

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-103-115  
УДК 621.3.031:[629.584:007.52]

А.А. Мартынов<sup>1</sup> , В.К. Самсыгин<sup>2</sup> , Д.В. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## К ВОПРОСУ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЗИДЕНТНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом являются системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов. Цель состоит в разработке и исследовании новых способов и устройств энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов, а также в поиске путей их совершенствования.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось на основе аналитических методов расчета и исследования систем энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов.

**Основные результаты.** Разработаны новые системы и устройства энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов, преобразующие энергию Мирового океана в электрическую энергию для заряда аккумуляторных батарей. Все разработанные системы и устройства защищены патентами Российской Федерации.

**Заключение.** Результаты разработки и исследования расширяют возможности выбора оптимального варианта системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов и способствуют ускорению процесса внедрения их на практике.

**Ключевые слова:** резидентный подводный робот, робототехнический комплекс, аккумулятор, энергообеспечение, доковая станция, поплавковый волновой генератор.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-103-115  
UDC 621.3.031:[629.584:007.52]

A.A. Martynov<sup>1</sup> , V.K. Samsygin<sup>2</sup> , D.V. Sokolov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## ON THE ISSUE OF ENERGY SUPPLY OF RESIDENT UNDERWATER ROBOTS AND ROBOTIC COMPLEXES

**Object and purpose of research.** The object of work is the energy supply systems of resident underwater robots and robotic complexes. The goal is to develop and research new methods and devices for energy supply of resident underwater robots and robotic complexes, as well as to find ways to improve them.

**Materials and methods.** The study was conducted on the basis of analytical methods and calculation and study of energy supply systems for resident underwater robots and robotic complexes.

*Для цитирования:* Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В. К вопросу энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 103–115.

*For citations:* Martynov A.A., Samsygin V.K., Sokolov D.V. On the issue of energy supply of resident underwater robots and robotic complexes. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 103–115 (in Russian).

**Main results.** New systems and devices for power supply of resident underwater robots and robotic complexes have been developed, converting the energy of the World Ocean into electrical energy for charging batteries. All developed systems and devices are protected by patents of the Russian Federation.

**Conclusion.** The results of the development and research expand the possibilities of choosing the optimal option for the energy supply system for resident underwater robots and robotic complexes and contribute to accelerating the process of their implementation in practice.

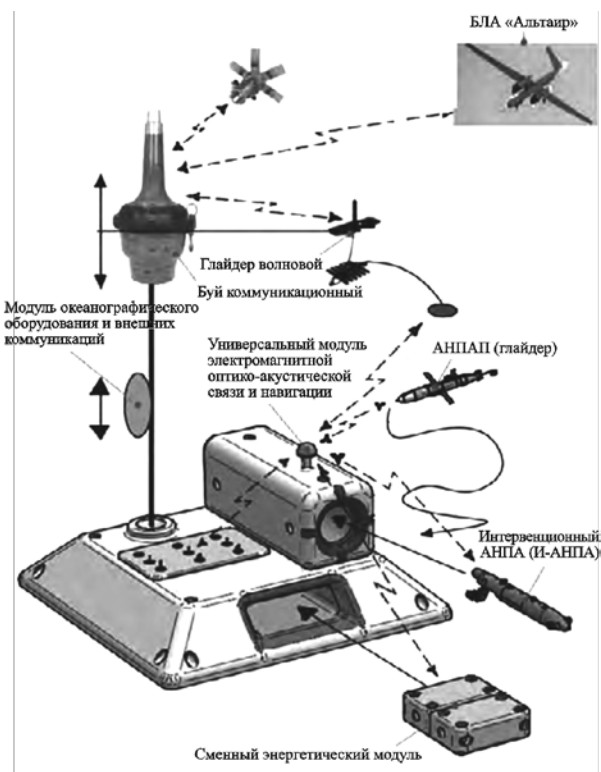
**Keywords:** resident underwater robot, robotic complex, battery, power supply, docking station, float wave generator.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Многие государства неуклонно повышают внимание к вопросу разработки сырьевых ресурсов Мирового океана. Учитывая, что Мировой океан является исключительно опасной и агрессивной средой для человека, добыча полезных ископаемых, включая нефть и газ, с его дна не только является технически сложной задачей, но и требует разработки и освоения новых технологий, нового оборудования, способного работать автономно, без участия человека [1–9].



