

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTROMOTIVE SYSTEMS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

In view of the increased capacity of the SEES, as well as the needs of vessels in high maneuverability, which is caused by the use of energy-consuming power plants, the main propulsion plants driven by permanent magnet motors are considered, as well as the development of valve inductor motors of domestic and foreign manufacturers. The principle of operation of the engines of the Azipod family is almost the same, but the differences are in the applications of this engine and the total output power. Considered and opposed to each other are the main competing manufacturers of propulsion pod, such as: Azipod — which was the main emphasis, as well as the propulsion pod of the Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG, Siemens AG Marine Engineering and Mermaid by Rolls-Royce. Examples of the use of the propulsion pod of the Azipod VI family — the newest paddle module designed for operation in the hard conditions of the northern sea route, on the vessels of the Russian ship company — «Sovkomflot» are shown. The domestic developments of synchronous propulsion motors — switched reluctance drive are considered, their main difference from other types of propulsion engines is shown. At present, switched reluctance drive are produced by domestic enterprises for the coal and drilling industries, but one of these types of engines is installed in the tug, which is the first successful project of this kind. Consequently, for electromotive systems, the trend is to create a propulsion pod on the synchronous motors with permanent magnets, and with sufficient funding from Russian enterprises, there are all prerequisites for the development of domestic as in-ship electromotive complexes and based on switched reluctance drive.

Keywords: azipod, propulsion pod, traction drive motor, propulsion electrical system, switched reluctance drive, permanent magnets.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Prospects for the development of electromotive systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

УДК: 621:313:3

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Ввиду возросших мощностей судовых электроэнергетических систем, а также потребности судов в высокой маневренности, что обуславливается применением энергоемких гребных энергетических установок, рассматриваются основные движительные установки с приводом от двигателей с постоянными магнитами, а также разработки вентильных индукторных двигателей отечественных и зарубежных производителей. Принцип работы двигателей семейства Azipod практически одинаков, однако отличия заключаются в областях применения данного движителя и суммарной выходной мощностью. Проведено сравнение основных конкурирующих между собой производителей винторулевых колонок, таких как Azipod, на который был сделан основной упор, а также колонки производителей Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG, Siemens AG Marine Engineering и комплекс Mermaid от Rolls-Royce. Показаны примеры применения винторулевых колонок семейства Azipod VI — новейшего гребного модуля, предназначенного для работы в тяжелых условиях Северного морского пути, на судах российской судовой компании «Совкомфлот». Рассмотрены отечественные разработки синхронных гребных электродвигателей — вентильных двигателей, показано основное их отличие от других типов гребных двигателей. В настоящее время вентильные двигатели выпускаются отечественными предприятиями для угольной и буровой промышленности, однако один из таких типов двигателей установлен на буксир, что является первым успешным проектом такого рода. Следовательно, для систем электродвижения прослеживается

ся тенденция создания винторулевых колонок на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами, а при достаточном финансировании российских предприятий есть все предпосылки для разработки отечественных как внутрикорабельных комплексов электродвижения, так и винторулевых колонок на основе вентильно-индукторных двигателей.

Ключевые слова: Azipod, винторулевая колонка, приводной двигатель, гребная электрическая установка, вентильный двигатель, постоянные магниты.

Для цитирования:

Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 586–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-586-596.

Введение (Introduction)

Единые высоковольтные судовые электроэнергетические системы [1] – [3] (СЭЭС) с напряжением до 10000 В с системами электродвижения (СЭД) находят все большее применение на морском транспорте. Прежде всего, это обусловлено ростом мощностей СЭЭС, а также потребностью в судах с высокой манёвренностью, достигаемой применением энергоёмких гребных электрических установок (ГЭУ) и электродвигательных подруливающих устройств (ЭПУ). Для судов нового поколения в СЭД в мировой практике широко продвигаются пропульсивные комплексы, представляющие собой погружной агрегат в виде гондолы, вынесенной за корпус судна, и сочетающие в себе функции главного движителя с электрическим приводом и рулевого устройства.

Начало положено в 1987 г., когда фирма *ABB* [4], [5] предложила новую ГЭУ, названную *Azipod* (*Azimuthing Podded Drive* — азимутальный движительный привод гондольного типа). Наибольших успехов в этом направлении на мировом рынке СЭД добились следующие компании: *ABB* длительное время разрабатывает пропульсивные системы *Azipod* с диапазоном мощностей 5 – 30 МВт и системы *Compact* для мощностей 0,4 – 5 МВт; *Rolls-Royce* — аналогичные системы *Mermaid* мощностью 5 – 25 МВт в сотрудничестве [6] с компанией *Converteam*. Также большой опыт разработки пропульсивных систем большой мощности имеют компании *Schottel* — SEP (*Schottel Electric Propulsion*) и SSP (*Siemens Schottel Propulsion*). Силовые движительные электроэнергетические модули (ЭЭМ) комплектуются различными типами приводных двигателей, но в подавляющем количестве — это вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (ВДПМ).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Движительная и рулевая система *Azipod*

