о}$, например, внешним обдувом, а также уменьшение $\delta'_{к}$.

Традиционная конструкция станины с повышающими $\Pi_{о}$ продольными ребрами характеризуется гладкими поверхностями теплоотдачи с длиной ребер значительно превышающей поперечные размеры. Указанные особенности ламинизируют изначально турбулентный поток охлаждения и соответственно снижают $\alpha_{о}$ по длине каналов между ребрами [13]. Указанный недостаток классических станин обуславливает радикальное решение задачи интенсификации

охлаждения исключением в (1) средних членов – отказ от оболочки ярма статора и повышение $\Pi_{я}$ до уровня $\Pi_{о}$ использованием зон угловых отходов штамповки листов магнитопровода.

С точки зрения обеспечения влагозащитности, внутренние полости Г и Д должны быть либо связаны с внешней средой, либо герметичны. Внутренний конденсат, накапливающийся в результате смены температурных режимов, обуславливает выход из строя статора, например рудничных АД. Использование закрытого исполнения машин является в большой степени способом повышения надежности исключением загрязнения АЧ промышленной пылью. Проблема химической защиты и влагостойкости АЧ в основном решается качественными пропиткой и покрытиями обмоток и магнитопроводов.

В качестве элементов, повышающих площадь поверхностей охлаждения магнитопровода, используются выступы, образованные гранями или полукруглыми вырезами (рис.5) пластин малоотходного раскроя тангенциальных, тангенциально-вверных и многоплоскостных магнитопроводов [13,17-19]. В качестве конструктивных элементов упрочнения бескорпусной машины, согласно [13], используются опорные прутки или планки, проходящие через отверстия в выступах магнитопровода и приваренные к стенкам цилиндров, стягивающих статор по торцам.

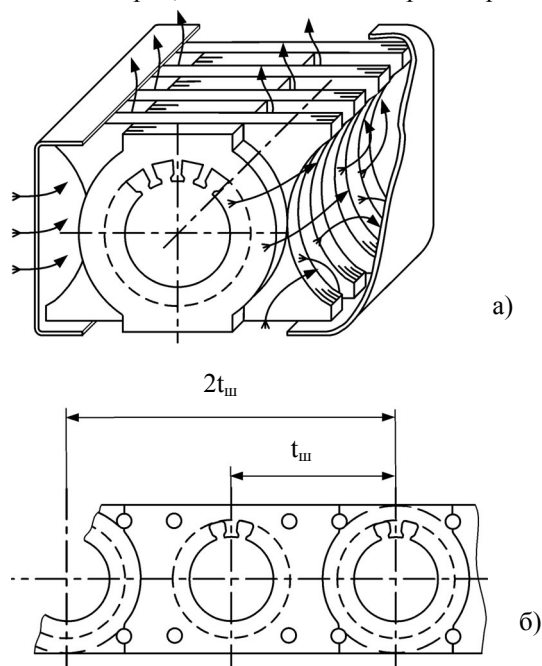


Рис.5. Конструктивная схема (а) и раскрой полосы (б) стали для изготовления магнитопровода бескорпусного статора с аксиально-тангенциальным охлаждением

Вариант магнитопровода [19] с выступающими ребрами и повышенной $\Pi_{я(о)}$, отличающийся отсутствием сдвига секций ЭТС и безотходной штамповкой внешнего контура, представлен на рис.5.

Вырубка пластин с формой внешнего контура, которая отличается и чередуется в смежных пакетах магнитопровода, осуществляется поперечным разделом полосы ЭТС с двойным шагом штамповки $2t_{III}$

по отношению к его величине $t_{ш}$ для пазовых и вспомогательных отверстий.

В конструкторско-технологических решениях магнитопроводов (рис.3-рис.5), при обдуве ярма совместно с экстенсивным способом (параметр $\Pi_{я(0)}$) используется интенсивный способ повышения эффективности охлаждения увеличением α_0 [19], за счет "рельефности" ярма. В конструкции (рис.3) указанная особенность обусловлена разрушением пристенного ламинарного пограничного слоя шероховатостью (характеризуется величинами δ_c и $b_{см}$ подобными параметрам резьбовой нарезки, являющейся способом повышения α_0 в теплообменных аппаратах). В конструкции (рис.5) воздействие на воздушный поток осуществляется проникновением выступающих прерывистых ребер в турбулентное ядро при аксиально-тангенциальном движении воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Эволюция устройств ЭМ осуществляется на основе шести основных способов совершенствования и их комбинации.

