

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОПИТАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

А. В. Лесин

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: lesin.av@ocean.ru*

В статье рассмотрены аспекты построения систем электропитания подводных аппаратов, оценены их достоинства и недостатки, предложено современное техническое решение на базе литий-ионных аккумуляторов. Представлена разработка модернизированной системы энергоснабжения буксируемого необитаемого подводного аппарата «Видеомодуль». Проведен анализ внедрения выполненной работы в ходе морской научной экспедиции.

Ключевые слова: подводный аппарат, видеокартирование дна, поиск объектов, система энергопередачи, система электропитания, аккумулятор, литий-ионный элемент

Введение

Для изучения Мирового океана используют различные виды подводных аппаратов (ПА). Наибольшее распространение получили телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) (Войтов, 2012), обитаемые подводные аппараты (ОПА) (Войтов, 2002), автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) (Войтов, 2015), буксируемые необитаемые подводные аппараты (БНПА) (Егоров, 1981), а также гибридные необитаемые подводные аппараты (Вельтищев, Аладышева, 2022).

Всем вышеперечисленным типам подводных аппаратов необходим источник электропитания. Энергоснабжение аппаратов бывает двух видов: внешнее, когда питание передается на аппарат по кабелю, и автономное. Внешнее энергоснабжение осуществляется за счет электроэнергии, вырабатываемой сторонними источниками. Автономные системы электроснабжения строятся на основе использования аккумуляторных батарей. Время работы таких ПА ограничено емкостью аккумуляторов, поэтому требуется подъем аппарата для замены или зарядки аккумуляторной батареи. Существуют альтернативные методы заряда с использованием энергии Мирового океана: системы преобразования в электричество энергии морских волн, а также энергии морских течений. Примером преобразования энергии морских волн в электрическую может быть волновая-поплавковая электростанция, служащая для регулярной автоматической подводной подзарядки батарей АНПА, расположенная в местах резидентного базирования АНПА, ведущего, например, мониторинг участка

подводного трубопровода или кабеля. Система преобразования кинетической энергии течения в электрическую устанавливается в корпус подводного аппарата и содержит: гидротурбину, синхронную машину и полупроводниковый преобразователь, а также устройство для контроля положения ПА. ПА необходимо зафиксировать на дне так, чтобы продольная ось системы преобразования энергии совпадала со встречным потоком воды. Синхронная машина вырабатывает электричество за счет вращения гидротурбины и подает его на полупроводниковый преобразователь, откуда энергия поступает в аккумуляторную батарею (Мартынов, Самсыгин, Соколов, 2021).

Сборки аккумуляторных батарей бывают трех видов: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная. Энергетический элемент сборки называется аккумуляторной ячейкой. Наиболее распространенные виды аккумуляторных ячеек: пакетированные, призматические и цилиндрические. Так, для построения энергоблока БНПА «Видеомодуль» использованы цилиндрические ячейки.

В настоящей статье рассмотрены реализация и применение современного источника электроэнергии на примере БНПА «Видеомодуль», оснащенного фото-, видео- и гидролокационными системами. БНПА «Видеомодуль» доказал свою эффективность в наблюдении поверхности дна в рамках комплексных исследований Мирового океана (Флинт и др., 2021). В круг задач, решаемых с помощью аппаратов этого класса, входят биологические исследования донной фауны (Zalota, Zimina, Spiridonov, 2019; Римский-Корсаков и др., 2023, Т. 23), и исследования подводных объектов техногенного происхождения (Римский-Корсаков и др., 2023, Т. 51).

Материалы и методы

БНПА «Видеомодуль», разработанный в Лаборатории гидролокации дна Института океанологии РАН (Пронин, 2017), применяется в арктических экспедициях, начиная с 2015 г. Изначально комплекс БНПА включал одну телевизионную камеру с двумя заливающими источниками света (ИЗС). Система энергоснабжения была реализована на базе внешнего источника питания – генератора судна-носителя. Передача электроэнергии осуществлялась по четырехжильному кабель-тросу Кг(2×1,5+2Е)-65-90. Конструкция кабель-троса включает следующие элементы: две медные жилы, которые предназначены для передачи электроэнергии, и две волоконно-оптические линии, из которых одна использовалась для передачи данных, а вторая являлась резервной.

