

УДК 621.311: 621.313  
С 77

# ВОЗМОЖНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. А. Ставинский, д-р техн. наук;  
В. В. Шевченко, канд. техн. наук;  
В. К. Чекунов, инж.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Рассмотрены способы и средства усовершенствования систем и элементов электромеханических комплексов судов на основе нетрадиционных исполнений и структурного преобразования вращающихся и статических электрических машин.

**Ключевые слова:** электромеханический комплекс, структурное преобразование, автономный инвертор, концепция соосных валов.

**Анотація.** Розглянуто способи та засоби вдосконалення систем та елементів електромеханічних комплексів суден на основі нетрадиційних виконань і структурного перетворення обертових та статичних електричних машин.

**Ключові слова:** електромеханічний комплекс, структурне перетворення, автономний інвертор, концепція соосних валів.

**Abstract.** Methods and means of systems and elements improvement of ships electromechanical complexes on the basis of non-traditional implementations and structural transformation of rotating and static electrical machines have been considered.

**Keywords:** electromechanical complex, structural transformation, independent inverter, concentric shafting conception.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Электромеханические комплексы судов (ЭМКС) и кораблей включают в себя судовые электростанции, системы электродвижения и механизмы с электроприводом. В настоящее время их усовершенствование осуществляется схемотехническими методами путем замены систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) синхронных генераторов (СГ) фазовым компаундированием на микропроцессорные АРВ; использованием вместо систем электродвижения постоянно-го и двойного рода тока систем переменного

тока; заменой регулируемых коллекторных и релейно-контакторных электроприводов частотно-регулируемыми с автономными инверторами и асинхронными двигателями (АД) [1]. Указанные достижения в судовой электротехнике обеспечены успехами развития силовых полупроводниковых элементов и электронных систем [2]. При этом главные элементы ЭМКС — электромеханические и индукционные статические преобразователи остаются неизменными и соответствуют традиционным общепромышленным исполнениям двигателей, генераторов и транс-

форматоров. Однако указанные структурно-технологические исполнения вращательных и статических электрических машин (ЭМ) практически достигли предела развития и возникла потребность усовершенствования как ЭМ, так и других технических объектов на основе нетрадиционных технических решений [3, 4].

**ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ** является анализ возможностей и некоторых технических предложений усовершенствования ЭМКС на основе специальных ЭМ.

### ПОГРУЖНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Основными элементами движителей самоходных подводных аппаратов, скважинных насосов и бурового оборудования являются погружные АД [5, 6]. Подобные встраиваемые АД закрытого исполнения с диэлектрической жидкостью во внутренних полостях и упругими элементами противодействия могут быть успешно использованы для привода пожарных, трюмных и других насосов. Однако более существенный технико-экономический эффект может быть получен при использовании погружных ЭМ в качестве гребных двигателей основных и подруливающих движителей, а также забортных генераторов судовых электростанций.

Решение задачи энергоресурсосбережения способом погружного забортного расположения ЭМ обусловлено возможностью повышения плотности тока обмоток в 1,8...2,2 раза и линейной нагрузки статора  $A_s$  на 20...30% при неизменности, исходя из требований виброакустических показателей, уровня магнитной индукции  $B_\delta$  в рабочем зазоре. Повышение электромагнитных нагрузок приводит к снижению массы обмоток и элементов магнитопровода и, как следствие, уменьшению наружного диаметра и (30...40) %-му снижению объема и массы ЭМ. Указанный результат достигается внешним водяным охлаждением электромагнитной системы (ЭМС) ЭМ через корпус и внутренний жидкий диэлектрик (керосин) [5]. Охлаждение интенсифицируется при увеличении скорости движения судна и гребной винта погружного расположения ЭМ.

