

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE DESIGN ELECTRIC POWER SYSTEMS OF DEEP WATER UNDERWATER APPARATUS

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

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

The article discusses deep-water apparatus designed for an immersion depth from 2,000 to 6,000 m, its design characteristics and layout of the main parts. The apparatus have contours close to the body of rotation with a horizontal axis. In order to simplify the systems and reduce their cost, electric drives are introduced as widely as possible, the hydraulic system is minimized. Electrical power system of direct current, providing electricity to all consumers of the apparatus is considered. As a power source have proposed lithium-ion batteries, which are currently at an early stage of development, but with high potential for improvement. The propulsion complex consists from switched reluctance drives and the backup version is electric motors with permanent magnets on the rotor. For the first have shown the main ways of controlling the movement of the apparatus: changing the rotational speed of the sustainer electric motors, including their work "at odds", as well as the use of rudders or rotary profiled grids installed in the jet of each sustainer motors. The light sources for exterior and interior lighting with built-in LEDs are preferred and promising as light sources, and their advantages as compared to lamps with traditional lamps are shown. The main characteristics of the outdoor lighting system, photo-video and television systems; emergency lighting in the habitable area is provided by LED lights with built-in batteries. The paper proposes a developed compact electric power system for a habitable deep-water apparatus on modern domestic high-tech electrical equipment.

Keywords: deep-water apparatus, switched reluctance drive, batteries, propulsion, LED.

For citation:

Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Selection and justification of the design electric power systems of deep water underwater apparatus." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1277–1287. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287.

УДК 621:313:3

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЛУБОКОВОДНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

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

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

В статье рассмотрен глубоководный аппарат, рассчитанный на глубину погружения от 2000 до 6000 м, его проектные характеристики и компоновка основных узлов. Аппарат имеет обводы корпуса, близкие к телу вращения с горизонтальной осью. Упрощение систем и снижение их стоимости позволяет максимально широко внедрять электроприводы, а систему гидравлики минимизировать. Рассматривается электроэнергетическая система постоянного тока, обеспечивающая электроэнергией всех потребителей аппарата. В качестве источника питания выбран вариант литий-ионных аккумуляторных батарей, находящихся в данный момент на ранней стадии развития, но обладающих высоким потенциалом для совершенствования. Двигательно-движительный комплекс состоит из вентильных индукторных двигателей, а резервный вариант — из электродвигателей с постоянными магнитами на роторе. Для первых описаны основные способы управления движением аппарата: изменение частоты вращения маршевых электродвигателей, включая их работу «вразнобой», а также использование рулей или поворотных профилированных решеток, установленных в струе каждого из маршевых электродвигателей. Отмечается, что в качестве источников света предпочтительными и перспективными являются светильники наружного и внутреннего освещения со встроенными светодиодами, показаны их

преимущества по сравнению со светильниками с традиционными лампами. Рассмотрены основные характеристики системы наружного освещения, фотовидео съемки и системы телевидения; аварийное освещение в обитаемой сфере обеспечивается светодиодными светильниками со встроенными аккумуляторами. В статье предложена разработанная компактная электроэнергетическая система для обитаемого глубоководного аппарата на современном отечественном наукоемком электрооборудовании.

Ключевые слова: глубоководный аппарат, вентильно-индукторный двигатель, аккумуляторные батареи, движитель, светодиод.

Для цитирования:

Романовский В. В. Выбор и обоснование конструкции электроэнергетических систем глубоководного подводного аппарата / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1277–1287. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287.

Введение (Introduction)

Большая часть глубоководных аппаратов рассчитана на глубину погружения в 2000–3000 м, на глубину до 6000 м — значительно меньшая их часть. На максимальную океанскую глубину в 11 км изготовлены лишь два батискафа: Trieste (до модернизации) и Archimede. Это связано с реальными потребностями в изучении и освоении океана — более 95 % площади океанского дна находится на глубине до 6000 м. В 1990 гг. наблюдался непрерывный рост функциональности необитаемых систем, а также расширение их номенклатуры [1]–[3]. Минимизация размеров, веса и энергопотребления средств наблюдения, навигации и другого оборудования позволили создавать более компактные и многофункциональные аппараты. Наиболее освоенной зоной Мирового океана является шельфовая зона с глубинами 400–700 м, на которых ведутся различные работы коммерческого характера, в первую очередь, направленные на обеспечение добычи нефти и газа.