Максимальная глубина погружения БНПА «Видеомодуль» составляет 6000 м. Для проведения глубоководных исследований необходим соответствующий кабель-трос. Любой кабель-трос имеет гидродинамическое сопротивление, которое зависит от его диаметра. При увеличении диаметра кабеля увеличивается его гидродинамическое сопротивление, а значит необходимо использовать более длинный кабель-трос при буксировке аппарата на определенной глубине. Длинный кабель-трос делает систему буксирования аппарата более дорогой и трудноуправляемой. Уменьшение длины кабель-троса возможно при уменьшении его гидродинамического

сопротивления. Достичь этого можно путем уменьшения диаметра буксирной линии – ликвидацией лишних деталей конструкции кабель-троса. Решением этой проблемы является избавление от токоведущих, медных жил и переход на автономное электропитание аппаратуры от аккумуляторов. В случае БНПА «Видеомодуль» такое решение позволило также избавиться от помех, возникающих от вторичных источников питания на борту, так как мощности системы энергопередачи не хватало для обеспечения их устойчивой работы. На получаемом видеоизображении возникали различные видимые помехи. Это было еще одной причиной решения сделать электропитание бортовой подводной части комплекса автономной.

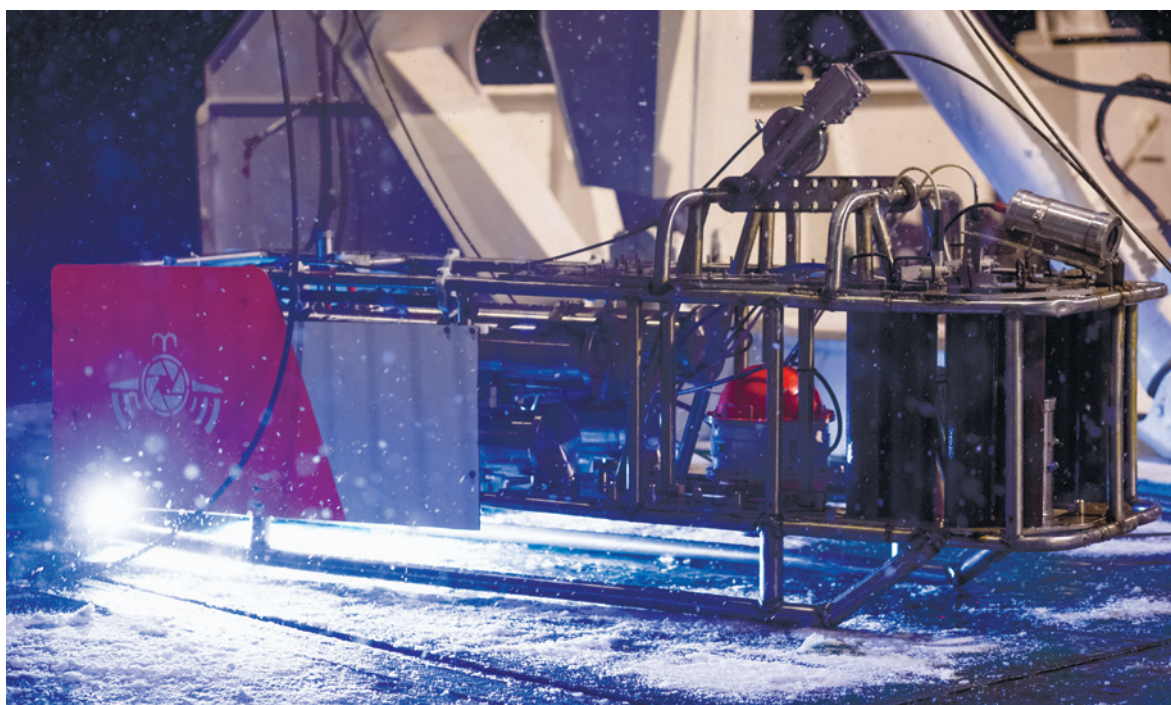


Рис. 1 – БНПА «Видеомодуль» после погружения НИС «Академик Мстислав Келдыш»

В процессе ежегодных исследований, от экспедиции к экспедиции, в Лаборатории гидролокации дна ИО РАН велось совершенствование БНПА «Видеомодуль» в соответствии с новыми требованиями, предъявляемыми научной проблематикой. На БНПА были установлены новые приборы и устройства сбора информации об окружающей среде. Повышена их разрешающая способность, расширены возможности системы передачи информации, модифицированы соответствующие узлы.