Недостатком погружных ЭМ с жидкостным заполнением являются повышенные механические потери. Потери  $P_{тр}$  на трение короткозамкнутого АД ротора и главные размеры — активная длина  $l_\delta$  и диаметр  $D_{S(R)}$  активной поверхности статора (ротора) ЭМ — зависят от частоты вращения магнитного поля (ротора)  $n_{S(R)}$  и связаны выражениями [7]

$$P_{тр} = K_k n^3 \left( D_R^A l_{\delta R} + \frac{D_R^S}{4} \right) \gamma_c; \quad (1)$$

$$l_\delta \equiv \frac{1}{A_s B_\delta n_s D_s^2}, \quad (2)$$

где  $K_k$  — коэффициент, определяемый конструктивными особенностями ротора и шероховатостью вращающихся поверхностей;  $\gamma_c$  — плотность среды, которая для воздуха и керосина соответственно составляет:  $\gamma_{c.в} = 1,29 \text{ кг/м}^3$  и  $\gamma_{c.к} = 750 \text{ кг/м}^3$  [5].

Исходя из (1) механические потери погружных ЭМ возрастают в сотни раз и при их проектировании необходимо определение минимально возможных  $DS(R)$  [8], а также исключение выступающих частей и уменьшение шероховатости поверхностей элементов ротора.

В соответствии с (2) уменьшение  $D_s$  приводит к возрастанию длины  $l_\delta$  при уменьшении наружного диаметра статора и улучшению гидродинамических характеристик обтекаемого корпуса ЭМ. При этом снижается масса магнитопровода, что при сохранении уровней магнитной индукции в элементах магнитной цепи снижает потери в стали ЭМ.

Особую актуальность представляет решение задач замены СГ бесконтактным погружным короткозамкнутым асинхронным генератором (АГ), что позволит создать наиболее надежный и дешевый судовой погружной генератор. Согласно [9], при отсутствии необходимости регулируемого источника реактивной мощности АГ отличается простотой осуществления устойчивой параллельной работы и хорошими пусковыми свойствами, а также улучшенными в 1,3...1,4 или 1,6...2,0 раза массогабаритными показателями — по сравнению с контактными и бесконтактными СГ соответственно.

В настоящее время задачи стабилизации напряжения и частоты ЭМКС с АГ, а также создания надежного и относительно дешевого регулируемого источника реактивной мощности могут быть успешно решены на основе упомянутых достижений [2] и вентильных АРВ с техническими решениями, заимствованными из асинхронного частотно-регулируемого электропривода [9, 10].

На рис. 1 представлена упрощенная схема ЭМКС с вентильным АГ на основе автономного инвертора тока [10].

Преимуществом системы (см. рис. 1) являются независимость массогабаритных показателей тиристорного возбудителя от частоты генерируемого напряжения, возможность регулирования напряжения и частоты емкостного тока возбуждения АГ и рекуперации энергии в случае использования генераторного агрегата в системе электродвижения. Выходные параметры системы не зависят от величины нагрузки, а определяются программой переключения тиристорных элементами системы управления.

Асинхронные двигатели контрроторного вращения. Одно из технических решений усовершенствования аэродинамических и гидравлических движителей заключается в применении вместо одного винта на рабочем валу двух винтов встречного вращения на соосных валах. В результате повышается пропульсивный коэффициент и снижается до 20% потребляемая движителем мощность за счет существенного уменьшения закручивания струи рабочего потока [11].

В судовых осевых электровентиляторах (ЭВ) [12] встречное вращение рабочих колес обеспечивается двумя АД, что снижает КПД

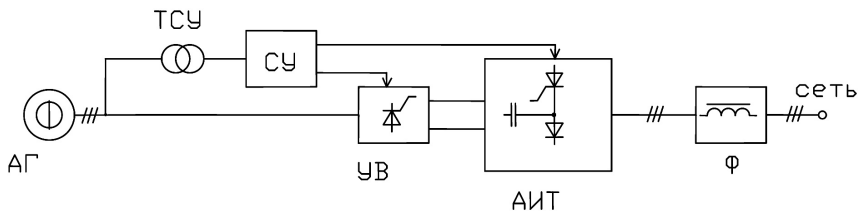
и существенно повышает массогабаритные показатели электропривода. Задача разработки и использования судового движителя в виде соосных винтов противоположного вращения с приводом от дизеля или турбины требует создания сложных редукторов и соосных валопроводов [11]. Согласно [13], объединение концепции соосных гребных винтов и поворотных колонок позволяет избежать сложной конструкции вала.

