

ОСОБЕННОСТИ НАЗНАЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Ставинский А.А., д.т.н., проф.

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

Украина, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, кафедра "Судовые электроэнергетические системы"
тел. (0512) 39-94-53, E-mail: ph@udmtu.dip.mk.ua

Виконано аналіз специфіки, наведено результати розробок, сформульовано визначення і на прикладі поршневих механізмів показані переваги використання спеціальних електричних машин.

Выполнен анализ специфики, приведены результаты разработок, сформулировано определение и на примере поршневых механизмов показаны преимущества использования специальных электрических машин.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении XX века объекты практической электромеханики развивались традиционными способами использования достижений электроматериаловедения, прикладной математики и вычислительной техники в рамках единых общепромышленных серий электрических машин (ЭМ) и трансформаторов. Принципиальные "классическая" структура и технология изготовления указанных устройств сохранялись в течение многих десятилетий неизменными, а размеры и удельная материалоемкость снижались. Однако существует мнение, что развитие наиболее массовых продуктов электротехнической промышленности – асинхронных двигателей (АД) и трансформаторов традиционными способами приостановлено и их дальнейшее совершенствование можно осуществить на основе "интеллектуальных" [1] или "нетрадиционных" [2, 3] конструкций и технологий. Во второй половине прошлого века важными факторами прогресса в электромеханике явились усовершенствование энергетических установок транспортных средств, развитие электронных систем, теории и практики систем автоматики, авиации и космонавтики. Это стало причиной появления новых направлений усовершенствования на основе системного подхода – интеграции ЭМ с электронно-полупроводниковыми устройствами или элементами конструкций приводимых в движение механизмов, а также на основе поиска нетрадиционных решений и специальных исполнений электромеханических и электромагнитных преобразователей [1-4] которые получили название специальных.

Современное состояние развития электромеханических устройств и систем характеризуется повышением значимости специальных ЭМ и тенденцией создания их специализированных исполнений и серий [5, 6]. В связи с этим, возникает необходимость в анализе специфики назначения и понятия "специальные ЭМ".

В государственных стандартах Украины ДСТУ 2286-93 и ДСТУ 3270-95 определение "электрична машина спеціального призначення" характеризуется спецификой назначения, применения или спецификой характеристик и конструкции, а определение "спеціальний трансформатор" привязано к особенностям сети и потребителя и не учитывает нетрадиционные свойства и особенности конструкции.

Несмотря на наличие учебных пособий по специальным ЭМ, например [7], к настоящему времени не сформулировано соответствующее обобщенное понятие. К специальной ЭМ также можно отнести и статиче-

ское индукционное устройство – специальный трансформатор, как преобразователь энергии с подвижным видом материи – магнитным полем, а также ускоритель элементарных частиц и термоядерный реактор с удержанием плазмы, являющиеся, согласно [7], особой разновидностью трансформатора. Необходимость подобной формулировки и анализа обусловлена наличием в образовательной программе бакалаврата "Электромеханика" одноименной учебной дисциплины.

Целью работы является обобщение особенностей и вопросов специфики применения, а также формулировка общего определения понятия "Специальные электрические машины".

КЛАССИФИКАЦИЯ И СПЕЦИФИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Специальные ЭМ (с подвижными элементами и статические) соответствуют общим классификациям по роду тока, принципу действия, назначению, мощности и частоте вращения, а дальнейшее расширение их структурного и видового состава определяется общей системной классификацией [8]. Однако от подвижных и статических ЭМ общепромышленного и силового назначений они отличаются конструктивными (обращенные, встроенные, герметичные, высокоскоростные...), технологическими (безотходные, интегральные...), функциональными (повышенная конструктивная приспособляемость к конкретным видам механизмов, управляемость, быстроедействие...) и технико-физическими (маломощного исполнения, с пониженным пусковым током, повышенной термостойкостью...) свойствами, а также отраслевым использованием. Вариант классификации основных разновидностей специальных ЭМ (как изделий используемых в определенных отраслях промышленности) приведен на рис. 1.

Каждый из обозначенных на рис.1 видов может быть представлен отдельной отраслевой классификацией. Например, к военно-промышленному назначению относятся ЭМ систем движения, вооружения, наведения, обнаружения, ориентации, навигации, жизнеобеспечения...