В настоящий момент БНПА «Видеомодуль» представляет собой комплексную систему визуального наблюдения с возможностью получения в реальном времени гидролокационных изображений, фото- и видеозаписей, синхронизированных между собой (Анисимов и др., 2023). Источник электропитания выполнен на основе двух сборок параллельно соединенных между собой гелиевых свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, что обеспечивает 5 часов непрерывной работы аппарата с максимальной потребляемой мощностью.

Сборка состоит из банок аккумуляторов FIAMM 12FGH23 напряжением 12 В, емкостью 5 А/ч, с габаритами 107×90×70 мм. Так как ограничение по внутренним габаритам корпуса аккумуляторного отсека составляет Ø130×950 мм, то максимальное количество банок одной сборки составляет 10 шт., суммарной емкостью 50 А/ч. При параллельном соединении двух сборок емкость составляет 100 А/ч. Максимально потребляемая БНПА «Видеомодуль» мощность составляет примерно 250 Вт. Таким образом, время работы БНПА на одном заряде двух аккумуляторных сборок может достигать 5 часов.

Одной из важных задач, решаемых методом маршрутной видеосъемки поверхности дна, является наблюдение и подсчет донных животных. Продолжительность стандартного маршрута видеосъемки или видеотрансекта составляет 30 минут. Таким образом, емкости двух сборок аккумуляторов достаточно для выполнения качественной съемки на 2–3 стандартных маршрутах, без учета времени спуска и подъема аппарата. Надо отметить, что основным потребителем электроэнергии на борту БНПА являются источники заливающего света, которые при спуске и подъеме БНПА могут быть выключены.

Однако существуют такие задачи, как видеокартирование и видеопоиск подводных объектов природного, а также искусственного происхождения. Такие работы могут продолжаться сутками. При длительных исследованиях поверхности дна, таких, как например, исследование мест подводной разгрузки газов и флюидов или идентификация подводных потенциальных объектов, которые присутствуют в морях Российской Арктики (Vedenin et al., 2020), интервалы рабочего времени подводного аппарата 5 часов недостаточны. Каждые 5 часов возникает необходимость подъема аппарата на борт судна для замены аккумуляторов.

Увеличение числа комплектов сменных сборок аккумуляторов не снимает проблемы непрерывности подводных наблюдений, так как при работах на глубинах несколько километров операция спуск–подъем БНПА может занимать несколько часов, что уже сравнимо с временем нахождения оборудования на рабочей глубине вблизи дна. Решением проблемы является разработка и использование аккумуляторных источников повышенной энергоемкости на основе современной элементной базы. Для этого необходимо выбрать тип элемента и смоделировать конструкцию для аккумуляторного отсека.

Выбор источника энергоснабжения

При выборе новых источников электропитания для энергоблока подводного аппарата было рассмотрено несколько вариантов элементов: литий-никель-кобальт-алюминий-оксидный (Li-NCA) литий-никель-марганец-кобальт-оксидный аккумулятор (Li-NMC), литий-титанатный аккумулятор (LTO), литий-железо-фосфатный аккумулятор (LiFePO₄) и натрий-ионные аккумуляторы (Na-ION).

Преимущества Li-NCA и Li-NMC аккумуляторных ячеек заключаются в высокой удельной энергоемкости, достигающей 250 Втч/кг, что позволяет конструировать

более емкостные аккумуляторные сборки. У Li-NMC, как и у Li-NCA, в течении 1 часа доступен высокий ток разряда в 3–4 раза больше номинальной емкости C, измеряемой в единицах А/ч, но при этом значительно снижается ресурс аккумулятора. Номинальное напряжение ячеек составляет 3.7 В.