Повышение технического уровня осевого вентилятора и судового движителя с двумя винтами, вращающимися противоположно, возможно на основе электропривода с асинхронным контрроторным двигателем (АКРД).

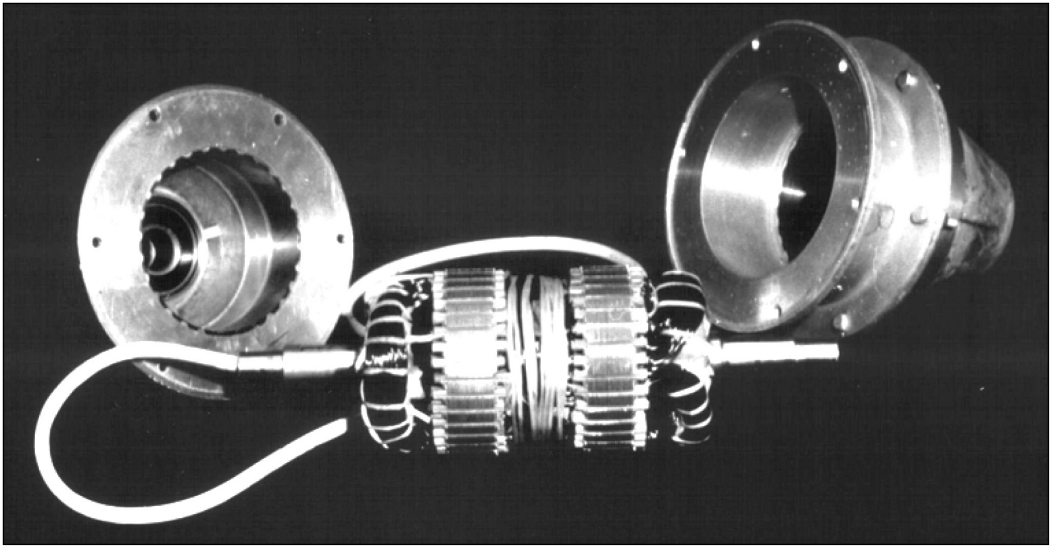
Для обеспечения встречного вращения может быть использована конструкция АД (фото на рис. 2) с магнитопроводом, разделенным в статоре и роторе на два пакета [14]. Такое разделение позволяет смещать тангенциально одноименные участки фаз обмотки, которые расположены в указанных пакетах длиной  $l_g/2$  (рис. 3). Создается возможность изменения чередования фаз обмотки  $A_1B_1C_1, A_2C_2B_2$  и изменения направления вращения магнитного поля в участках  $l_g/2$  ЭМС АД.

Другое решение АКРД — конструктивное обеспечение двух степеней свободы движения элементов ЭМС в противоположных направлениях установкой статора и ротора на подшипники.

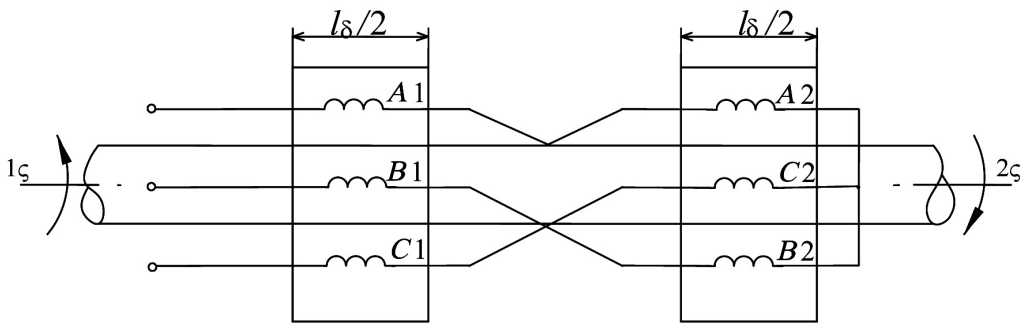
Особенностями условий эксплуатации гребного АКРД являются пуск, реверс и воздействие гироскопической нагрузки при маневрировании и штормовой качке судна [4]. Консольная установка и различие в ма-