**Рис. 1.** Доковая станция с модулями и объектами резидентной подводной робототехники

**Fig. 1.** Docking system with modules and facilities of resident underwater robotics

В результате усилий многих стран разработаны робототехнические комплексы и технологии морской робототехники, реализуемые без использования судов сопровождения. Это направление получило название «резидентная робототехника» [1].

19 июня 2019 г. журнал *Offshore Engineer* опубликовал материал об успешных испытаниях резидентной робототехники, проведенных в Швеции, на озере Ваттерн. Резидентный автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) Sabertooth без сбоев выполнил следующие действия:

- автономные перемещения;
- стыковку с подводной доковой станцией;
- проверку макета донной инфраструктуры;
- подзарядку аккумуляторной батареи (АБ);
- загрузку видеоданных с использованием индуктивных разъемов Blue Logic;
- передачу видео в реальном времени через оптический модем Sonardyne Blue Comm.

Разработка и совершенствование резидентных АНПА начались примерно с 2014 г. Резидентный АНПА – это подводный аппарат с нулевой плавучестью, который работает, как правило, в автономном режиме, используя энергию аккумуляторных батарей. Пополнение энергии аккумуляторных батарей АНПА осуществляется чаще всего индукционным методом от донной доковой станции. Обмен информацией между АНПА и подводной доковой станцией происходит по оптической беспроводной связи [2].

Энергообеспечение подводных роботов является одной из актуальных задач современной подводной резидентной робототехники, решением которой занимаются ведущие мировые фирмы: IKM Subsea & Technology (Hunter Group, Норвегия), Oceaneering International, Inc. (США), Saab Seaeeye Limited (Великобритания) и др. Уровень и качество разработанных систем энергообеспечения во многом определяют эффективность и надежность работы подводных роботов и робототехнических комплексов в целом [3–10].

Среди отечественных научных организаций, занимающихся вопросами энергообеспечения подводных роботов, можно выделить СПбГМТУ и АО «НПП ПТ

«Океанос», которые с 2012 г. совместно ведут разработку инновационных проектов, направленных на развитие сферы резидентной робототехники [1].

Зарядка аккумуляторных батарей подводных роботов, как правило, осуществляется от энергетических модулей доковых станций, донных причальных гаражей. При работе робототехнического комплекса в прибрежной полосе электрическая энергия для зарядки АБ энергетических модулей доковых станций передается по кабелю кабель-троса от источников электрической энергии, размещенных на берегу. В том случае, когда робототехнический комплекс работает на значительном удалении от берега, доковые станции выполняются со съёмными энергетическими модулями, замена которых производится по мере их разряда. На рис. 1 приведено изображение доковой станции с модулями и объектами резидентной подводной робототехники [1].

Совершенно очевидно, что при увеличении объема работ, выполняемых робототехническим комплексом, увеличивается и энергопотребление, а это приводит к увеличению числа операций по замене энергетических модулей доковых станций. Недостатками этого способа энергообеспечения резидентных робототехнических комплексов являются высокая стоимость работы по замене съёмного энергетического модуля, связанная с необходимостью использования судна сопровождения и телеуправляемого робота, а также вынужденные простои робототехнического комплекса при выполнении этой операции. Кроме этого, эффективность и длительность выполнения операции в значительной мере зависят от погодных условий в акватории, где размещен робототехнический комплекс.

Исключить операцию замены энергетического модуля доковой станции можно путем включения в состав резидентного робототехнического комплекса генератора электрической энергии, способного преобразовать энергию Мирового океана в электрическую энергию. Энергия Мирового океана сосредоточена в морских течениях и морских волнах. По ориентировочным оценкам, потенциальный ресурс энергии волн океанов составляет 8–80 тыс. ТВт в год, ресурс энергии сильных морских течений – 0,8–5 ТВт в год.