К недостаткам можно отнести малое количество циклов заряд/разряд до потери емкости в 20 %, у Li-NCA примерно 600 циклов, у Li-NMC около 1000. У производителей аккумуляторных ячеек с такими химическими составами наблюдается снижение емкости минимум на 20 % при температуре использования ниже 0 °С. Самый главный недостаток использования этих типов Li-ION аккумуляторов в БНПА заключается в наличии в них нестабильных химических элементов, что при неправильной эксплуатации может привести к возгоранию. Ячейки типа Li-NMC на данный момент делятся на несколько видов: NMC 111, NMC 622 и NMC 811 и т. д., где цифры обозначают относительную стехиометрию трех металлов. Например, NMC 811 будет содержать молярный состав из 80 % никеля, 10 % марганца и 10 % кобальта и иметь химическую формулу $\text{Li}[\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}]\text{O}_2$. Изменение стехиометрии переходного металла меняет свойства материала, позволяя регулировать характеристики катода. Увеличение содержания никеля в NMC увеличивает начальную удельную энергоемкость, но уменьшает его термическую стабильность, снижая температуру образования кислорода, а также увеличивает выделение тепла во время эксплуатации аккумулятора. Кислород может выделяться из оксида металла при температуре 300 °С при полном разряде, разрушая решетку. Увеличение содержания кобальта происходит за счет замены либо более высокоэнергетического никеля, либо химически стабильного марганца, но при этом делает изготовление аккумуляторов дорогостоящим (Manthiram et al., 2016). Поэтому использование элементов питания с химическими элементами NMC может привести к возгоранию. А при уменьшении емкости более, чем на 20 % при отрицательной температуре, делает сборку малоэффективной.

У аккумуляторных ячеек типа LTO жизненный ресурс достигает 20 000 циклов заряда/разряда. Потери емкости при отрицательной температуре рассмотрены в статье (Тусеева, Кулова, Скундин, 2018). Важным недостатком выбора ячеек такого типа является низкая удельная энергоемкость, равная примерно 100 Втч/кг, номинальное напряжение ячеек 2.3 В, что увеличивает количество ячеек для достижения необходимого значения напряжения в сборке, а высокая стоимость элементов делает сборку малоэффективной.

Большую популярность набирают Na-ION типы аккумуляторов, где в качестве носителя зарядов используются ионы натрия. Идет множество исследований по использованию катодных и анодных материалов, а также выбора электролита (Hwang, Myung, Sun, 2017; Perfilyeva et al., 2023; Samigullin, Drozhzhin, Antipov, 2022). Масового производства натрий-ионных аккумуляторных ячеек в настоящее время не существует. Поэтому рассматривать этот тип элементов для обеспечения энергией аппаратов рано. Исследования компании CATL заявляют об интеграции: использовании Na-ION аккумуляторов вместе с Li-ION аккумуляторами, что говорит

о применении в перспективе Na-ION в дополнение, а не на замену Li-ION (<https://seekingalpha.com/article/4566618-albemarle-sodium-ion-battery-no-threat-to-lithium>).

По результатам проведенных исследований железо-фосфатных аккумуляторов LiFePO₄ на состояние аккумуляторных ячеек при диапазоне температур –30–60 °С и разных значениях тока заряда/разряда (Preger et al., 2020) выявлено, что жизненный цикл у LiFePO₄ значительно выше, чем у остальных типов Li-ION, и может достигать 8000 циклов до потери емкости в 15 % при температуре 15 °С и токе разряда 1С. Обзор полученных результатов в статье позволяет предположить, что железо-фосфатные ячейки больше подходят для эксплуатации при низких температурах, также менее зависимы от глубины разряда.

Исходя из преимуществ литий-железо-фосфатных аккумуляторов перед другими видами литий-ионных аккумуляторов, источники электропитания для БНПА «Видеомодуль» были выполнены на ячейках LiFePO₄ 32700 с номинальным напряжением 3.2 В и емкостью 6 А/ч.

Конструирование аккумуляторной батареи

После определения типа элементов питания была смоделирована система расположения 32700 LiFePO₄-ячеек при заданных внутренних габаритах корпуса аккумуляторного отсека БНПА «Видеомодуль». Наиболее выгодное и эффективное расположение элементов сборки в цилиндрическом корпусе было достигнуто с применением аддитивных технологий. Элементы для расположения ячеек выполнены из материала полиэтилентерефталат-гликоль (рисунок 2а).