Принцип работы систем семейства *Azipod* практически одинаков. Различия выражаются в том, для каких типов судов предназначен данный ЭЭМ, в каких природных условиях он эксплуатируется и какова его выходная мощность. В начале 2000-х гг. на место устаревающих конструкций движителей пришел *Azipod CZ* (рис. 1) для охвата рынка в классе до 5 МВт и стал доступен в двух вариантах: движитель для кораблей и движитель буровых платформ. Упрощенная конструкция *Azipod CZ* с несколькими движущимися частями в сочетании с высокой эффективностью и минимальная потеря тяги обеспечивают *Azipod CZ* большие эксплуатационные и экономические преимущества на протяжении всего жизненного цикла. *Azipod CZ* рекламируется как уникальный подводный монтируемый модуль, отличающийся от других движителей [7] – [10] встроенным высокоэффективным электродвигателем. Пропеллер с фиксированным шагом устанавливается непосредственно на вал электродвигателя, тем самым устраняя ненужную механику, шестерни, валы и подшипники, что значительно повышает надежность.

Подчеркивается, что эффективность повышена благодаря мощным синхронным двигателям с постоянными магнитами и передаче момента на винт без редуктора — напрямую. Конструкция позволяет двигателю охлаждаться непосредственно окружающей морской водой без дополнительных охлаждающих сред. В модуле *Azipod CZ* можно оптимизировать тягу, потому что вся гондола вместе с насадкой и пропеллером может наклоняться до 7 град. к горизонту. Учитывая общую

эффективность и незначительные потери тяги, Azipod CZ требует до 13 % меньше мощности, чем механический двигатель с наклонным соплом. Для буровых платформ это означает экономию на затраты, больше места и меньший вес.

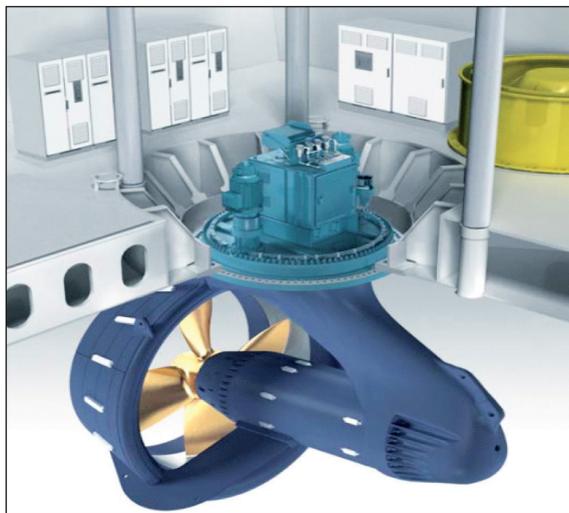


Рис. 1. Двигательный модуль Azipod CZ

Для российского рынка актуален Azipod серии VI — модификация классического продукта Azipod для работы во льдах. Наиболее очевидным преимуществом гребной установки на ледокольных судах является крутящий момент электрического двигателя. Электрический двигатель и сопряженный преобразователь частоты могут проектироваться с максимальным крутящим моментом при низких частотах вращения гребного винта и даже при его остановке. Здесь, как и в подавляющем большинстве модулей семейства Azipod, установлен ВДПМ. Мощность ГЭУ для Azipod этой серии варьируется от 6 до 21 МВт. Отсутствие механической связи между силовой [11] – [12] установкой и электрическим двигателем, приводящим в движение гребной винт, дает возможность создания оптимальной движительной установки для ледокола. Гребной электродвигатель (ГЭД), используемый на Azipod серии VI, способен передавать 100 % мощности на винт в условиях испытаний при работе на швартовых. Если требуется для ледовых операций, ГЭД может иметь размеры, подходящие для циклической по моменту работы.

Конструкция Azipod VI предлагает следующие преимущества:

- повышенная маневренность в тяжелых ледовых условиях (возможность поворота на 360°) обеспечивает полный крутящий момент и тягу в любом направлении, а также при обратном ходе;
- надежная механическая конструкция (один короткий вал и отсутствие конических передач) означает, что максимальный крутящий момент электрического двигателя может полностью использоваться без механических ограничений;
- прочность и жесткость (корпус Azipod с рамной конструкцией [13] – [16]) выдерживает высокие ударные нагрузки при работе во льдах. Жесткий валопровод снижает риск резонанса во время дробления льда;
- свобода при разработке проекта судна (Azipod обеспечивает большую гибкость проекта и возможность экономии объемов в корме судна).