**Рис. 1.** Функциональная схема асинхронного вентильного генераторного агрегата: АГ — асинхронный генератор; ТСУ — трансформатор питания системы управления (СУ); УВ — управляемый выпрямитель; АИТ — автономный инвертор тока; Ф — силовой фильтр



**Рис. 2.** Асинхронный двигатель с двухпакетным статором и двухпакетным внешним короткозамкнутым ротором

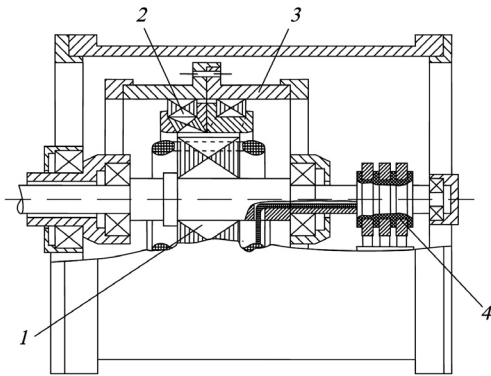


**Рис. 3.** Схема изменения чередования фаз и направления вращения магнитного поля в двухпакетном магнитопроводе

ховых массах роторов приводят к снижению виброударостойкости АД и различию скоростей вращения винтов в динамических режимах привода, что недопустимо. Поэтому при разработке судового АКРД необходимо выравнивание моментов инерции и исключение консольной установки вращающихся статора и ротора. Выполнение указанной задачи возможно с использованием обращенной конструктивной схемы АД [8, 14] с разнесенной установкой в двух подшипниковых щитах внешнего ротора в виде двух симметричных полуроторов с алюминиевыми короткозамкнутыми обмотками и внутреннего статора с медной обмоткой (рис. 4).

Недостатком конструкции АКРД (см. рис. 4) является наличие скользящего контакта подвода электроэнергии к статору. Но поскольку частота вращения роторов соответствует вдвое меньшей синхронной скорости магнитного поля, тихоходность АКРД обеспечивается при вдвое меньшем числе полюсов и существенном выигрыше в массе и габаритных размерах.

Индукционные преобразователи с аксиальными электромагнитными системами. В забортных обтекаемых корпусах совместно с другими ЭМ также могут устанавливаться судовые трансформаторы (СТ). Такое расположение требует создания, вместо tradi-



**Рис. 4.** Конструктивная схема асинхронного двигателя с внутренним статором – ротором и внешним ротором:

1 — вращающийся статор; 2 — полуротор; 3 — корпус внешнего ротора; 4 — контактный узел



**Рис. 5.** Трехфазный компактный трансформатор с симметричным пространственным магнитопроводом

ционных планарных структур однофазных и трехфазных СТ, новых их конструкций на основе вариантов симметричных пространственных ЭМС. Пространственные ЭМС, например, с симметричным аксиальным магнитопроводом (фото на рис. 5) обеспечивают конструктивное соответствие СТ цилиндрической форме вращающихся ЭМ, лучшие массогабаритные показатели и блочно-модульное исполнение, например, генерирующих агрегатов [3, 4].

Одно из важных современных санитарных, технических и специальных требова-

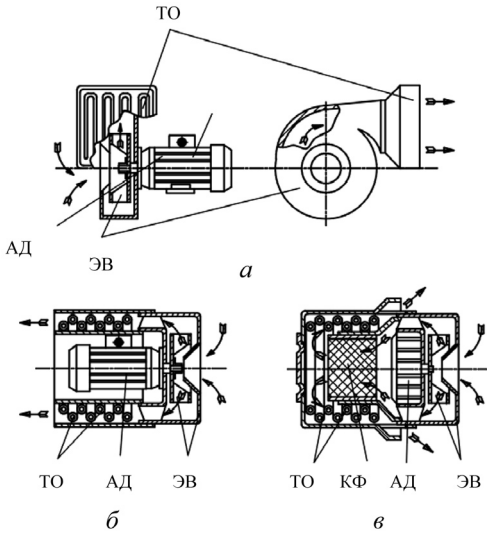
ний, предъявляемых к электрооборудованию, — электромагнитная совместимость, в частности уровень внешнего магнитного поля. Особенностью аксиальных структур вращающихся «торцевых» и симметричных пространственных статических ЭМ является теоретический минимум (нуль) результирующего «магнитного момента» и практическая «маломagnetность» [15].