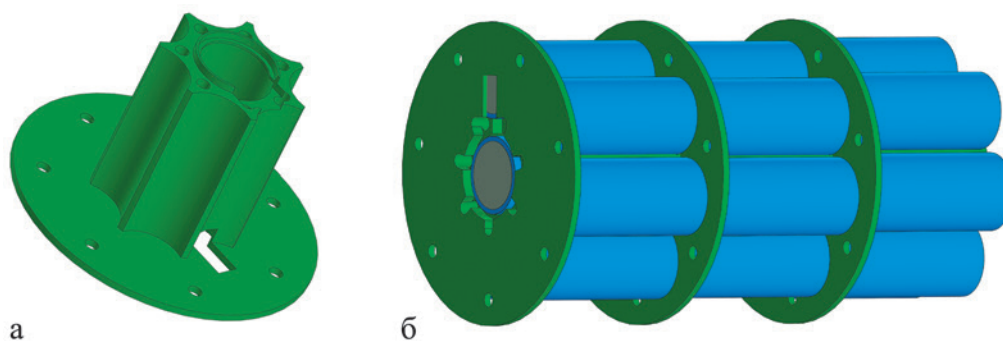


Рис. 2 – Модель аккумуляторной сборки на основе ячеек LiFePO₄ 32700:
а – модель элемента крепления ячеек с возможностью расположения 8 элементов;
б – модель параллельной сборки из 24 ячеек

Для достижения необходимого напряжения и увеличения емкости выполнена последовательно-параллельная сборка аккумулятора. Параллельное соединение аккумуляторных ячеек обеспечивает увеличение емкости, а последовательное соединение обеспечивает необходимое напряжение для работы БНПА. В параллельном соединении используются 24 ячейки (рисунок 2б), что обеспечивает емкость сборки 144 А/ч. Для достижения напряжения в 12.8 В необходима последовательная сборка

из 4 параллельных сборок. Для защиты от перезаряда и переразряда по напряжению, а также для пассивной балансировки элементов и отключения при превышении нагрузки установлена симметрично балансирующая плата BMS LiFePO₄ 4S 12V 60A с максимально возможным током заряда 30 А.

Цельная, последовательно-параллельная сборка (рисунок 3) с балансирующей платой имеет габариты Ø128×930мм, что соответствует внутренним размерам герметичных корпусов БНПА «Видеомодуль» для АКБ.



Рис. 3 – Расположение новых источников питания в БНПА «Видеомодуль»: слева – конечный вид аккумуляторной сборки; справа – сборка в корпусе

Оценка эффективности

Использование БНПА «Видеомодуль» с новыми источниками питания дало положительный результат при исследовании экосистем Карского моря в 92-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (Flint et al., 2024). С использованием новых АКБ суммарное время работы БНПА «Видеомодуль» составило 24.5 часа. А в ходе выполнения наблюдений донных животных в 95-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» время работы аппарата на одном цикле заряда составляло не менее 14 часов при полной мощности аппарата. Время заряда одной аккумуляторной сборки составляет 7 часов при токе заряда 25 А. Таким образом, время заряда аккумуляторных сборок существенно меньше времени работы БНПА при полной мощности, что позволяет проводить длительные исследования поверхности дна без технических перерывов в работе на замену АКБ.

Заключение

В процессе экспедиции 92-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» была усовершенствована система энергоснабжения БНПА «Видеомодуль» путем перехода на новые элементы питания LiFePO_4 . Выбор данных элементов был обусловлен малой потерей емкости при отрицательных температурах и более высокой энергоэффективностью. По результатам работы БНПА с новыми АКБ можно сделать вывод о повышении автономности работы аппарата более, чем в 3 раза. Это сокращает время технического обслуживания в пользу времени визуальных и гидролокационных наблюдений поверхности дна.

В дальнейшем целесообразно изготовить дублирующие аккумуляторные сборки, основанные на элементах LiFePO_4 , для обеспечения возможности их оперативной замены при разрядке в процессе эксплуатации или выходе из строя.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024). Изготовление новейших источников электроэнергии БНПА «Видеомодуль» выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-17-00156).