Эти сведения были приняты во внимание при формировании нового направления в энергообеспечении подводной резидентной робототехники с использованием систем и устройств, преобразующих энергию Мирового океана в электрическую энергию для пополнения энергии подводных гаражей, донных причальных устройств, доковых под-

водных станций и самих подводных роботов. Перечислим несколько вариантов реализации этого направления в энергообеспечении подводной резидентной робототехники:

- энергообеспечение подводного аппарата с использованием обратимого электромашино-вентильного преобразователя подводного аппарата [11–12];
- энергообеспечение подводного аппарата и подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью [13];
- энергообеспечение подводной доковой станции от поплавковой волновой электростанции с электрическими генераторами линейного типа [14];
- энергообеспечение подводной доковой станции от поплавковой волновой электростанции с электрическими генераторами вращательного типа [15].

### **Энергообеспечение подводного аппарата с использованием обратимого электромашино-вентильного преобразователя подводного аппарата**

Power supply to underwater vehicle using a reversible electric machine-vent converter of underwater vehicle

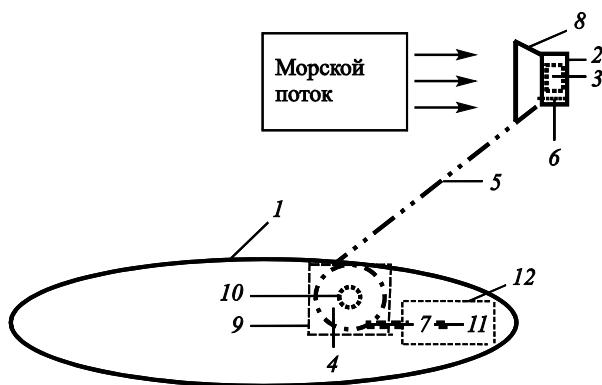
Устройство, принцип работы, основы методики расчета системы энергообеспечения подводного робота с использованием обратимого электромашино-вентильного преобразователя подводного аппарата опубликованы в [11]. При разработке этой системы использованы материалы патента РФ № 2724197 «Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации» (авт. А.А. Мартынов, В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов, опубл. 22.06.2020) [12].

В [11] показана возможность осуществления зарядки аккумуляторных батарей подводного аппарата посредством перевода обратимого электромашино-вентильного преобразователя подводного аппарата в генераторный режим. Винт гребной установки работает в режиме турбины и преобразует кинетическую энергию морского потока в механическую энергию, которая передается на вал синхронной машины, работающей в режиме генератора. Полупроводниковый преобразователь преобразует электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока и передает ее на заряд АБ.

## Энергообеспечение подводного аппарата от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью

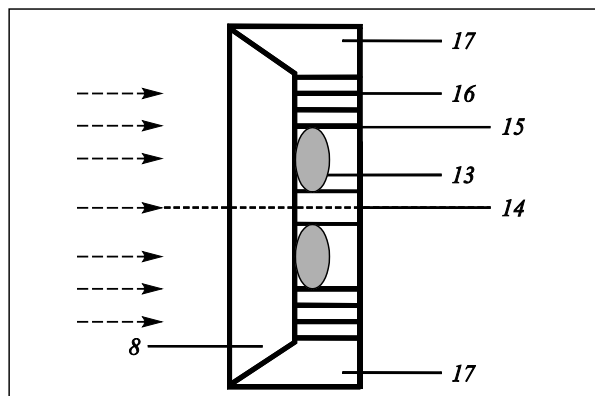
Power supply to underwater vehicle from electric generator enclosed in capsule with positive buoyancy

Рассмотрим устройство и принцип работы электро-энергетической системы подводного робота, способной преобразовать энергию морского течения в электрическую энергию, используя материалы патента РФ № 2750396 «Система энергообеспече-



**Рис. 2.** Структурная схема системы энергообеспечения подводного аппарата от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью

**Fig. 2.** Structural diagram of power supply to underwater vehicle from electric generator enclosed in capsule with positive buoyancy



**Рис. 3.** Структурная схема капсулы с размещенным в ней электрическим генератором

**Fig. 3.** Structural diagram of the capsule with enclosed electric generator

ния подводного аппарата» (авт. А.А. Мартынов, опублик. 28.06.2021) [13].