Другим примером комплекса специальных ЭМ являются судовые генераторы, двигатели, силовые, измерительные и преобразовательные трансформаторы электростанций и гребных электрических установок, двигатели палубных якорно-швартовых и подъемно-транспортных механизмов, двигатели оборудования вентиляции и кондиционирования воздуха...



Рис. 1. Диаграмма классификации основных разновидностей специальных электромашин по отраслевому научно-технологическому использованию

Из разновидностей специальных ЭМ, отличающихся функциональной однородностью или спецификой назначения, можно составить отдельные классификации, например машин и микромашин электромеханических систем автоматизации, электромехатронных преобразователей, а также микромашин электромеханических систем приборов и вычислительных устройств.

Специальные генераторы, двигатели и трансформаторы, являющиеся габаритными и металлоемкими устройствами, оказывают существенное влияние на массогабаритные и эксплуатационные показатели транспортных и других специальных механизмов, систем и устройств в целом. К активной части (АЧ) и конструкционным элементам специальных ЭМ предъявляются требования повышенной надежности, минимальных массогабаритных показателей, а также иногда и специальные требования, например электромагнитной совместимости, возможности работы при высокой влажности, повышенных температуре, давлении, наличии излучений.

В [9] отмечается, что при качке и маневрировании транспортных средств и подвижных технических систем, узлы и элементы используемых в них ЭМ воспринимают высокую нагрузку P_{Γ} от гироскопического момента M_{Γ} . Эта нагрузка зависит от угловых частот Ω и ω_{Π} соответственно вращения ротора и перемещения системы в пространстве, а также момента инерции J_R и расстояния $l_{\text{ВП}}$ между подшипниками вала ротора (рис. 2).

$$P_{\Gamma} = M_{\Gamma} / l_{\text{ВП}} = \Omega \omega_{\Pi} J_R / l_{\text{ВП}}, \quad (1)$$

где величина J_R определяется радиусами инерции r_i и массами m_i активных и конструктивных элементов общим количеством k ,

$$J_R = \sum_{i=1}^{i=k} m_i r_i^2. \quad (2)$$

Кроме дополнительной нагрузки (1) ротор, подшипниковые узлы и транспортные ЭМ в целом, должны в течение заданного ресурса и срока службы выдерживать удары, вибрации и другие действия случайного и периодического характера.

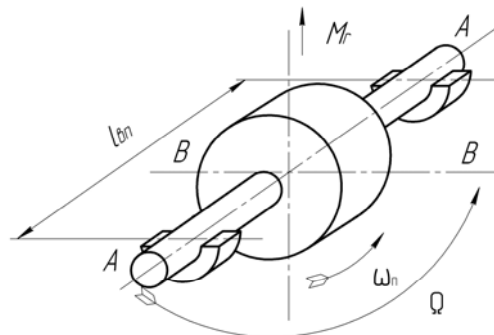


Рис. 2. Действие гироскопического момента

К некоторым АД предъявляются требования улучшенных пусковых характеристик, в частности низкой кратности пускового тока (двигатель судового подруливающего устройства), а некоторые двигатели, генераторы и трансформаторы (например, надводных и подводных кораблей) должны удовлетворять особым требованиям по виброакустическим характеристикам (ВАХ), определенным минимумам внешних магнитных полей и массогабаритных показателей.

Особенностью, отличающей аксиальные (торцевые) и обращенные ЭМ, является повышенный J_R (2) и как следствие, повышенные длительность переходных процессов и P_{Γ} (1) в приводе транспортных механизмов. В связи с этим, была выполнена разработка торцевых АД [10] и обращенных АД [11] морского назначения, отличающихся пониженным моментом инерции ротора и повышенными технико-экономическими показателями. Улучшение показателей таких АД относительно известных аналогов достигнуто на основе нетрадиционной пространственной структуры элементов АЧ с конусно-цилиндрическим (рис. 3) и конусно-плоскостным (рис. 4) магнитопроводами ротора.