Список литературы

1. Анисимов И. М., Залота А. К., Лесин А. В., Муравья В. О. Особенности исследования биологических и техногенных объектов с использованием глубоководных буксируемых аппаратов // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 5. С. 840–852. <https://doi.org/10.31857/S0030157423050027>.
2. Вельтищев В. В., Аладышева Е. И. Обзор и перспективы развития гибридных подводных робототехнических комплексов // *Вестник УГАТУ*. 2022. Т. 26. № 1. С. 4–12. https://doi.org/10.54708/19926502_2022_261954.
3. Войтов Д. В. Автономные необитаемые подводные аппараты. Книга+CD. М.: МОРКНИГА, 2015. 332 с.
4. Войтов Д. В. Подводные обитаемые аппараты. М.: ООО «Издательство АСТ»; ООО «Издательство Астрель», 2002. 303 с.
5. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2012. 504 с.
6. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы. Л.: Судостроение, 1981. 304 с.
7. Мартынов А. А., Самсыгин В. К., Соколов Д. В. Способы и устройства энергообеспечения подводных аппаратов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2021. Т. 4. № 398. С. 93–103. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103>.
8. Пронин А. А. Методика сбора и представления материалов видеосъемки поверхности дна с помощью необитаемого подводного буксируемого аппарата «Видеомодуль» // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 12. С. 142–147.
9. Римский-Корсаков Н. А., Казеннов А. Ю., Кикнадзе О. Е., Пронин А. А., Анисимов И. М., Лесин А. В., Муравья В. О. Исследование объектов, представляющих экологическую угрозу, в заливе Цивольки (Новая Земля, Карское море) // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51. № 3. С. 73–83. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).3).

10. Римский-Корсаков Н. А., Пронин А. А., Казеннов А. Ю., Кикнадзе О. Е., Анисимов И. М., Лесин А. В., Муравья В. О. Результаты наблюдений ледового воздействия на объекты, затопленные в Карском море // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. Т. 23. № 10. С. 31–37. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13582>.
11. Тусеева Е. К., Кулова Т. Л., Скундин А. М. Влияние температуры на поведение электродов из титаната лития // Электрохимия. 2018. Т. 54. № 12. С. 1135–1143. <https://doi.org/10.1134/S0424857018140098>.
12. Флинт М. В., Анисимов И. М., Арашкевич Е. Г. [и др.] Экосистемы Карского моря и моря Лаптевых: Экспедиционные исследования 2016 и 2018 гг. М.: ИП Ерхова, 2021. 368 с.
13. Flint M. V., Poyarkov S. G., Rimsky-Korsakov N. A., Knivel N. J., Miroshnikov A. Yu. Ecosystems of the Siberian Arctic Seas–2023: (Cruise 92 of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in the Kara Sea) // Oceanology. 2024. Vol. 64. No 3. P. 485–488. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700140>.
14. Hwang J.-Y., Myung S.-T., Sun Y.-K. Sodium-ion batteries: present and future // Chem. Soc. Rev. 2017. Vol. 46. No. 12. P. 3529–3614. <https://doi.org/10.1039/C6CS00776G>.
15. Manthiram A., Knight J. C., Myung S., Oh S. & Sun Y. Nickel-Rich and Lithium-Rich Layered Oxide Cathodes: Progress and Perspectives // Advanced Energy Materials. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 1501010. <https://doi.org/10.1002/aenm.201501010>.
16. Perfilyeva T. I., Alekseeva A. M., Drozhzhin O. A., Antipov E. V. Structure and Electrochemical Properties of Cathode Materials (Na₃V₂ – xSc_x(PO₄)₃) for Sodium-Ion Batteries // Russ J. Electrochem. 2023. Vol. 59. No. 7. P. 481–488. <https://doi.org/10.1134/S102319352307008X>.
17. Preger Y., Barkholtz H. M., Fresquez A., Campbell D. L., Juba B. W., Romàn-Kustas J., Ferreira S. R., Chalamala B. Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions // J. Electrochem. Soc. 2020. Vol. 167. No. 12. P. 120532. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abae37>.
18. Samigullin R. R., Drozhzhin O. A., Antipov E. V. Comparative Study of the Thermal Stability of Electrode Materials for Li-Ion and Na-Ion Batteries // ACS Appl. Energy Mater. 2022. Vol. 5. No. 1. P. 14–19. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03151>.
19. Vedenin A. A., Kokarev V. N., Chikina M. V., Basin A. B., Galkin S. V., Gebruk A. V. Fauna associated with shallow-water methane seeps in the Laptev Sea // PeerJ. 2020. Vol. 8. P. e9018. <https://doi.org/10.7717/peerj.9018>.
20. Zalota A. K., Zimina O. L., Spiridonov V. A. Combining data from different sampling methods to study the development of an alien crab *Chionoecetes opilio* invasion in the remote and pristine Arctic Kara Sea // PeerJ. 2019. Vol. 7. P. e7952. <https://doi.org/10.7717/peerj.7952>.