Другое важное преимущество аксиальных ЭМ — конструктивная приспособляемость к элементам конструкции приводимых в движение механизмов или к механизмам в целом [3, 4]. На рис. 6 представлены варианты конструкций агрегатов обработки дыхательно-газовой смеси (ДГС) подводных аппаратов [16].

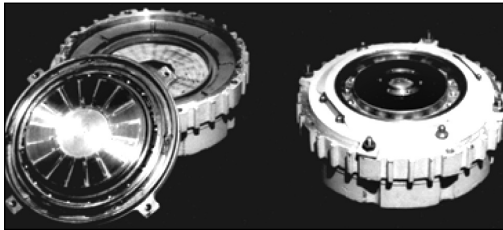
Главными элементами агрегатов ДГС являются ЭВ, теплообменники и комплекты фильтров очистки [16]. Высокотемпературные ЭВ с двухполюсными АД подразделяются на центробежные и центробежные прямооточные [12]. В случае применения традиционной схемы агрегата ДГС с центробежным ЭВ использование объема агрегата нерационально из-за конструктивного несоответствия спирального корпуса плоскому теплообменнику и АД классической схемы (рис. 6, а). Более рационально использование схемы (рис. 6, б) с прямооточным ЭВ и кольцевым теплообменником, охватывающим указанный АД, что повышает компактность. Заменой цилиндрического АД торцевым (рис. 6, в) освобождается пространство в зоне оси для установки фильтра. В схеме на рис. 6, б также последовательно изменяется направление движения ДГС на противоположное, что обеспечивает шумоглушение. Компактная конструкция двухполюсного торцевого АД в водозащищенном капсулированном исполнении статора, предусматривающая возможность крепления крыльчатки ЭВ на ступице ротора, представлена на рис. 7.

Другим преимуществом использования аксиальной ЭМ в ЭМКС является удобство обеспечения встречного вращения и виброударостойкости установки роторов (рис. 8).

При отсутствии технологических сложностей изменения чередования фаз (см. рис. 3) смещением участков обмотки между паке-



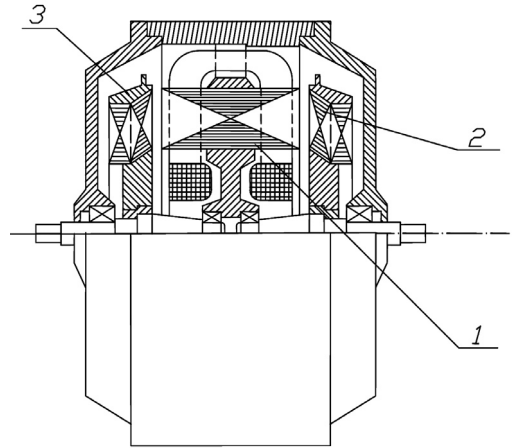
**Рис. 6.** Агрегаты обработки дыхательно-газовой смеси: *а* — с центробежным вентилятором, цилиндрическим электродвигателем и плоским теплообменником; *б* — с центробежным прямоточным вентилятором, кольцевым теплообменником и встроенным цилиндрическим электродвигателем; *в* — со встроенным фильтром и аксиальным электродвигателем



**Рис. 7.** Торцевой асинхронный двигатель для привода встраиваемого электровентилятора с капсулированной обмоткой статора

тами внутреннего неподвижного статора (см. рис. 2) обращенный цилиндрический АКРД имеет существенный (для транспортных объектов) недостаток консольной установки роторов. Недостатками цилиндрического АКРД с внешним неподвижным двухпакетным статором являются повышенная трудоемкость выполнения тангенциального смещения участков обмотки статора и сложность подшипниковых узлов установки разнесенных роторов на соосных валах.

Схема АКРД (рис. 8) полностью лишена указанных недостатков и характеризуется



**Рис. 8.** Конструктивная схема аксиального двухроторного асинхронного двигателя со встречным вращением: 1 — статор; 2 — первый ротор; 3 — второй ротор



**Рис. 9.** Внешний вид аксиального двухроторного асинхронного двигателя

идентичностью маховых масс короткозамкнутых роторов.