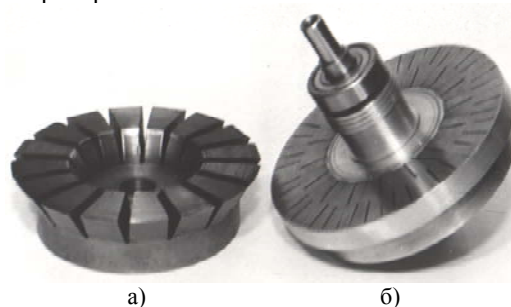


Рис. 3. Магнитопровод ротора (а) и короткозамкнутый ротор (б) торцевого двухполюсного двигателя мощностью 1,5 кВт (380 В, 50 Гц)

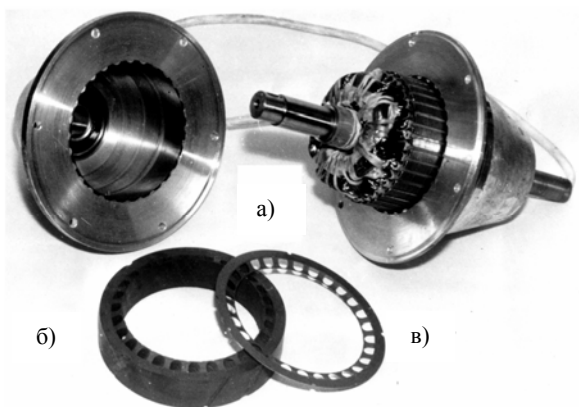


Рис. 4. Обращенный шестиполюсный двигатель со снятым полуротором (а) мощностью 0,25 кВт (380 В, 50 Гц), пакет (б) и пластина (в) магнитопровода полуротора

Одним из важных современных санитарных, технических и специальных требований, предъявляемых к электрооборудованию, является электромагнитная совместимость, в частности, уровень внешнего магнитного поля. Особенностью аксиальных структур вращающихся "торцевых" и симметричных пространственных статических ЭМ является теоретический минимум (ноль) результирующего "магнитного момента" [12].

Поэтому разработку, например трехфазного трансформатора, удовлетворяющего условиям максимальной компактности и минимума внешнего магнитного поля, можно обеспечить использованием аксиальных пространственных симметричных магнитопроводов с одноплоскостными технологическими стыками и параллельными образующими поверхностями стержней и обмоточных окон (рис. 5) [13].



Рис. 5. Трехфазный компактный трансформатор с симметричным пространственным магнитопроводом мощностью 6,3 кВ·А (660/220/18 В, 50 Гц)

Поверхности роторов некоторых специальных АД иногда непосредственно соприкасаются с рабочим органом механизма или производственным сырьём. Поэтому АД машин, работающих в агрессивной среде, должна быть защищена (герметизирована).

В связи с указанной спецификой, возможно единичное или совместное действие факторов значительных внешних динамических, электромагнитных, тепловых и механических нагрузок. Каждый из обозначенных факторов может явиться причиной преждевременного износа активных и конструктивных элементов и требует учёта при проектировании.

Другой спецификой специальных ЭМ является обеспечение функционирования наиболее сложных

автоматизированных электромеханических систем, например двух и трёхкоординатного перемещения. В таких системах применяются так называемые двух-, трёх и шестистепенные ЭМ. Двухстепенные ЭМ используются в приводах с продольно-поперечным движением и вращательно-поступательным перемещением [14, 15]. Трёх и шестистепенные ЭМ используются в приводе гироскопов космических аппаратов и содержат систему электромагнитного подвеса сферического ротора во внутренней полости сферического статора [16].

Наличие и необходимость учёта отмеченных специфических факторов и требований обуславливает повышенную сложность исследований и разработок специальных ЭМ относительно электромеханических устройств традиционных конструкций.

ДВЕ ГРУППЫ И ВОПРОС РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Разновидности специальных ЭМ (рис. 1) также можно разделить на две группы.

К первой группе относятся машины, которые по внешнему виду, конструкции и технологии изготовления существенно не отличаются от общепромышленных вращающихся "классических" ЭМ (КЭМ). Однако им присущи дополнительные специальные или улучшенные определенные стандартные показатели. Примером таких ЭМ являются машины общесудового назначения которые, в соответствии с фактором (1), отличаются повышенной прочностью конструктивных элементов, а также имеют улучшенные ВАХ и пониженные пусковые токи.

Ко второй группе относятся машины, отличающиеся от КЭМ одной или несколькими конструктивно-функциональными особенностями: типом движения, формой активных поверхностей (рабочего зазора), технологией изготовления и специфическими возможностями. Эти особенности влияют на преимущество и целесообразность применения машин второй группы и должны быть тщательно проанализированы в каждом конкретном случае.

Например, при определении необходимости разработки и использования аксиальных АД [9, 10] или АД с конусными активными поверхностями [17], необходимо учитывать возможное усложнение технологии изготовления магнитопроводов и неравномерность распределения магнитного поля в активном объёме.