Статья поступила в редакцию 05.08.2024, одобрена к печати 09.09.2024.

Для цитирования: Лесин А. В. Реализация эффективной системы энергопитания подводного аппарата на современной элементной базе // Океанологические исследования. 2024. № 52 (3). С. 149–159. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(3\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(3).9).

IMPLEMENTATION OF AN EFFICIENT POWER SUPPLY SYSTEM FOR UNDERWATER VEHICLE BASED ON MODERN COMPONENTS

A. V. Lesin

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: lesin.av@ocean.ru*

The article discusses aspects of constructing power supply systems for underwater vehicles, evaluates their advantages and disadvantages, and proposes a modern technical solution based on lithium-ion batteries. The development of a modernized power supply system for a towed unmanned underwater vehicle “Videomodule” is presented. An analysis of the implementation of the work performed during the marine scientific expedition was carried out.

Keywords: underwater vehicle, video bottom mapping, object search, power transmission system, power supply system, battery, lithium ion cell

Acknowledgments: The study was carried out within the state task of IO RAS (RAS (topic No. FMWE-2024-0024). The production of the newest sources UUV “Videomodule” was supported by the RSF (grant No. 23-17-00156).

References

1. Anisimov, I. M., A. K. Zalota, A. V. Lesin, and V. O. Muravya, 2023: Aspects of the Towed Underwater Vehicle “Videomodule”: Utilization for Surveying Underwater Objects and Benthic Fauna. *Oceanology*, **63** (5), 733–743, <https://doi.org/10.1134/S0001437023050028>.
2. Egorov, V. I., 1981: *Podvodnye buksiruemye sistemy (Underwater towed systems)*. Leningrad, Sudostroenie, 304 p.
3. Flint, M. V., I. M. Anisimov, and E. G. Arashkevich [et al.], 2021: Ecosistemy Karskovo morya i morya Laptevyykh 2016 i 2018 gg. (Ecosystems of The Kara Sea and Laptev Sea: Expedition research in 2016 and 2018). Moscow, IP Erkhova, 368 p.
4. Flint, M. V., S. G. Poyarkov, N. A. Rimsky-Korsakov, N. J. Knivel, and A. Yu. Miroshnikov, 2024: Ecosystems of the Siberian Arctic Seas–2023: (Cruise 92 of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in the Kara Sea). *Oceanology*, **64** (3), 485–488, <https://doi.org/10.1134/S0001437024700140>.
5. Hwang, J.-Y., S.-T. Myung, and Y.-K. Sun, 2017: Sodium-ion batteries: present and future. *Chem. Soc. Rev.*, **46** (12), 3529–3614, <https://doi.org/10.1039/C6CS00776G>.
6. Manthiram, A., J. C. Knight, S. Myung, S. Oh, and Y. Sun, 2016: Nickel-Rich and Lithium-Rich Layered Oxide Cathodes: Progress and Perspectives. *Advanced Energy Materials*, **6** (1), 1501010, <https://doi.org/10.1002/aenm.201501010>.
7. Martynov, A. A., V. K. Samsygin, and D. V. Sokolov, 2021: Sposoby i ustroystva energo-obespecheniya podvodnykh apparatov (Methods and equipment for power supply of underwater vehicles). *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*, **4** (398), 93–103, <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103>.
8. Perfil'yeva, T. I., A. M. Alekseeva, O. A. Drozhzhin, and E. V. Antipov, 2023: Structure and Electrochemical Properties of Cathode Materials (Na₃V₂ – xSc_x(PO₄)₃) for