Работу системы энергообеспечения можно пояснить, воспользовавшись рис. 2 и 3. На рис. 2 приведена структурная схема системы энергообеспечения подводного аппарата от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью. На рис. 3 изображена структурная схема капсулы с размещенным в ней электрическим генератором.

Система энергообеспечения подводного аппарата работает следующим образом. Перед зарядкой аккумуляторной батареи подводный аппарат 1 перемещается в область акватории океана с достаточной для эффективной зарядки АБ скоростью морского течения. Это могут быть участки приливно-отливных течений, проливы, естественные сужения подводного рельефа, где скорость морского течения выше скорости течения на уровне водной поверхности. Подводный аппарат 1 ложится на морское дно, электромеханический привод 10 вращает барабан 4, кабель-трос 5 раскручивается, а капсула 2 благодаря положительной плавучести поднимается вверх и достигает слоев морского течения, имеющих наибольшую скорость.

Морской поток входит в насадку конической формы 8, установленную на входе внутренней полости капсулы 2, и попадает на лопасти винта 13, закрепленные на ступице 14 и внутренней поверхности ротора 15.

Ротор 15 установлен в расточке статора 16 электрического генератора 3. В капсуле 2 размещены герметичные полости 17 для обеспечения положительной плавучести капсулы вместе с электрическим генератором. Вместе с лопастями винта вращается и ротор синхронного генератора 14 с размещенными на нем постоянными магнитами. Магнитный поток постоянных магнитов пересекает витки трехфазной обмотки статора и наводит в них электродвижущую силу (ЭДС).

Трехфазная обмотка статора подключена к входу выпрямителя 6, постоянное напряжение с выхода которого передается по кабель-тросу 5 на вход зарядного устройства 7. Напряжение с выхода зарядного устройства 7 поступает на аккумуляторную батарею 11, размещенную вместе с зарядным устройством 7 в герметичном отсеке 12, и заряжает ее. По окончании заряда аккумуляторной батареи 11 включается электромеханический привод 10 барабана 4, кабель-трос 5 накручивается на барабан, капсула втягивается в негерметичный отсек 9. Электромеханический привод выключается. После

этого подводный аппарат готов к продолжению работы в штатном режиме.

При заряде АБ гребной винт работает в режиме турбины, а синхронная машина работает в режиме генератора. Мощность  $P_r$ , генерируемая синхронной машиной, определяется с учетом эффективности работы генератора и турбины:

$$P_r = \eta_r \cdot \eta_g \cdot P_n, \quad (1)$$

где  $P_n$  – мощность потока воды, поступающего на лопасти винта, Вт;  $\eta_r$  – КПД генератора, значение  $\eta_r = 0,85-0,95$ ;  $\eta_g$  – КПД турбины, значение  $\eta_g = 0,5-0,7$ .

$$P_n = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воды, равна  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения, равно  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $Q$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – скоростной напор потока воды, м.

$$Q = S_r \cdot v_n, \quad (3)$$

где  $S_r$  – площадь сечения, через которое поток воды проходит на лопасти винта,  $\text{м}^2$ ;  $v_n$  – скорость потока воды, поступающего на лопасти винта, м/с.

Скоростной напор потока воды  $H$  можно определить по формуле

$$H = v_n^2 / 2g. \quad (4)$$

С учетом значений параметров, приведенных выше, мощность потока можно определить по формуле

$$P_n = 0,5 \cdot \rho \cdot S_r \cdot v_n^3, \text{ Вт}. \quad (5)$$

При установке на турбину насадки конической формы, как показано на рис. 3, и отношении диаметра входного отверстия насадки к диаметру входного отверстия турбины равным, например, 2:1, отношение площадей сечений входного и выходного отверстий насадки составит 4:1. Следовательно, скорость морского потока в полости винта при установке такой насадки увеличится в 4 раза по отношению к скорости морского потока вне насадки. Мощность потока, а значит, и генерируемая мощность при этом увеличатся в 64 раза.

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет с достаточно высокой эффективностью осуществить преобразование энергии морского потока в электрическую энергию и существенно уменьшить время заряда АБ, а также улучшить такие характеристики, как дальность, автономность и скрытность работы подводного аппарата.