Данные комплексы установлены на танкеры-снабженцы «Тимофей Гуженко», «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров». Мощность их ГЭД в среднем составляет от 2 до 10 МВт.

Фирма *ABB* представила инновационное решение в виде нового поколения Azipod XO. На первый взгляд Azipod XO не сильно отличается от предыдущей модели, но отметим из новшеств замену гидравлического рулевого управления полностью электрической рулевой системой. Каждый из четырех электродвигателей имеет специальный рулевой привод, тем самым перейдя на новый уровень резервирования системы. Azipod XO отличается более легкой уста-

новкой комплекса в целом, улучшенной эффективностью, сокращением технического обслуживания и меньшими шумом и вибрацией. Рулевой модуль спроектирован так, что уплотнение может обслуживаться с корабля на плаву, в зависимости от расположения ватерлинии судна. Движительный модуль включает в себя уже традиционно ВДПМ и винт фиксированного шага непосредственно на валу двигателя. Считается, что улучшения сокращают до 50 % затрат на жизненный цикл.

Следует отметить современную разработку пропульсивной системы (SSP) немецкими фирмами *Schottel-Werft Josef Becker GmbH & Co. KG* и *Siemens AG Marine Engineering*. Она отличается от Azipod использованием двойного винта Schottel, а ГЭД — опять же ВДПМ на гребном валу в обтекаемой гондоле. Гондола — элемент конструкции с двумя стабилизаторами (крылья авиационного профиля), за счет которых рекламируемая эффективность пропульсивной системы SSP на 20 % выше эффективности стандартных винторулевых колонок (ВРК).

В пропульсивных комплексах *Rolls-Royce* типа Mermaid встроенный электродвигатель также находится непосредственно на валу, экономя пространство и устраняя необходимость в редукционной передаче. Отмечается, что высокоэффективно регулируемый электродвигатель позволяет обходиться винтом фиксированного шага — малозумной конструкцией с низкой вибрацией. Он поставляется в виде цельного винта или отдельно лезвиями, которые могут легко заменяться в случае повреждения. Также прослеживается тенденция перехода от асинхронного двигателя к ВДПМ.

Отечественные системы электродвижения с вентильными двигателями

Концепция создания полностью электрических кораблей овладела умами инженеров-проектировщиков подводных и надводных кораблей всего мира и в основном обоснована следующими факторами:

- значительный постоянный рост потребления электроэнергии на корабле;
- внедрение на кораблях современных и перспективных электроэнергоёмких систем;
- экономия топлива;
- снижение водоизмещения;
- сокращение численности экипажа;
- возможность создания систем полного электродвижения на мощных гребных высокоэффективных всережимных ЭД в связи с бурным развитием микропроцессорных систем и мощных электронных ключей (IGBT-транзисторы, IGST-тиристоры и др.).

В части полного электродвижения следует отметить, что оно априори присутствует на дизель-электрических подводных лодках (ДЭПЛ) с основным источником питания — аккумуляторной батареей, и целесообразно к внедрению на надводных кораблях, эксплуатирующихся основное время на средней и полной мощности. Так, например, ледоколы характеризуются длительными и маневренными режимами, при этом длительность работы с переменными нагрузками на винтах (работа во льдах) может достигать 80 % общей продолжительности навигации, а работа в особо тяжелых условиях — до 50 % продолжительности навигации. При этом моменты сопротивления на гребном валу меняются в очень широком диапазоне: от характеристики хода в свободной воде до швартовой и работы на мелководье. Поэтому этот класс судов наиболее тяготеет к полному электродвижению.

Отечественный опыт создания всережимной машины [17] – [18] на базе ВДПМ начался в 1980-х гг. для ДЭПЛ с создания макетного образца 75 кВт и продолжился поставкой завода «Электросила» в кооперации с НИИ ЭФА и «Новой Эрой» (все предприятия находятся в Санкт-Петербурге) на головную лодку 4-го поколения двигателя (рис. 2) мощностью порядка 4 МВт и 200 об/мин. Вскоре сказалась неотработанность конструкции на макетном образце, и ГЭД вместе с кораблем отправился в опытную эксплуатацию. «Электросила» тем временем приступила [19] – [21] к созданию следующей итерации ВДПМ, и работы продолжились с очередными трудностями.



Рис. 2. ВДПМ мощностью 4 МВт со снятой крышкой на стенде «Новой Эры» — видны встроенные в корпус силовые полупроводниковые блоки

Параллельным курсом шли многие морские страны, и теперь широко известны ВДПМ в качестве ГЭД фирмы *Siemens* — Германия (3 МВт, 120 мин⁻¹ для ПЛ типа 212), модификации поставляются в Грецию, Италию, Корею. Серийно поставляются машины Magnet-Motor — Германия (4,3 МВт, 150 мин⁻¹ для опытного военного корабля); ABB Industria (4,3 МВт, 150 мин⁻¹ для итальянских ВМС), Jeumont Electric — Франция (1,8 МВт для ПЛ Scorpene, СЭД 3 и 4,5 МВт при 120 мин⁻¹) и др.