Аналогично, при решении задачи замены системы КЭМ - кинематическая передача преобразования вращательного движения в поступательное перемещение на линейную ЭМ, необходимо учесть энергетический фактор. Известно, что коэффициент полезного действия и мощность линейной или линейно-колебательной машины существенно уступают аналогичным величинам КЭМ [18].

Исходя из изложенного, специальные ЭМ второй группы обеспечивают электромагнитное и электромеханическое преобразование энергии в объектах двух типов. К первому типу относятся объекты, в которых применение специальных ЭМ является единственно конструктивно или технологически возможным решением. Ко второму типу относятся объекты, технический уровень которых может быть существенно повышен на основе специальных ЭМ.

ПРИМЕР ВАРИАНТОВ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАШИН ВТОРОЙ ГРУППЫ

Особенности и перспективы применения специальных ЭМ второй группы показаны на примерах возможного усовершенствования плунжерных механизмов.

Наиболее распространенным в приводе насосов и герметичных компрессоров является встроенный двухполюсный АД вращательного движения, обеспечивающий снижение массы, габаритов и полную герметичность механизма. В герметичных холодильных компрессорах [19] роторы АД традиционной конструкции устанавливаются на консоли вертикального вала (рис. 6, а). Высокие требования по жесткости вала обуславливают увеличенный внутренний диаметр магнитопровода ротора (наружный диаметр консоли).

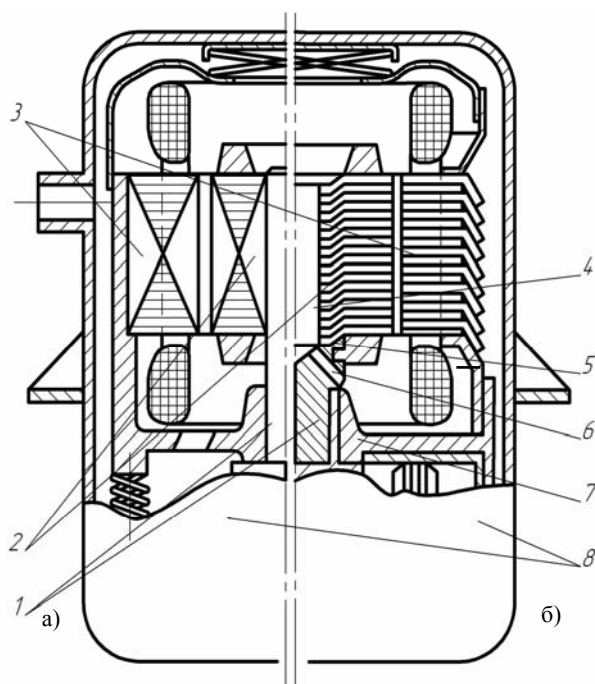
Встроенный АД охлаждается всасываемыми парами хладагента и температура участков обмотки, удаленных по ходу движения паров, повышается. Поэтому нагрев нижних лобовых частей обмотки статора на несколько градусов выше ее средней температуры. Хладагент проходит через кольцевой канал, являющийся рабочим зазором между статором и ротором. Малое сечение указанного канала создает большое аэродинамическое сопротивление на всасывании и способствует снижению холодопроизводительности компрессора. Выполнение в яре ротора дополнительных отверстий-каналов совместно с внутренним отверстием под жесткий вал приводит к завышению диаметров активных поверхностей и снижению показателей двухполюсного АД.

Отмеченные недостатки устраняются использованием ротора с осевым каналом и пространственным конусно-плоскостным магнитопроводом [4], а также с хвостовиком, соединенным с укороченным валом компрессора (рис. 6, б). Хвостовик содержит конусную поверхность контакта с торцом яра и выступы, охваченные алюминием короткозамыкающих колец ротора, что обеспечивает надежное соединение и передачу вращающего момента. Хвостовик в зоне короткозамыкающего кольца также содержит отверстия, связанные с центральным каналом магнитопровода ротора [20].

В конструкции (рис. 6, б) ребра между нагнетательными отверстиями хвостовика способствуют прокачиванию хладагента через центральный канал ротора с меньшей (относительно зазора) поверхностью теплоотдачи и обеспечивают обдув нижних лобовых частей статора. В результате интенсифицируется теплоотвод с обмотки статора и снижается аэродинамическое сопротивление на всасывании.