Определим основные размеры электрического генератора. Скорость вращения винта, а значит, и скорость вращения ротора электрического генератора можно определить по формуле

$$n = v_n / h, \text{ об/с}, \quad (6)$$

где  $h$  – шаг винта.

Величину шага винта  $h$  можно определить при известном отношении шага винта к диаметру ( $h/D$ ) по формуле  $h = (h/D) \cdot D$ , м.

Из теории электрических машин известно, что основные размеры электрической машины связаны с электромагнитной мощностью машины соотношением

$$D^2 l = P_{эм} \cdot 60 / (n \cdot k \cdot A \cdot B_{дmax}), \quad (7)$$

где  $D^2 l$  – объем, ограниченный активной поверхностью ротора статора;  $P_{эм}$  – электромагнитная мощность генератора, ВА;  $A$  – линейная нагрузка генератора, А/м;  $B_{дmax}$  – индукция в зазоре между магнитопроводами статора и ротора, Тл;  $n$  – скорость вращения ротора, об/мин;  $k$  – коэффициент;  $l$  – длина (толщина набора электротехнической стали) магнитопровода статора генератора, м.

Для машин переменного тока  $k = \pi^2 k_{об} / \sqrt{2}$ . Поскольку  $k_{об}$  машин переменного тока для первой гармоники в среднем близок к значению  $k_{об} \approx 0,92$ , то  $k = 6,43$ .

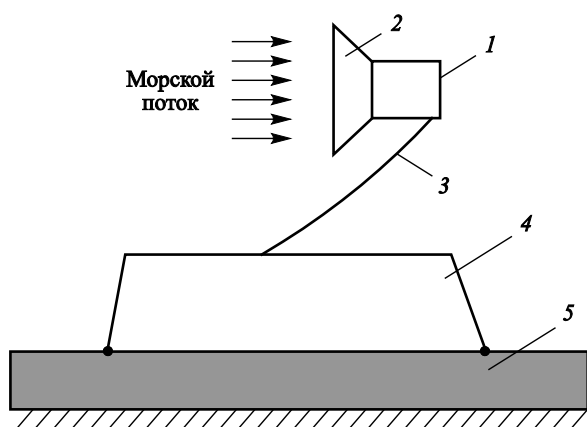
Электрический генератор, размещенный в капсуле с положительной плавучестью, также может быть использован для энергообеспечения подводной доковой станции.

## **Энергообеспечение подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью**

Power supply to underwater docking system from electric generator enclosed in capsule with positive buoyancy

На рис. 4 приведена структурная схема системы энергообеспечения подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью. Здесь введены следующие обозначения: 1 – капсула с размещенным в ней электрическим генератором; 2 – насадка конусной формы; 3 – кабель-трос; 4 – подводная доковая станция; 5 – фундамент.

Структурная схема системы энергообеспечения подводной доковой станции от электрического ге-

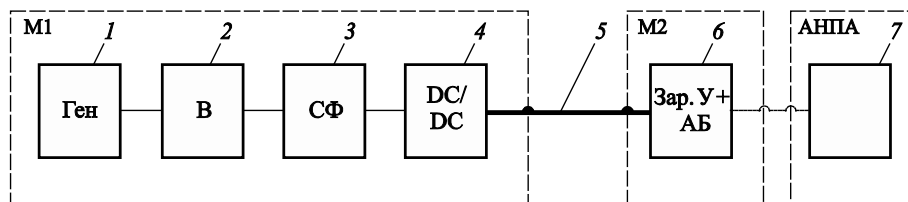


**Рис. 4.** Структурная схема системы энергообеспечения подводной доковой станции от капсулы с размещенным в ней электрическим генератором

**Fig. 4.** Structural diagram of power supply system of underwater docking system from capsule with enclosed electric generator

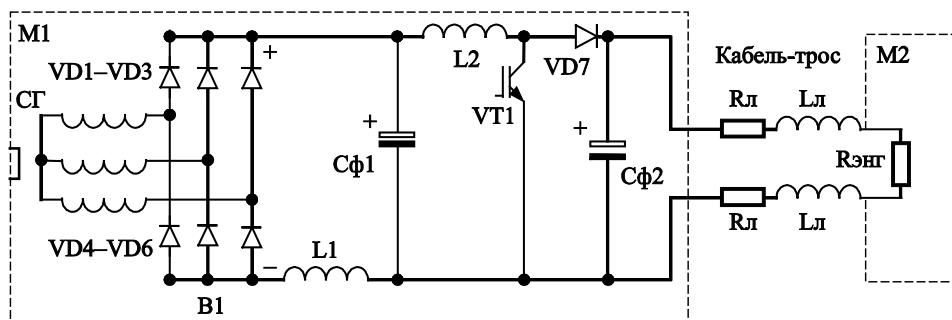
нератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью, приведена на рис. 5.