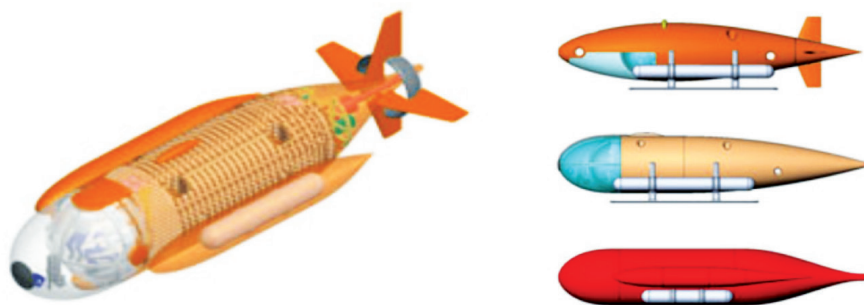


Рис. 1. Аппарат DeepSearch

«Ниша» по строительству обитаемых исследовательских аппаратов, рассчитанных на предельные глубины океана, на сегодняшний день остается свободной. Исключением является компания *Deep Ocean Exploration and Research*, ведущая проектные работы по созданию обитаемого подводного аппарата DeepSearch (рис. 1) с глубиной погружения в 11000 м. В связи с этим была поставлена задача разработать проектные характеристики, электроэнергетическую систему и движительный комплекс глубоководного обитаемого подводного аппарата, способного выполнять исследования на глубине до 6000 м в течение продолжительного периода времени и отвечающего основным международным требованиям безопасности.

Методы и материалы (Methods and materials)

Проектные характеристики глубоководного аппарата. Опыт эксплуатации обитаемых аппаратов показывает, что наилучшие условия работы операторов соблюдаются при размещении обитаемой сферы, манипуляторов, средств освещения обстановки и других рабочих средств в носовой части аппарата [4]–[6]. В связи с этим архитектурный облик аппарата с предлагаемой электроэнергетической системой (ЭЭС) в целом должен соответствовать хорошо зарекомендовавшему

себя аппарату «Мир» (1980 г.) — рис. 2.. В связи с сохраняющимся устойчивым спросом Китая, Индии и Вьетнама на обитаемые аппараты с глубиной погружения до 6000 м в данной работе обобщение ЭЭС предлагается именно для этой глубины.



Рис. 2. Аппараты «Мир»

Аппарат должен иметь обводы, близкие к телу вращения с горизонтальной осью. Цилиндрическая вставка должна составлять свыше половины длины аппарата. Прочные объемы должны быть выполнены из титанового сплава категории прочности 1100 МПа [7]–[9]. Внутренний диаметр обитаемой сферы равен 2000 мм, что позволит создать относительно комфортные условия для размещения и работы в нем трех человек, а также для размещения необходимой аппаратуры и систем. В сферу с иллюминаторами из кварцевого стекла доступ обеспечивается через люк. Внутренний диаметр прочной сферы для аккумуляторной батареи (АБ) составит 1000 мм. Установка «сухой» батареи вместо маслозаполненной позволит снизить затраты на разработку батареи, а также упростить ее обслуживание и замену.

В целях упрощения систем и снижения их стоимости максимально широко внедряются электроприводы (наметившаяся тенденция строительства полностью электрических судов при этом не должна стать исключением), система гидравлики минимизирована. Полное исключение гидравлики является желательным [10], но это возможно лишь после решения сложной и дорогостоящей задачи создания электроприводов манипуляторного устройства.