2. На современном этапе решающими факторами развития электромеханических систем и устройств ЭМ являются специальные исполнения Г, Д и Т и нетрадиционные решения АЧ и КЧ в соответствии с пятым и шестым способами.

3. В рамках пятого способа можно сформулировать принцип конструктивного соответствия и блочного агрегатирования функционально связанных элементов электромеханических систем (Д, Г, Т, дросселей... и приводных механизмов).

4. Шестому способу соответствует принцип многофункциональности элементов АЧ (участки магнитопровода могут выполнять функции корпуса, радиатора охлаждения, средней части вала).

5. Многофункциональность магнитопровода обеспечивается пространственной структурой, сдвигом слоев ЭТС и рельефностью внешнего контура (в вариантах тангенциальных, многоплоскостных, конусно-плоскостных... магнитопроводов).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. - К.: Наукова думка, 2002. - 288 с.
- [2] Перспективы развития электромеханики в XXI веке./ А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина и др.// Электропанорама. - 2001. - №1. - с.14-15.
- [3] Бут Д.А. Электромеханика сегодня и завтра.// Электричество 1995. - №1. - с.2-10.
- [4] Смольская Н.Е. Применение аморфных сплавов в электромашиностроении. - М.: ВИНТИ, 1986. - 87 с.
- [5] Клишевская Л.Н. Усовершенствование терморезистивной изоляции для высоковольтных машин переменного тока. - М.: Информэлектро, 1981. - 36 с.
- [6] Ястребов В.С., Горлов А.А., Симинский В.В. Электроэнергетические установки подводных аппаратов. - Л.: Судостроение, 1986. - 208 с.
- [7] Ткачук В. Электромеханотроніка: Навчальний посібник. - Львів: ВНУ "Львівська політехніка", 2001. - 404 с.
- [8] Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встра-

иваемого вентилятора.// Электротехн. производство. Перед. опыт и научно-техн. достижения для внедрения: Отрасл. инф. Сб. - 1990. - Вып.6(30). - с.4-7.

- [9] Способы энергоресурсосбережения в судовой силовой электротехнике на основе встроенной принудительной вентиляции/ Ставинский А.А., Чекунов В.К., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А., Боднар О.Г. - 2002. - №1(10). - с.133-137.
- [10] Ставинский А.А., Плахтырь О.О. Сравнительный анализ материалоемкости вариантов трехфазных странственных электромагнитных систем.// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. - Кременчук: КДПУ, 2003. - №2(19), том 1. - с.53-56.
- [11] Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Короткозамкнутый ротор асинхронных двигателей с пониженной материалоемкостью и улучшенными пуско - регулировочными свойствами.// Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвід. наук.-техн. зб. - 2000. - Вип.54. - с.49-53.
- [12] Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Вансач О.С. Определение геометрических соотношений активной части асинхронных двигателей погружного, высокооборотного и обращенного исполнения.// Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. - 2001. - Вип.57. - с.67-72.
- [13] Volkrodt W. Neue wege im Electromaschinenbau.// Electro-Jobg/ - 1985. - s.29-38.
- [14] Яковлев А.И. Электрические машины с уменьшенной материалоемкостью. - М.: Энергоатомиздат, 1981.-240 с.
- [15] Месхия Г.П. Достоинства и недостатки конструкций и технологии изготовления безотходных магнитопроводов электродвигателей.// Электротехн. произв. Перед. опыт и научно-техн. достижения для внедрения: Отрасл. инф. сб. - 1990. - Вып.2. - с.30-31.
- [16] Состояние и перспективы разработки и производства низковольтных асинхронных двигателей./ А.Э. Кравчик, В.К. Новиков, Н.И. Суворов и др.// Электротехника. - 1996. - №3. - с.3-6.
- [17] Ставинский А.А. Нетрадиционные ресурсосберегающие конструкции асинхронных двигателей с классической технологией производства.// Электротехника. - 1992. - №8,9. - с.11-14.
- [18] Ставинский А.А. Асинхронные двигатели с тангенциальным смещением элементарных слоев стали статора.// Электричество. - 1996. - №8. - с.43-48.
- [19] 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.

Поступила 20.09.2003