- Sodium-Ion Batteries. *Russ. J. Electrochem*, **59** (7), 481–488, <https://doi.org/10.1134/S102319352307008X>.
9. Preger, Y., H. M. Barkholtz, A. Fresquez, D. L. Campbell, B. W. Juba, J. Romàn-Kustas, S. R. Ferreira, and B. Chalamala, 2020: Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. *J. Electrochem. Soc.*, **167** (12), 120532, <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abae37>.
 10. Pronin, A. A., 2017: Metodika sbora i predstavleniya materialov videosemki poverhnosti dna s pomoschyu neobitaemogo podvodnogo buksiruemogo apparata “Videomodul” (Collection and representation data video movies of bottom surface in oceanological investigations with underwater towing equipment). *Mezhdunarodnoyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, **12** (1), 142–147.
 11. Rimsky-Korsakov, N. A., A. A. Pronin, A. Yu. Kazenov, O. E. Kiknadze, I. M. Anisimov, A. V. Lesin, and V. O. Muravya, 2023: *Rezultaty nablyudeniya ledovogo vozdeystviya na obyekt, zatoplenyye v Karskom more* (Observation of ice impact results on flooded objects at Kara Sea). *Mezhdunarodnoyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, **23** (10), 31–37, <https://doi.org/10.17513/mjpf.13582>.
 12. Rimsky-Korsakov, N. A., A. Yu. Kazenov, O. E. Kiknadze, A. A. Pronin, I. M. Anisimov, A. V. Lesin, and V. O. Muravya, 2023: Issledovanie obyektov predstavlyayuschikh ekologicheskuyu ugrozu, v zalive Zivol'ki (Novaya Zemlya, Karskoe more) (Ecological hazard objects research results at Tsivolki bay (Novaya Zemlya, Kara Sea)). *Journal of Oceanological Research*, **51** (3), 73–83, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(3\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).3).
 13. Tuseeva, E. K., T. L. Kulova, and A. M. Skundin, 2018: Vliyanie temperatury na povedenie elektrodov iz titanata litiya (Temperature effect on the behavior of a lithium titanate electrode). *Elektrokhimiya*, **54** (12), 1135–1143, <https://doi.org/10.1134/S0424857018140098>.
 14. Samigullin, R. R., O. A. Drozhzhin, and E. V. Antipov, 2022: Comparative Study of the Thermal Stability of Electrode Materials for Li-Ion and Na-Ion Batteries. *ACS Appl. Energy Mater.*, **5** (1), 14–19, <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03151>.
 15. Vedenin, A. A., V. N. Kokarev, M. V. Chikina, A. B. Basin, S. V. Galkin, and A. V. Gebruk, 2020: Fauna associated with shallow-water methane seeps in the Laptev Sea. *PeerJ*, **8**, e9018, <https://doi.org/10.7717/peerj.9018>.
 16. Veltishev, V. V. and E. I. Aladysheva, 2022: Obzor i perspektivy razvitiya gibridnykh podvodnykh robototekhnicheskikh kompleksov (Review and outlook of hybrid underwater robotic systems). *Vestnik UGATU*, **26** (1), 4–12, https://doi.org/10.54708/19926502_2022_261954.
 17. Voytov, D. V., 2015: *Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty (Autonomous uninhabited underwater vehicles)*. Moscow, MORKNIGA, 332 p.
 18. Voytov, D. V., 2002: *Podvodnye obitaemye apparaty (Underwater manned vehicles)*. Moscow, OOO “Izdatel'stvo Astrel”, 303 p.
 19. Voytov, D. V., 2012: *Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnye apparaty (Remotely controlled uninhabited underwater vehicles)*, Moscow, MORKNIGA, 504 p.
 20. Zalota, A. K., O. L. Zimina, and V. A. Spiridonov, 2019: Combining data from different sampling methods to study the development of an alien crab *Chionoecetes opilio* invasion in the remote and pristine Arctic Kara Sea. *PeerJ*, **7**, e7952, <https://doi.org/10.7717/peerj.7952>.

Submitted 05.08.2024, accepted 09.09.2024.

For citation: Lesin, A. V., 2024: Implementation of an efficient power supply system for underwater vehicle based on modern components. *Journal of Oceanological Research*, **52** (3), 149–159, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(3\).9](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(3).9).