Маневрирование в горизонтальной плоскости осуществляется при помощи двух неповоротных маршевых электродвигателей (ЭД), вертикальное перемещение достигается работой двух вертикальных ЭД. Применение неповоротных двигателей способствует снижению стоимости двигательного комплекса в основном за счет минимизации требований к системе гидравлики, а также повышает надежность его функционирования [11]. Маневрирование аппаратом и всеми бортовыми системами производится посредством единой автоматизированной системы управления (СУ).

Сеть распределения электроэнергии. Предлагаемая ЭЭС постоянного тока (рис. 3) обеспечивает электроэнергией потребителей аппарата во всех режимах эксплуатации, в том числе в аварийном.

ЭЭС управляется интегрированной СУ техническими средствами аппарата. Электропитание двигательного комплекса, вспомогательных механизмов и устройств обеспечивается от основной АБ напряжением 175–320 В. Радиоэлектронная аппаратура, приборы [12]–[13] различных систем и системы жизнеобеспечения подключаются к вспомогательной и аварийной АБ напряжением 24–33 В.

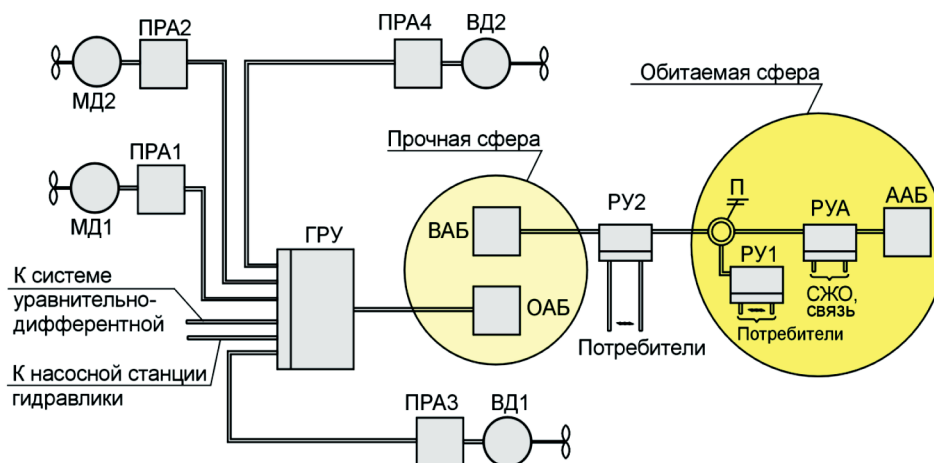


Рис. 3. Схема электроэнергетической системы:

ОАБ — основная АБ, 175-320В; ААБ — аварийная АБ, 24-33В; ВАБ — вспомогательная АБ, 24-33В;
МД1, МД2 — маршевые электродвигатели; ВД1, ВД2 — вертикальные двигатели;
ГРУ — главное распределительное устройство; РУ1, РУ2 — распределительные устройства;
РУА — распределительное устройство аварийное; ПРА1-4 — пускозащитная и регулирующая аппаратура;
СЖО — система жизнеобеспечения; П — переключатель

Аккумуляторные батареи (основная, вспомогательная и аварийная) комплектуются литий-ионными аккумуляторами (рис. 4), которые превосходят аккумуляторы других электрохимических систем по удельным энергетическим характеристикам, ресурсу, сроку службы и характеризуются минимальным обслуживанием, отсутствием газовыделений [14], низким саморазрядом, высокой надежностью и безопасностью, подтвержденными совершенной системой контроля и диагностики. Следует отметить, что аккумуляторы на основе литиевых систем сейчас находятся на ранней стадии развития и обладают высоким потенциалом для совершенствования.

По имеющимся данным, в настоящее время в мире нет эксплуатирующихся литий-ионных АБ (ЛИАБ) в маслозаполненном исполнении с компенсацией [15] внешнего давления на глубину более 6000 м. Разработка такой батареи возможна, однако потребуются значительные затраты времени (около двух лет) и средств для решения ряда проблем, связанных с заданной глубиной погружения, в том числе с проведением испытаний на полное давление и ресурсных испытаний. Поэтому предлагается вариант размещения батарей в прочной сфере как связанный с наименьшими затратами средств, времени и минимальным техническим риском.