На атомных ледоколах 3-го поколения [22] – [23] «Таймыр» и «Вайгач» установлены ГЭД переменного тока синхронного типа (вентильные двигатели), которые обладают значительными преимуществами перед предшественниками — двигателями постоянного тока. Но у синхронных двигателей демпферная обмотка обеспечивает пуск и демпфирование качаний ротора. Эти функции в частотно регулируемых электроприводах с синхронными двигателями отпадают, и демпферная обмотка наоборот оказывает вредное влияние:

- возрастают пульсации токов якоря и возбуждения;
- увеличивается зона прерывистых токов и ухудшается форма токов якоря;
- снижается надежность двигателя.

На обоих ледоколах еще с периода постройки [24] – [27] отмечены многочисленные случаи повреждения демпферных обмоток: поломка шпилек крепления обмоток, а позже обнаружались обрывы стержней самих демпферных обмоток. Поломки шпилек специалисты отнесли к конструкторским просчетам, их необходимо изготавливать более прочными. Обрывы стержней демпферной обмотки носили системный характер и были связаны с выбором синхронной машины в составе частотно регулируемого электропривода. Применение одноякорной синхронной машины для повышения надежности не подтвердилось опытом эксплуатации. Поэтому в проекте 22220 ледокола «Арктика» в качестве ГЭД установлен двигатель мощностью 2×10 МВт, асинхронный с короткозамкнутым ротором, двухъякорный, с двумя трёхфазными обмотками на каждом статоре, производства «Русэлпром» (г. Санкт-Петербург), и рассчитанный на питание от ПЧ, регулируемым методом широтно-импульсной модуляции. Система повышает, в сравнении с предыдущим вариантом, живучесть ледокола в условиях арктического плавания, несмотря на некоторое усложнение схемы главного тока, системы регулирования и защиты.

Асинхронный двигатель консервативно заложен в техническом проекте фирмой *Converteam* (несмотря на то, что эта фирма активно способствует продвижению, например, индукционных

двигателей мощностью 20 МВт) на авианосец «Queen Elizabeth». Известно о НИР по разработке ВРК мощностью до 7,5 МВт для ледокола-снабженца, выполненной в 2016 г. ПИУЦ «Сапфир» по договору с НК «Роснефть» и «ДЖИИ Энерджи Пауэр Конвершн Текнолоджи Лимитед». В результате рассмотрения [28] и необоснованного сравнения с одним только традиционным синхронным двигателем предпочтение отдано асинхронному двигателю. При этом приводятся весьма спорные преимущества выбранного варианта по сравнению с ВДПМ.

Состояние разработок вентильных индукторных двигателей

В связи с эволюцией в электронике и совершенствованием методик управления новое развитие получили вентильные индукторные двигатели (ВИД), в настоящее [29] время имеющие слабое развитие в судостроении. В настоящее время ВИД (за рубежом SRD) являются одной из главных новейших технологий в области конструирования приводов с регулируемой скоростью. Достоинствами индукторных машин [30] – [32] (ИМ) являются простота конструкции ротора, высокая надежность, хорошее регулирование и работоспособность в сложных окружающих условиях. У них много преимуществ с точки зрения КПД, плотности мощности, плотности момента, веса, объема, прочности конструкции и эксплуатационной гибкости.

Мировым лидером в разработке и внедрении Switched Reluctance Drive (коммутируемый реактивный электропривод) малой и средней мощности является японская компания *Nidec Corporation*, которая в 2010 г. приобрела американскую компанию *Emerson Motor* и предлагает на рынок линейку промышленных SRD малой и средней мощности 14,7 – 308,7 кВт на номинальные частоты вращения 1000, 1800, 3600 и 4500 об/мин с перегрузочной способностью 110 %, 150 % и 250 %.

С 2012 г. фирма «ВИЭМ», г. Новочеркасск, при участии учёных [33] – [35] и специалистов ЮРГПУ (НПИ) ведёт разработку ВИП большой мощности для Сибирской угольной энергетической компании, которой сданы в эксплуатацию групповые регулируемые, суммарной мощностью 15 МВт (12 шт.) с системой автоматизации для замены существующих нерегулируемых асинхронных двигателей с фазным ротором мощностью 1600 кВт на регулируемые индукторные двигатели меньшей мощности 1250 кВт.

Работы по созданию гребного индукторного двигателя начались в ЗАО «ИРИС», г. Новочеркасск, в 2008 г. (если не считать созданного ранее макетного образца 500 кВт (рис. 3), позволившего с уверенностью судить о возможности реализации машины 10-кратной мощности). Одновременно выполнен техпроект на ВИД 4 МВт с ориентацией на замену ВДПМ на ДЭПЛ [36].