Принятые на рис. 5 обозначения: 1 – электрический генератор (Ген); 2 – выпрямитель неуправляе-



**Рис. 5.** Структурная схема энергообеспечения подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью

**Fig. 5.** Structural diagram of underwater docking system power supply from electric generator enclosed in capsule with positive buoyancy



**Рис. 6.** Электрическая схема системы энергообеспечения подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью

**Fig. 6.** Electrical diagram of power supply system of underwater docking system from electric generator enclosed in capsule with positive buoyancy

мый (В); 3 – сглаживающий фильтр (СФ); 4 – преобразователь напряжения постоянного тока в напряжение постоянного тока (DC/DC); 5 – кабель-трос; 6 – зарядное устройство и аккумуляторы доковой станции; 7 – аккумуляторные батареи АНПА.

В систему входят модули М1 и М2. Модуль М1, размещенный в корпусе капсулы с положительной плавучестью, включает в себя трехфазный синхронный генератор (Ген), неуправляемый выпрямитель (В), сглаживающий L-С фильтр, и преобразователь напряжения постоянного тока (DC/DC). Выходное напряжение преобразователя DC/DC через кабель-трос подается в подводную доковую станцию (модуль М2). Ротор синхронного генератора приводится во вращение винтом. Электрическая энергия, запасенная аккумуляторами модуля М2, периодически передается в подводный аппарат (АНПА) для зарядки его аккумуляторной батареи.

На рис. 6 приведена электрическая схема системы энергообеспечения подводной доковой станции от электрического генератора, размещенного в капсуле с положительной плавучестью. Напряжение переменного тока синхронного генератора подается на вход неуправляемого выпрямителя,

выполненного на вентилях VD1–VD6. Пульсации выпрямленного напряжения подавляются сглаживающим фильтром L1-C<sub>ф</sub>1. Отфильтрованное напряжение постоянного тока поступает на вход преобразователя DC/DC, повышающего напряжение постоянного тока до уровня 1000–1500 В.

Схема преобразователя DC/DC состоит из транзистора VT1, диода VD7, дросселя L2 и конденсатора C<sub>ф</sub>2. Величина напряжения на выходе DC/DC регулируется изменением величины коэффициента заполнения импульса  $D$  транзистора VT1.

Поскольку величина активного сопротивления дросселя  $R_{L2}$  пренебрежимо мала по сравнению с суммарным сопротивлением, включающим сопротивление проводов кабель-троса –  $2R_{л}$  и эквивалентное сопротивление нагрузки –  $R_{нгр}$ , то регулировочную характеристику DC/DC можно строить по упрощенной формуле, без учета влияния активного сопротивления схемы [16]:  $U_{нгр}/U_{д1} = 1/(1-D)$ .

Из регулировочной характеристики, приведенной на рис. 7, видно, что повышение напряжения постоянного тока в этой схеме до требуемого уровня может быть выполнено без каких-либо затруднений.

## Энергообеспечение доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генераторами линейного типа

Power supply to docking system from float wave electric power plant with linear generators

На рис. 8 приведена структурная схема устройства для энергообеспечения подводной доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генераторами линейного типа [14].

Преобразование механической энергии морских волн в электрическую энергию осуществляет трехфазная поплавковая волновая электростанция. В ее состав входят три поплавковых волновых генератора 2, которые имеют общий поплавок 3, а их корпуса размещены на верхней плоскости опоры 1 с положительной плавучестью, закрепленной с помощью силовых тросов 5 к фундаменту 10, на котором размещена подводная доковая станция 9. Величина перемещения индукторов генераторов может быть принята равной  $1,2 \cdot A$ , где  $A$  – амплитуда волны.