Основная и вспомогательная АБ размещаются в прочной сфере диаметром 1000 мм. По оценкам, энергия основной и вспомогательной батареи составит 85 кВт·ч, в том числе 70 кВт·ч основной батареи и 15 кВт·ч вспомогательной. Общая масса батарей составит около 750 кг.

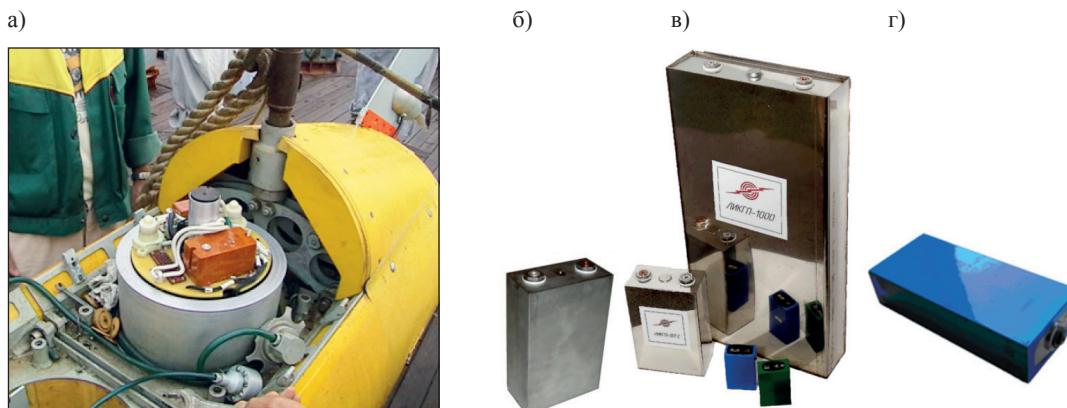


Рис. 4. Отечественные литий-ионные аккумуляторы емкостью:

а — 150 А·ч; б — 225 А·ч; в — 1000 А·ч; г — ЛИАБ на отечественном подводном аппарате

Аварийная батарея размещается в обитаемой сфере, ее энергия составляет 1,5 кВт·ч, напряжение — в пределах 24–33 В. Электроснабжение потребителей аппарата осуществляется через распределительные устройства, расположенные как внутри, так и снаружи обитаемой сферы аппарата. Внутри обитаемой сферы аппарата находятся РУ1 и РУА [16]–[17]. От РУ1 запитываются основные потребители сети постоянного тока 24–33 В. От РУА получают электропитание система жизнеобеспечения и аварийная связь. Вне прочного корпуса аппарата расположены РУ2 и ГРУ. От РУ2 электропитание 24–33 В получают серводвигатели, электроприводы и другие забортные потребители. От ГРУ снабжаются электропитанием постоянного тока 175–320 В маршевые ЭД, подруливающие устройства, ЭД насосной станции гидравлики и ЭД насоса уравнильно-дифференциальной системы.

На аппарате предлагаются к установке вентильно-индукторные двигатели (ВИД) открытого исполнения, при котором внутренние полости охлаждаются забортной водой [18]. Выбор ВИД обусловлен высокими энергетическими характеристиками, исключительной надежностью и возможностью работы в тяжелых условиях. В качестве запасного может рассматриваться вариант ЭД с постоянными магнитами на роторе. Управление электроприводами дистанционное, от встроенных элементов блоков управления в СУ. Исполнение пускозащитной и регулирующей аппаратуры маслозаполненное, что требует испытаний для подтверждения нормального функционирования электрорадиоизделий, погруженных в масло под давлением.

На сегодняшний день кабелей, пригодных для работы при гидростатическом давлении 110 МПа, не выпускается российской промышленностью [19]. Для зарубежных глубоководных аппаратов кабели изготавливались под заказ на зарубежных предприятиях. Использование данной электроэнергетической системы увеличит время работы глубоководного аппарата при возникновении нештатной ситуации: например, при выходе из строя вспомогательной АБ ввиду наличия резервной. Применение литий-ионных АБ позволяет выдавать более высокое напряжения (по сравнению с аккумуляторами типов NiCd и NiMH), не имеет «эффекта памяти» — возможности регулярной небольшой подзарядки, а также относительно небольшой вес по сравнению с другими типами АБ.