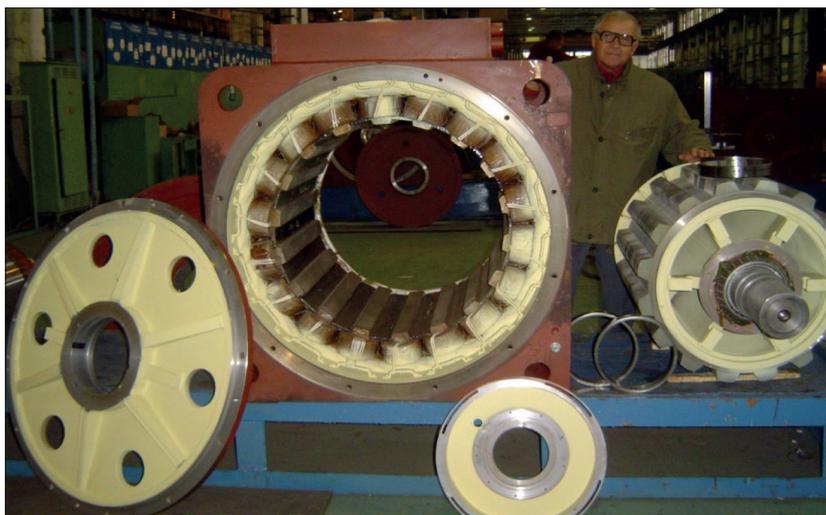


Рис. 3. ВИД 500 кВт в разобранном виде на стенде предприятия «Ирис», г. Новочеркасск

По заданию головного исполнителя по разработке электрооборудования и систем управления для морского буксира проекта 745МБС — ЦНИИ СЭТ (после неоднократных докладов одним

из авторов статьи руководству института о перспективности направления) в «Ирисе» создан судовой агрегат ИД. Испытания двигателя в Новочеркасске весной 2010 г. были проведены при 50 % нагрузке методом [37], [38] самонагружения, который реализован благодаря двухпакетной конструкции шестифазного ИД. За счёт возврата электрической энергии, вырабатываемой генераторной частью, не требуется сеть большой мощности, так как из нее потребляется мощность только для компенсации потерь в преобразователе и машине. Испытания при 50 % нагрузке [39] (ограничение обусловлено мощностью преобразователей) подтвердили достаточность резерва для обеспечения проектной мощности в 2 МВт при частоте вращения 200 мин.

Таким образом, все высокие требования к СЭД реализованы на морском буксире проекта 745МБС «Виктор Конецкий» (рис. 4) путём внедрения ВИП 2 МВт. От экипажа судна поступают только положительные [40] отзывы по результатам эксплуатации. Следует отметить также надежную эксплуатацию ряда вспомогательных ВИП, даже высокоскоростных, различной мощности и назначения на современной ДЭПЛ.

Предварительные оценки подтверждают возможность создания гребных электродвигателей (ГЭД) и ВРК на основе ВИД в габаритах существующих систем на ВДПМ и АД.

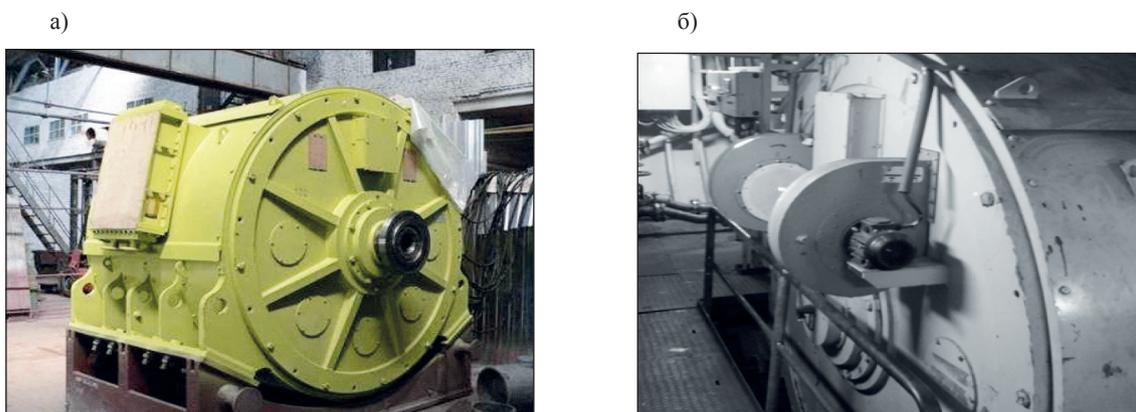


Рис. 4. ВИД 2 МВт на стенде (а) и на корме (б) морского буксира «Виктор Конецкий»

Можно констатировать, что работы по ВИД большой мощности начаты значительно позже старта создания ВДПМ, но имеют более впечатляющие результаты.