Торцевой двухроторный АД схемы, подобной АКРД (см. рис. 8), отличающийся от последней общим валом и одной степенью свободы движения, может быть использован в судовых безбаллерных самотормозящихся шпильях [17]. В указанных палубных механизмах применяются специальные встроенные АД классической схемы, содержащие пристроенные аксиальные электромагниты быстрого торможения. В двухроторном торцевом АД один из роторов может быть

установлен на подвижной подпружиненной ступице. Перемещаясь аксиально под действием сил магнитного притяжения и сжатия пружины, этот ротор может выполнять функции тормозного электромагнита. Таким образом палубный механизм может быть существенно усовершенствован.

## ВЫВОДЫ

1. Техничко-экономические показатели и функциональные возможности систем и элементов ЭМКС могут быть повышены

на основе нетрадиционных исполнений и структурного преобразования ЭМС судовых электрических машин.

2. Представляется, что разработка, освоение производства и применение на судах погружных АГ, погружных и палубных АКРД, специальных АД с внешним ротором и торцевых одно- и двухроторных АД, а также судовых трансформаторов с пространственными ЭМС могут стать важным достижением в областях судовой электротехники, электромашиностроения и судостроения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Васин И.М., Хомяк В.А., Григорьев А.В.* Комплексный подход при создании судовых электроэнергетических систем и установок // Судостроение. — 2008. — № 2. — С. 30–31.
- [2] *Лоренц Л.* Состояние и направление дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника. — 2002. — № 3. — С. 2–10.
- [3] *Ставинский А.А.* Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // Электротехніка і електромеханіка. — 2004. — № 1. — С. 57–61.
- [4] *Ставинский А.А.* Особенности назначения и использования специальных электрических машин // Электротехніка і електромеханіка. — 2008. — № 1. — С. 44–48.
- [5] Системы и элементы глубоководной техники подводных исследований: Справочник / В.С. Ястребов, Г.П. Соболев, А.В. Смирнов и др. — Л.: Судостроение, 1981. — 304 с.
- [6] *Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М.* Погружные асинхронные двигатели. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 168 с.
- [7] *Домбровский В.В., Зайчик В.М.* Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 368 с.
- [8] *Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Вансач О.С.* Определение геометрических соотношений активной части асинхронных двигателей погружного, высокооборотного и обращенного исполнений // Электромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. — 2001. — Вип. № 57. — С. 67–72.
- [9] Перспективы применения асинхронных вентильных стартер-генераторов с короткозамкнутым ротором в автономных системах электроснабжения / М.Л. Костырев, А.И. Скороспешкин, В.Д. Дудышев и др. // Электротехника. — 1980. — № 2. — С. 40–44.
- [10] *Петрушин В.С.* Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Учебное пособие / В.С.Петрушин. — О.: Наука и техника, 2006. — 320 с.
- [11] *Артюшков Л.С., Ачкиндадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители: Учебник. — Л.: Судостроение, 1988. — 296 с.
- [12] *Аптекарь М.В., Фонберштейн И.М.* Судовые вентиляторы (особенности проектирования и устройства). — Л.: Судостроение, 1971. — 484 с.
- [13] *Яковлев А.Ю.* Метод расчета и исследование движителей с гребными винтами противоположного вращения // Судостроение. — 2008. — № 2. — С. 32–35.
- [14] *Ставинский А.А., Золотухин А.И., Янченко А.В.* Снижение вибрации от электромагнитных источников колебаний в двухпакетных асинхронных двигателях // Электротехніка. — 1991. — № 8. — С. 33–36.

- [15] *Розов В.Ю.* Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения // К., 1995. — 42 с. (Препр. / НАН Украины. Институт электродинамики, № 772).
- [16] *Ставинский А.А., Забора И.Г.* Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств // Проблемы автоматизации та електрообладнання транспортних засобів. Матер. Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю. — Миколаїв: НУК, 2006. — С. 186–194.
- [17] *Ватинко Б.А.* Эксплуатация судовых палубных механизмов: Справочник. — М.: Транспорт, 1991. — 197 с.