Двигательно-движительный комплекс. Предусматриваются два маршевых ЭД мощностью по 5 кВт с винтами в насадках. Диаметр винтов около 400 мм, частота вращения регулируется 40–400 об/мин с возможностью реверса. ВИД (рис. 5) изготавливаются серийно, с частотой вращения 3000 об/мин, поэтому для открытого исполнения потребуется конструктивная переработка самого двигателя.

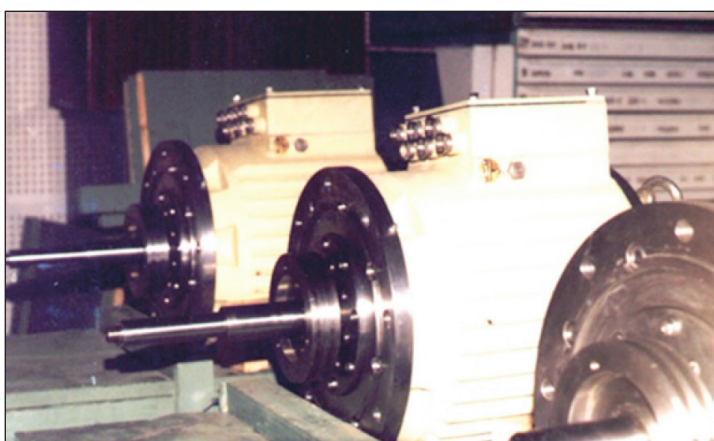


Рис. 5. ВИД мощностью 5,5 кВт

Предусмотрены два вертикальных ЭД мощностью по 3 кВт с винтами в водоводах. Диаметр винтов составляет порядка 300 мм, частота вращения варьируется 40–400 об/мин с возможностью реверсирования [20]–[21]. ВИД (рис. 6) поставляется серийно, но потребуется его конструктивная доработка.

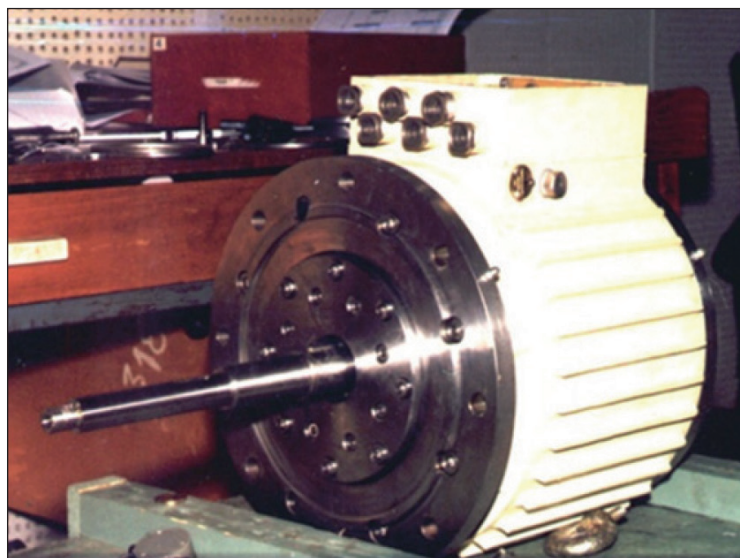


Рис. 6. ВИД мощностью 3 кВт

Комплекс обеспечит достижение аппаратом горизонтальной скорости около 3,5 уз и вертикальной скорости около 0,6 уз [22]–[26].

Основные способы управления движением аппарата:

- изменение частоты вращения маршевых ЭД, включая их работу «вразнобой»;
- использование рулей или поворотных профилированных решеток, установленных в струе каждого из маршевых ЭД. Привод руля или решетки электрический.