Многочисленные экспертные и многокритериальные оценки ВДПМ и ВИД показывают в целом [41] равноценную перспективность этих машин, но нельзя не заметить, что такие параметры ВИД, как простота, низкая стоимость, надежность и ремонтпригодность придают решающий вес склонению ВИД для морского применения по рассматриваемой тематике.

Выводы (Conclusion)

1. Для систем электродвижения малой и средней мощности в мировом судостроении прослеживается тенденция создания ВРК на базе ВДПМ.
2. Для СЭД большой мощности сохраняется разнотипность установки электрических машин.
3. Подтверждена эксплуатацией различных топологий индукторных машин возможность и целесообразность разработки отечественных конкурентоспособных как комплексов электродвижения, расположенных внутри судна, так и ВРК на основе ВИД при правильной организации кооперации предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы:

дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

2. АBB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://new.abb.com/> (дата обращения: 01.04.2018).

3. Кузнецов В. И. Бестрансформаторные единые электроэнергетические системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. И. Кузнецов. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 159 с.

4. Библиотека фирмы АBB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://library.e.abb.com> (дата обращения: 05.04.2018).

5. Никифоров Б. В. Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.

6. Дядик А. Н. Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

7. Дарьенков А. Б. Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков, Г. М. Мирясов, В. Г. Титов [и др.]. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 219 с.

8. Высоцкий В. Е. Электромеханические процессы в вентильном двигателе с постоянными магнитами / В. Е. Высоцкий, А. П. Сеницын, С. А. Тарашев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2010. — № 2 (27). — С. 139–144.

9. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 23–33.

10. Лагода Ф. И. Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

11. Быков А. С. Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.

12. Никифоров Б. В. Перспективы применения вентильных индукторных приводов в составе СЭД ДЭПЛ / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения. — Новочеркасск: Лик, ЮРГТУ. — С. 11–16.

13. Emadi A. Energy-Efficient Electric Motors / A. Emadi. — New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. — 406 p.

14. Дядик А. Н. Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

15. Никифоров Б. В. Аккумуляторные батареи подводных аппаратов / Б. В. Никифоров, А. И. Русин. — Новочеркасск: Колорит, 2011. — 162 с.

16. Силовая электроника корабельных электротехнических комплексов: учеб. пособие / под ред. Б. В. Никифорова. — Новочеркасск: Колорит, 2006. — 411 с.

17. Никифоров Б. В. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов / Б. В. Никифоров, С. А. Пахомин, Г. К. Птах // Электричество. — 2007. — № 2. — С. 34–38.

18. Никифоров Б. В. Исследование вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Электротехника. — 2007. — № 6. — С. 24а–33.

19. Никифоров Б. В. Развитие систем электропривода подводных лодок (в порядке обсуждения) / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5. — С. 23–25.

20. Proverbs J. Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development / J. Proverbs, S. Colyer, T. Cox, J. F. Eastham // IEEE transaction on Magnetics. — 2010. — Vol. 46. — Is. 12. — Pp. 57–59.

21. Petersen L. J. Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation / L. J. Petersen, D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, S. B. Swindler // Naval Engineers Journal. — 2010. — Vol. 122. — Is. 4. — Pp. 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x.

22. Ehrhart P. The all-electric ship: ready to take over? / P. Ehrhart // Naval Forces. — 2011. — Vol. XXXII. — Pp. 41–45.

23. Letellier P. H. Power Permanent Magnet Machines for Electric Propulsion Drives / P. H. Letellier // Материалы 3 международного симпозиума: All electric ship civil or military (AES 2000). — Париж, 2000. — С. 26–27.

24. Jamai H. Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit / H. Jamai, M. Kaneda, K. Ohyama, Y. Takeda, N. Matsai. — IEEE INTECH, 2000. — Pp. 98–101.

25. Buckingham J. Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit / J. Buckingham, C. Hodge, T. Hardy. — Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008. — 17 p.