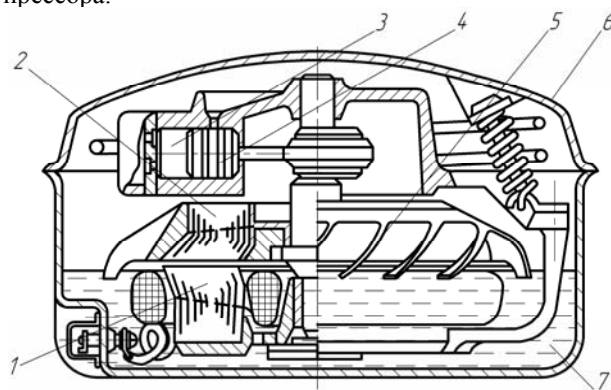
Термическое сопротивление тепловым потокам от статора в компрессоре (рис. 6, а), как и в КЭМ (статор-корпус), состоит из сопротивления яра, стыкового зазора и "юбки" блок-картера. В схеме на рис. 6, б показан статор с пространственным многоплоскостным магнитопроводом [3, 4], отличающийся повышенной площадью и "шероховатостью" наружной охлаждаемой поверхности относительно статора (рис. 6, а). Отказ от "юбки", развитая площадь и шероховатость наружной поверхности яра обеспечивают дополнительную интенсификацию теплоотвода от статора.

Представленные конструктивные решения (рис. 6, б) повышают надежность и холодопроизводительность, а также снижают материалоемкость компрессора относительно аналога (рис. 6, а).



1 – вал; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – осевой канал; 5 – хвостовик; 6 – нагнетательное отверстие; 7 – блок-картер; 8 – кожух

Другой вариант усовершенствования герметичного компрессора возможен использованием встроенного торцевого АД с нижним расположением статора в блок-картере (рис. 7). Магнитопровод статора с лобовыми частями обмотки погружен в масло. Наружное короткозамыкающее кольцо ротора содержит лопатки. При вращении указанные лопатки захватывают масло и разбрасывают его в полости кожуха. Попадая на блок цилиндров, ротор и другие элементы, брызги масла интенсифицируют теплоотвод и охлаждение компрессора. Подобное решение также способствует дегазации, повышению диэлектрических свойств масла и шумоглушению компрессора [19, 21]. Без дополнительных вспенивающих, разбрызгивающих и охлаждающих устройств достигается эффективное охлаждение и снижение размеров и материалоемкости компрессора.



1 – статор; 2 – ротор; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5 – лопатки; 6 – кожух; 7 – масляная ванна

Заманчива разработка поршневого электрокомпрессора (насоса) без кривошипно-шатунного механизма. Такая разработка затруднена проблемой инерционности и низкочастотных собственных колебаний системы якорь-шток-поршень, а также необходимостью аккумуляирования кинетической энергии в упругих элементах. Однако реализация указанной системы может быть оправдана, например, в скважинных насосах, так как исключает колонны вращающихся трубопроводов.

На рис. 8 изображена схема электронасоса [19, 22] габаритные размеры которого соответствуют размерам линейного виброэлектродвигателя с якорем-плунжером пониженной инерционности. Минимальные размеры и масса насоса могут быть обеспечены опозитным расположением неподвижных поршней и выполнением цилиндров в якоре в виде двух симметричных осевых полостей.

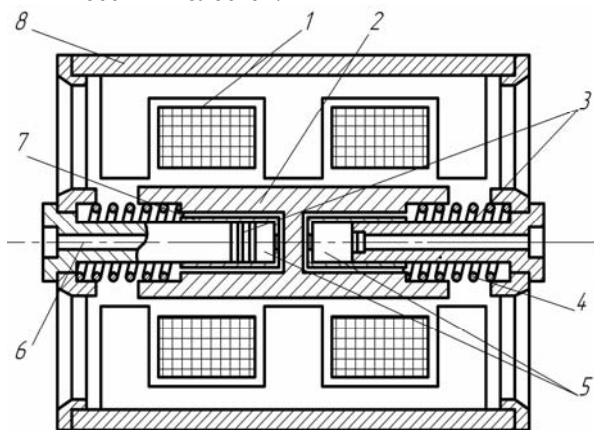


Рис. 8. Схема компрессора с линейным виброэлектродвигателем:

1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – поршень; 4 – упругий элемент; 5 – цилиндр; 6 – нагнетательный канал; 7 – всасывающий канал; 8 – корпус

Электродвигатель в насосе (рис. 8) охлаждается прокачиваемым газом (жидкостью), так как всасывающие каналы и клапаны расположены в якоре и его средней торцевой стенке между цилиндрами, а нагнетательные каналы и клапаны размещены в поршнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенных положений, разработок и предложений можно сформулировать следующее определение.