Использование ВИД в качестве гребных обуславливает его высокую надежность и живучесть — одно из основных практических преимуществ ВИД по сравнению с традиционными типами электрических машин. В случае использования гребных АД при замыкании фазных обмоток или при межвитковом замыкании фазной обмотки АД выйдет из строя, в то время как отказ одной или даже нескольких фаз гребного ВИД не нарушает его работу, так как при наличии некоторого резерва по току и напряжению фаз снижение выходной мощности частично или полностью компенсируется увеличением нагрузки фаз, оставшихся в работе.

Система освещения. В качестве источников света предпочтительны и перспективны светильники наружного и внутреннего освещения со встроенными светодиодами (СД) или светодиодными матрицами (СД-светильники).

Основные преимущества СД-светильников по сравнению со светильниками с традиционными лампами [27]–[29]:

- малая потребляемая мощность;
- длительный срок службы светодиодов (более 50 000 ч);
- высокая устойчивость к механическим воздействиям;
- способность функционирования в широком диапазоне окружающих температур;
- отсутствие экологически вредных компонентов.

Для наружного освещения дополнительными преимуществами СД светильников являются [30]:

- большая заметность свечения в водной среде квазимонохроматического спектра излучения для длин волн от 520 до 610 нм (центральная часть видимого диапазона длин волн, зона максимальной чувствительности человеческого глаза);

- незначительное рассеяние света и ореольное подсвечивание воды в зоне действия светильника при наличии взвесей и биопланктона, что увеличивает четкость [31]–[32] и контрастность картины при работе подводной телеаппаратуры при цветовой температуре белого свечения 5500 К.

Для визуального наблюдения, фотовидеосъемки и системы телевидения требуется установка глубоководных СД светильников в количестве пяти штук, рассчитанных на глубину погружения до 11 000 м [33]. В настоящее время освоено производство глубоководных светильников (рис. 7).



Рис. 7. Глубоководный светодиодный светильник

Основные характеристики системы наружного освещения:

- количество светильников — 5 шт.;
- световой поток одного светильника — 5 000 лм;
- мощность одного светильника — 150 Вт;
- напряжение электропитания — 20–36 В;
- дальность исследования объектов — 10 м.

Для освещения внутренних помещений предусматриваются светильники с питанием также от сети 24–33 В.

Светодиодная лента для освещения обитаемой сферы имеет минимальные массу и габариты. Контроллер управления яркостью обеспечивает плавную регулировку освещенности в обитаемом корпусе. Общий уровень освещенности создается светодиодной лентой, подсветкой приборных панелей и местной подсветкой рабочих мест операторов.

Характеристики системы внутреннего освещения:

- количество — две световых ленты;
- световой поток — 400 лм на 1 м ленты;
- мощность — 7,2 Вт на 1 м ленты.

Аварийное освещение в обитаемой сфере обеспечивается светодиодными светильниками со встроенными аккумуляторами, которые в нормальном режиме не работают, а включаются в работу автоматически от собственного аккумулятора при пропадании электропитания. Кроме того, предусматривается переносное освещение светодиодными светильниками налобного или ручного исполнения, получающими электропитание от автономных аккумуляторов. Использование светодиодных светильников и ламп позволит существенно снизить энергопотребление по сравнению с использованием других источников света и уменьшить расход светодиодных ламп из-за их устойчивости к механическим повреждениям.

Выводы (Conclusion)

В работе рассмотрены проектные характеристики глубоководного обитаемого подводного аппарата, способного работать на глубинах до 6000 м продолжительное время, а также предложена разработанная компактная электроэнергетическая система на современном отечественном наукоемком электрооборудовании, которое при необходимости легко дорабатывается (перерабатывается) под конкретные требования, предъявляемые к аппарату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов / А. Н. Дмитриев. — Л.: Судостроение, 1978. — 235 с.