Благодаря наличию пространственного сдвига многополюсных магнитных систем генераторов, равному  $(2/3) \cdot \tau$  (где  $\tau$  – полюсное деление генератора), напряжения, генерируемые тремя генераторами, имеют фазовый сдвиг во времени  $\varphi_{сдв}$ , равный  $2\pi/3$ ,

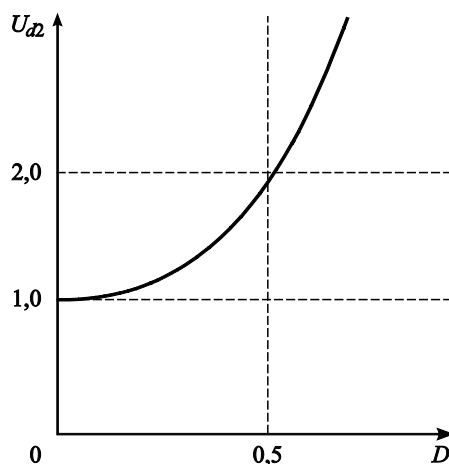


Рис. 7. Регулировочная характеристика преобразователя DC/DC, повышающего напряжение

Fig. 7. Regulating characteristics of DC/DC voltage boosting converter

и образуют симметричную трехфазную систему. Электрическая энергия переменного тока генераторов преобразуется с помощью выпрямителей 4 в электрическую энергию постоянного тока. Выходные цепи выпрямителей соединены последовательно согласно, благодаря этому выходные напряжения выпрямителей суммируются, при этом частота пульсаций выпрямленного напряжения шестикратно частоте генерируемого напряжения.

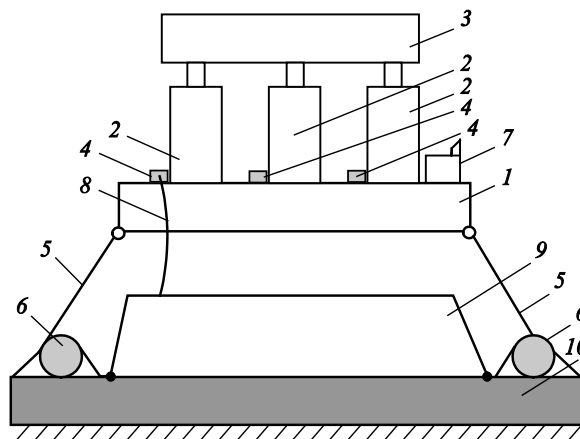


Рис. 8. Структурная схема устройства для энергообеспечения доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генераторами линейного типа

Fig. 8. Structural diagram of device for power supply to docking system from float wave electric power plant with linear generators

Электрическая энергия, вырабатываемая поплавок-волновой электростанцией, передается на подводную доковую станцию 9 с помощью силового кабеля кабель-троса 8. Суммирование выходных напряжений выпрямителей позволяет повысить величину постоянного напряжения, уменьшить величину тока, передаваемого по силовому кабелю кабель-троса, снизить потери мощности в кабель-тросе и повысить эффективность энергообеспечения подводной доковой станции.

Контроль электрических параметров поплавок-волновой электростанции, контроль и анализ состояния окружающей среды, а также телекоммуникационную связь с источниками внешней информации (например, со спутниками) осуществляет блок контроля, управления и дистанционного мониторинга 7. Собранный и обработанный блоком 7 информация передается по информационному кабелю кабель-троса 8 в систему управления доковой станции 9. По командам блока 7, в частности, производится включение и отключение электромеханических приводов лебедок 6 для регулирования величины заглубления поплавок-волновой электростанции и опоры 1.

При движении морской волны поплавок 3 вместе с индукторами поплавок-волновых генераторов 2 совершает возвратно-поступательные движения, в обмотках статора трех поплавок-волновых генераторов наводятся ЭДС, имеющие сдвиг во времени,  $\varphi_{сдв} = 2\pi/3$ :

$$\begin{aligned} e_1 &= E_m \sin \omega t, \\ e_2 &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ e_3 &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $E_m = 4,44\Phi f_3 W_\Phi$  – максимальное (амплитудное) значение ЭДС;  $W_\Phi$  – число витков одной фазы гене-

ратора;  $\Phi$  – магнитный поток одного полюса индуктора генератора;  $f_3$  – частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора;  $\omega = 2\pi f_3$  – угловая частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора.