К специальным ЭМ относятся электромеханические и индукционные статические преобразователи энергии, которые отличаются конструктивным, параметрическим или определённым эксплуатационным исполнением от общепромышленных машин единых серий и предназначены для генерирования и преобразования электроэнергии, а также создания электрических сигналов и импульсов в системах, механизмах и особых условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Volkrodt W. Neue Wege im Electromaschin- enbau // *Electro-Vobr.* –1985. –S. 29-38.
 [2] Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых двигателей // *Электричество.* – 1996. – №8. – С. 37-42.
 [3] Ставинский А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики // *Электротехника і електромеханіка.* – 2004. – №1. – С. 57-61.

[4] Ставинский А.А. Проблема и нетрадиционные технические решения улучшения виброакустических характеристик асинхронных двигателей. // *Электротехника і електромеханіка.* – 2004. – №4. – С. 80-85.
 [5] Данько В.Г. Перспективні розробки турбо-генераторів з надпровідниковими обмотками // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2004. – №4. – С. 17-20.
 [6] Петрушин В.С. Современное состояние и перспективы производства регулируемых асинхронных двигателей // *Электротехника і електромеханіка.* – 2005. – №4. – С. 25-29.
 [7] Специальные электрические машины: (Источники и преобразователи энергии). Учебное пособие для вузов./ А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др.; Под ред. А.И. Бертинова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 552 с.
 [8] Шинкаренко В.Ф. Основы теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с.
 [9] Игнатов В.А., Ставинский А.А. Зависимости технико-экономических показателей торцевых асинхронных двигателей от соотношения диаметров активных частей // *Электричество.* –1984. – №6. – С. 28-34.
 [10] Ставинский А.А. Усовершенствование конструкции короткозамкнутого ротора торцевого асинхронного двигателя для привода транспортных механизмов // *Сб. научн. тр. – Киев: Институт электродинамики АН УССР.* –1988. – С. 96-103.
 [11] Ставинский А.А. Асинхронный двигатель с двухпакетным внешним ротором для привода судового встраиваемого вентилятора // *Электротехн. пр-во. Передовой опыт и науч.-техн. достижения (для внедрения: Отрасл. информ. сб. –1990. – Вип.6(30).* – С. 4-7.
 [12] Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. – Киев: 1995. – 42 с. – (Препр. /НАН Украины. Ин-т Электродинамики, № 772).
 [13] Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств // *Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю.* – Миколаїв: НУК, 2006. – С. 186-194.
 [14] Антонов А.Е. Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. – К.: ИЭД НАНУ, 2000. – 191 с.
 [15] Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода. – М.: Энергоатомиздат., 1988. – 208 с.
 [16] Милых А.Н., Барабанов В.А., Двойных Е.В. Трехступенные электрические машины. – К.: Наукова думка, 1979. – 312 с.
 [17] Гусельников Е.М., Цукерман Б.С. Само-тормозящиеся электродвигатели. – М.: Энергия, 1971. – 96 с.
 [18] Ижеля Г.И., Ребров С.А., Шаповаленко А.Г. Линейные асинхронные двигатели. – К.: Техніка, 1975. – 136 с.
 [19] Гидулян В.И., Ставинский А.А. Тенденции в развитии герметичных высокотемпературных компрессоров // *Холодильная техника.* –1987. – №6. – С. 28-32.
 [20] Короткозамкнутый ротор: Декларационный патент 29655 Украина, МКВ НО2К1/28 / А.А. Ставинский (Украина). – Оpubл. 30.06.98, Бюл. №3. – 2 с.
 [21] Герметичный холодильный компрессор: А.с.920258 СССР, МКИ F04B 39/06, F25B 31/02/ А.А. Ставинский, В.И. Гидулян (СССР). – Оpubл. 25.04.82, Бюл. №14. – 2 с.
 [22] Электромагнитный компрессор двойного действия: А.с.754107 СССР, МКИ F04B 35/04 / А.А. Ставинский (СССР). – Оpubл. 07.08.80, Бюл. №29. – 2 с.

Поступила 8.08.2007