2. *Никифоров Б. В.* Аккумуляторные батареи подводных аппаратов / Б. В. Никифоров, А. И. Русин. — Новочеркасск: Колорит, 2011. — 162 с.
3. *Никифоров Б. В.* Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.
4. *Дядик А. Н.* Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.
5. *Дарьенков А. Б.* Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков [и др.]. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 219 с.
6. *Высоцкий В. Е.* Электромеханические процессы в вентильном двигателе с постоянными магнитами / В. Е. Высоцкий, А. П. Синицын, С. А. Тарашев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2010. — № 2 (27). — С. 139–144.
7. *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.
8. *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.
9. *Быков А. С.* Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.
10. *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. — 2013. — №3. — С. 11–16.
11. *Emadi A.* Energy-Efficient Electric Motors / A. Emadi. — New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. — 406 p.
12. *Дядик А. Н.* Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.
13. А. с. 332499. Асинхронный генератор в ЭЭС / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов; опубл. 08.01.91.
14. *Кузнецов В. И.* Бестрансформаторные единые электроэнергетические системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. И. Кузнецов. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 159 с.
15. *Никифоров Б. В.* Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов / Б. В. Никифоров, С. А. Пахомин, Г. К. Птах // Электричество. — 2007. — № 2. — С. 34–38.
16. *Никифоров Б. В.* Исследования вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Электротехника. — 2007. — № 6. — С. 24а–33.
17. *Никифоров Б. В.* Развитие систем электропривода подводных лодок (в порядке обсуждения) / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5. — С. 23–25.
18. *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.
19. *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.
20. *Ehrhart P.* The all-electric ship: ready to take over? / P. Ehrhart // Naval Forces. — 2011. — Vol. XXXII. — Pp. 41–45.
21. *Cao X.* Advanced Control Method for a Single-Winding Bearingless Switched Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple and Radial Displacement / X. Cao, J. X. Zhou, C. Y. Liu, Z. Q. Deng // IEEE Transactions on energy conversion. — 2017. — Vol. 32. — Is. 4. — Pp. 1533–1543. DOI: 10.1109/TEC.2017.2719160.
22. *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.
23. *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.
24. *Зайцев А. А.* Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. — СПб.: Изд-во ПГУПС, 2010. — 60 с.
25. *Ding W.* Design Consideration and Evaluation of a 12/8 High-Torque Modular-Stator Hybrid Excitation Switched Reluctance Machine for EV Applications / W. Ding, S. Yang, Y. Hu, S. Li, T. Wang, Z. Yin // IEEE Transactions on industrial electronics. — 2017. — Vol. 64. — Is. 12. — Pp. 9221–9232. DOI: 10.1109/TIE.2017.2711574.

26. Никифоров Б. В. Корабельные системы электродвижения: дис. ... д-ра техн. наук / Б. В. Никифоров. — СПб.: ЦКБ Морской техники «РУБИН», 2006. — 311 с.

27. 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.

28. Пат. 2324272 Российская Федерация, МПК Н 02 J 9/06. Интеллектуальный преобразователь напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки / В. Е. Апилов [и др.]; 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.

29. Ralev I. Impact of Smooth Torque Control on the Efficiency of a High-Speed Automotive Switched Reluctance Drive / I. Ralev, F. Qi, B. Burkhardt, A. Klein-Hessling, R. W. De Doncker // IEEE Transactions on industry applications. — 2017. — Vol. 53. — Is. 6. — Pp. 5509–5517. DOI: 10.1109/TIA.2017.2743680.

30. Yin F. Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus / F. Yin, S. Nie, H. Ji, Y. Huang // Ocean engineering. — 2018. — Vol. 163. — Pp. 337–347. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.007.

31. 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.

32. Sakovich S. Y. Position based motion control of the underwater vehicle on video data at the underwater pipeline inspection / S. Y. Sakovich, Y. L. Siek // Marine intellectual technologies. — 2018. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 127–133.

33. Goncharuk V. K. Creation of glass-metal composite cylindrical shells for deep-sea submersibles pressure hulls / V. K. Goncharuk, S. V. Antonenko, A. A. Bocharova, A. A. Ratnikov // Marine intellectual technologies. — 2018. — № 3. — Pp. 76–83.