26. *Зайцев А. А.* Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. — СПб.: Изд-во ПГУПС, 2010. — 60 с.
27. *Никифоров Б. В.* Применение системы электродвижения на ПЛ / Б. В. Никифоров // *Электричество*. — 2001. — № 8. — С. 121–123.
28. *Никифоров Б. В.* Корабельные системы электродвижения: дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Никифоров. — СПб.: ЦКБ Морской техники «РУБИН», 2006. — 311 с.
29. *Григорьев А. В.* Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока / А. В. Григорьев, К. С. Ляпидов, Л. С. Макаров // *Судостроение*. — 2006. — № 4. — С. 33–34.
30. Пат. 2324272 Российская Федерация, МПК Н 02 J 9/06. Интеллектуальный преобразователь напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки / В. Е. Апииков, К. С. Ляпидов, О. Е. Лозицкий, Б. В. Никифоров; заяв. и патентообл. Центральное конструкторское бюро морской техники «РУБИН», ЗАО «ИРИС», ФГУП «Производственно-конструкторское предприятие «ИРИС»». — № 2006120505/09; заявл. 13.06.2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.
31. *Mitcham A. J.* Motors and drives for surface ship propulsion: comparison of technologies / A. J. Mitcham, J. J. A. Cullen // *Proc. 1995 Electric Propulsion Conf.* — 1995. — Vol. 4. — Pp. 88–89.
32. *Letellier P.* Electrical propulsion motors / P. Letellier // *Electric Propulsion. The Effective Solution*. — London: IMarE, 1995. — P. 7.
33. *Никифоров Б. В.* Создание корабельных систем электродвижения с вентильно-индукторным электроприводом / Б. В. Никифоров, А. П. Темирёв, О. Е. Лозицкий // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. — 2007. — № 4. — С. 62–66.
34. *Ericson T.* Power electronics and future ships electrical system / T. Ericson, N. Hingorani, Yu. Khersonsky // *IEEE Transactions of industry applications*. — 2006. — Vol. 42. — Is. 1. — Pp. 76–79.
35. *Ehrhart P.* MM technologies and application at ships generators and motors / P. Ehrhart, L. Sozzi // *Developing Benefits for Maritime Applications*. — 1998. — P. 2.
36. Авт. св. № 332499. Асинхронный генератор в ЭЭС / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов; опубл. 08.01.91.
37. Пат. 2237338 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/06, Н 02 К 1/06. Индукторный двигатель / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов, [и др.]; заяв. и патентообл. ДГУП «Конструкторское бюро приборостроения ФГУП» ПКП «ИРИС». — № 2002119797/09; заявл. 22.07.2002; опубл. 27.09.2004, Бюл. № 27.
38. Пат. 2343615 Российская Федерация, МПК Н02J 9/06. Реверсивный преобразователь напряжения для передачи электроэнергии между сетями переменного и постоянного тока / А. В. Архипов, К. С. Ляпидов, Б. В. Никифоров, [и др.]; заяв. и патентообл. закрытое акционерное общество «ИРИС». — № 2007143397/09; заявл. 22.11.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
39. *Klockow B.* Electric roads / B. Klockow, H. Biesenack, M. Herzog // *Elektrische Bahnen*. — 2003. — № 3. — Pp. 107–112.
40. *Cooke R.* Integrating external drive actuation systems into the submarine. UDT / R. Cooke. — 2010. — 157 p.
41. *Дядик А. Н.* Использование электрохимических генераторов на кораблях / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — СПб.: Изд. СПб ГМТУ, 2011. — 340 с.

REFERENCES

1. Egorov, L.E. Komp'yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol'noi sudovoi elektro-energeticheskoi sistemy s propul'sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal'nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S.O. Makarova», 2014.
2. ABB. Web. 1 Apr. 2018 <<http://new.abb.com/>>.
3. Kuznetsov, V.I. Bestransformatornye edinye elektroenergeticheskie sistemy. PhD diss. SPb.: SPBGMTU, 2015.
4. Biblioteka firmy ABB. Web. 5 Apr. 2018. <<https://library.e.abb.com/>>.
5. Nikiforov, B.V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.
6. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novocherkassk: Izd. Kolorit, 2012.
7. Dar'enkoy, A.B., G.M. Miryasov, V.G. Titov, M.N. Okhotnikov, and D.V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.

8. Vysotsky, V.E., A.P. Sinicin, and S.A. Tarashev. "Electromechanical processes in ventil engine with constant magnets." *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 2(27) (2010): 139–144.
9. Ptakh, G.K. "Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.3 (2015): 23–33.
10. Lagoda, F.I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.
11. Bykov, A.C., V.A. Malyshev, and V.V. Romanovskii. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov*. SPb.: Elmor, 2004.
12. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Perspektivy primeneniya ventil'nykh induktornykh privodov v sostave SED DEPL." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i komplekсы spetsial'nogo naznacheniya*. Novochoerkassk: Izd. Lik, YuRGU. 11–16.
13. Emadi, A. *Energy-Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
14. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novochoerkassk: Izd. «Kolorit», 2012.
15. Nikiforov, B.V., and A.I. Rusin. *Akkumulyatornye batarei podvodnykh apparatov*. Novochoerkassk: Izd. «Kolorit», 2011.
16. Nikiforov, B.V., ed. *Silovaya elektronika korabel'nykh elektrotekhnicheskikh kompleksov. Uchebnoe posobie*. Novochoerkassk, 2006.
17. Nikiforov, B.V., S.A. Pakhomin, and G.K. Ptakh. "Switched Reluctance Motors for Traction Electric Drives." *Electrical Technology Russia* 2 (2007): 34–38.
18. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Studies of an AC converter-fed motor incorporated in a pump unit." *Russian Electrical Engineering* 78.6 (2007): 298–305. DOI: 10.3103/S1068371207060065
19. Nikiforov, B.V. "Evolution of electric propulsion systems for submarines." *Sudostroenie* 5 (1999): 23–25.
20. Proverbs, J., S. Colyer, T. Cox, and J. F. Eastham. "Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development." *IEEE transaction on Magnetics* 46.12 (2010): 57–59.
21. Petersen, Lynn J., D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, and S. B. Swindler. "Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation." *Naval Engineers Journal* 122.4 (2010): 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x
22. Ehrhart, P. "The all-electric ship: ready to take over?." *Naval Forces XXXII* (2011): 41–45.
23. Letellier, P.H. "Power Permanent Magnet Machines for Electric Propulsion Drives." *All electric ship civil or military (AES 2000)*. Paris, 2000. 26–27.
24. Jamai, H., M. Kaneda, K. Ohya, Y. Takeda, and N. Matsai. "Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit." *IEEE*, 2000. 98–101.
25. Buckingham, J., C. Hodge, and T. Hardy. *Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit*. Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008.
26. Zaitsev, A.A., G.N. Talashkin, and Ya.V. Sokolova. *Transport na magnitnom podvese*. SPb.: PGUPS, 2010.
27. Nikiforov, B.V. "Primenenie sistemy elektrodvizheniya na PL." *Electrical Technology Russia* 8 (2001): 121–123.
28. Nikiforov, B.V. *Korabel'nye sistemy elektrodvizheniya*. Dr. diss. SPb.: 2006.
29. Grygoriev, A.V., K.S. Lyapidov, and L.S. Makarov. "Unified hydrographic ship's electric power plant based on the alternating current motion system." *Sudostroenie* 4 (2006): 33–34.
30. Apikov, V.E., K.S. Lyapidov, O.E. Lozitskii, and B. V. Nikiforov. RU 2 324 272 C2, IPC H 02 J 9/06. *Intellektual'nyi preobrazovatel' napryazheniya postoyannogo toka dlya dinamicheski izmenyayushchiesya nagruzki*. Russian Federation, assignee. Publ. 10 May 2008.
31. Mitcham, A. J., and J. J. A. Cullen. "Motors and drives for surface ship propulsion: comparison of technologies." *Proc. 1995 Electric Propulsion Conf.* Vol. 4. 1995. 88–89.
32. Letellier, P. "Electrical propulsion motors." *Electric Propulsion. The Effective Solution*. Paper 7. London: IMarE, 1995.
33. Nikiforov, B.V., A.P. Temirev, and O.E. Lozitskii. "Sozdanie korabel'nykh sistem elektrodvizheniya s ventil'no-induktornym elektroprivodom." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 4 (2007): 62–66.

34. Ericson, T., N. Hingorani, and Yu. Khersonsky. "Power electronics and future ships electrical system." *IEEE Transactions of industry applications* 42.1 (2006): 76–79
35. Ehrhart, P., and L. Sozzi. "MM technologies and application at ships generators and motors." *Developing Benefits for Maritime Applications*. 1998. Paper 2.
36. Nikiforov, B.V., and V.N. Davydov. № 332499. Asinkhronnyi generator v EES. USSR, assignee. Publ. 8 Jan. 1991.
37. Nikiforov, B.V., V.N. Davydov, et al. RU 2 237 338 C2, IPC H 02 K 19/06, H 02 K 1/06. Induktorni dvi-gatel'. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2004.
38. Arkhipov, A. V., K. S. Lyapudov, B.V. Nikiforov, et al. RU 2 343 615 C1, IPC H 02 J 9/06. Reversivnyi preobrazovatel' napryazheniya dlya peredachi elektroenergii mezhdru setyami peremennogo i postoyannogo toka. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Jan. 2009.
39. Klockow, Biesenack H., and Herzog M. "Electric roads." *Elektrische Bahnen* 3 (2003): 107–112.
40. Cooke, Richard. *Integrating external drive actuation systems into the submarine*. UDT. 2010.
41. Dyadik, A.N., and B.V. Nikiforov. *Ispol'zovanie elektrokhimicheskikh generatorov na korablyakh*. SPb.: Izd. SPb GMTU, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Романовский Виктор Викторович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Никифоров Борис Владимирович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Макаров Арсений Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor V. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: kaf_edas@gumrf.ru

Nikiforov, Boris V. — Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: boris.nic-b@yandex.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Makarov, Arsenii M. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovsky, Viktor V.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: makar_tnt@mail.ru, kaf_edas@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2018 г.
Received: April 24, 2018.