REFERENCES

1. Dmitriev, A. N. *Proektirovanie podvodnykh apparatov*. L.: Sudostroenie, 1978.
2. Nikiforov, B. V., and A. I. Rusin. *Akkumulyatornye batarei podvodnykh apparatov*. Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2011.
3. Nikiforov, B. V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.
4. Dyadik, A. N., and B. V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2012.
5. Dar'enzkov, 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Bykov, A. C., V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskii. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov*. SPb.: Elmor, 2004.
10. 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*. Novocherkassk: Izd. Lik, YuRGU. 11–16.
11. Emadi, A. *Energy-Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
12. Dyadik, A. N., and B. V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy*. Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2012.
13. Nikiforov, B. V., and V. N. Davydov. № 332499. Asinkhronnyi generator v EES. USSR, assignee. Publ. 8 Jan. 1991.

14. Kuznetsov, V. I. Bestransformatornye edinye elektroenergeticheskie sistemy. PhD diss. SPb.: SPBG-MTU, 2015.
15. Nikiforov, B. V., S. A. Pakhomin, and G. K. Ptakh. "Switched Reluctance Motors for Traction Electric Drives." *Electrical Technology Russia* 2 (2007): 34–38.
16. 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.
17. Nikiforov, B. V. "Evolution of electric propulsion systems for submarines." *Sudostroenie* 5 (1999): 23–25.
18. 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.
19. 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.
20. Ehrhart, P. "The all-electric ship: ready to take over?." *Naval Forces XXXII* (2011): 41–45.
21. Cao, X., J. X. Zhou, C.Y. Liu, and Z.Q. Deng. "Advanced Control Method for a Single-Winding Bearing-less Switched Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple and Radial Displacement." *IEEE Transactions on energy conversion* 32.4 (2017): 1533–1543. DOI: 10.1109/TEC.2017.2719160.
22. Jamai, H., M. Kaneda, K. Ohyama, Y. Takeda, and N. Matsai. "Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit." *IEEE*, 2000. 98–101.
23. 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.
24. Zaitsev, A. A., G. N. Talashkin, and Ya.V. Sokolova. *Transport na magnitnom podvese*. SPb.: PGUPS, 2010.
25. Ding, W., S. Yang, Y. Hu, S. Li, T. Wang, and Z. Yin. "Design Consideration and Evaluation of a 12/8 High-Torque Modular-Stator Hybrid Excitation Switched Reluctance Machine for EV Applications." *IEEE Transactions on industrial electronics* 64.12 (2017): 9221–9232. DOI: 10.1109/TIE.2017.2711574.
26. Nikiforov, B.V. Korabel'nye sistemy elektrodvizheniya. Dr. diss. SPb.: 2006.
27. 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.
28. 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 izmenyayushcheisya nagruzki. Russian Federation, assignee. Publ. 10 May 2008.
29. Ralev, I., F. Qi, B. Burkhart, A. Klein-Hessling, and R. W. De Doncker. "Impact of Smooth Torque Control on the Efficiency of a High-Speed Automotive Switched Reluctance Drive." *IEEE Transactions on industry applications* 53.6 (2017): 5509–5517. DOI: 10.1109/TIA.2017.2743680.
30. Yin, Fanglong, Songlin Nie, Hui Ji, and Yeqin Huang. "Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus." *Ocean Engineering* 163 (2018): 337–347. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.007.
31. Nikiforov, B. V., A. P. Temirev, and O. E. Lozitskii. "Sozдание korabel'nykh sistem elektrodvizheniya s ventil'no-induktornym elektroprivodom." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 4 (2007): 62–66.
32. Sakovich, Sergey Yu, and Yuriy L. Siek. "Position based motion control of the underwater vehicle on video data at the underwater pipeline inspection." *Marine intellectual technologies* 1.2 (2018): 127–133.
33. Goncharuk, V. K., S. V. Antonenko, A. A. Bocharova, and A. A. Ratnikov. "Creation of glass-metal composite cylindrical shells for deep-sea submersibles pressure hulls." *Marine intellectual technologies* 3 (2018): 76–83.

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

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

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*

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 7 декабря 2018 г.
Received: December 7, 2018.*