В результате работы генератора механическая энергия морских волн преобразуется в электрическую энергию переменного тока с частотой  $f_3$ .

Определим зависимость объема поплавок от требуемой величины генерируемой мощности. Мощность, создаваемая выталкивающей силой поплавок на интервале одного полупериода гребня волны, при подъеме от впадины волны до гребня волны, Вт:

$$P_{\text{попл}} = F_{\text{попл}} v_B = mg4A/T_B, \quad (9)$$

где  $F_{\text{попл}} = mg$  – выталкивающая сила поплавок, Н;  $m$  – масса воды, объем которой равен объему поплавок, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $v_B$  – скорость перемещения волны, м/с.

$$v_B = 2A/(0,5T_B) = 4A/T_B, \quad (10)$$

где  $T_B$  – период волны, с;  $A$  – амплитуда волны, м.

Электрическая мощность, вырабатываемая генератором на этом временном интервале,  $P_r$ , Вт:

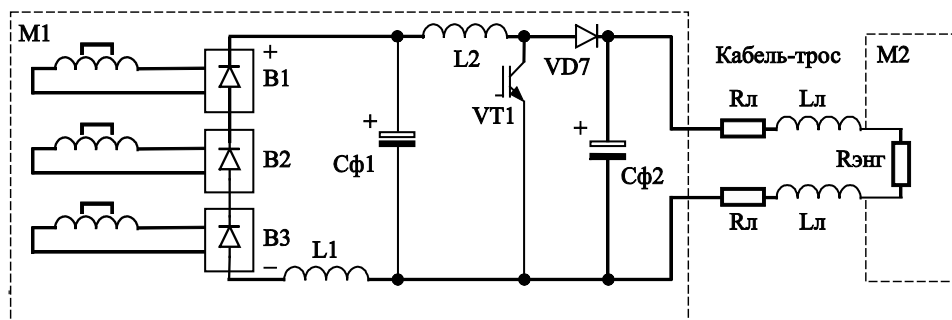
$$P_r = P_{\text{попл}} \eta_r,$$

где  $\eta_r$  – КПД генератора,  $\eta_r \approx 0,7-0,8$ .

Объем поплавок  $V_n$ , необходимый для генерирования поплавок-волновой электростанцией требуемого значения электрической мощности  $P_r$ , определим с учетом того, что масса воды  $m$ , выраженная в кг, численно равна объему поплавок  $V_n$ , выраженному в дм<sup>3</sup>:

$$V_n = P_r T_B / (4Ag\eta_r), \text{ дм}^3. \quad (11)$$

На рис. 9 приведена электрическая схема энергообеспечения подводной доковой станции от по-



**Рис. 9.** Электрическая схема энергообеспечения подводной доковой станции от поплавок-волнового трехфазного генератора линейного типа

**Fig. 9.** Electrical diagram of power supply to docking system from float-operated wave three-phase linear generator



плавкового волнового трехфазного генератора линейного типа. Отличие схемы рис. 9 от схемы рис. 6 состоит в схемах выпрямления генерируемого напряжения. На рис. 6 обмотки электрического генератора соединены в «звезду» и подключены на вход выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме. На рис. 9 обмотка каждого волнового генератора подключена на вход однофазного мостового выпрямителя. Три выпрямителя по цепи постоянного тока соединены последовательно, выходные напряжения трех выпрямителей суммируются.

Благодаря этому в ряде случаев напряжение цепи постоянного тока может быть увеличено до требуемого значения без использования преобразователя DC/DC, повышающего напряжение постоянного тока. В этом случае транзистор VT1, диод VD7, дроссель L2 и конденсатор  $C_{\Phi 2}$  можно исключить из схемы.

Устройство, принцип работы поплавковых волновых генераторов, основные расчетные соотношения и характеристики приведены в [17–19].

### Энергообеспечение подводной доковой станции от поплавковой волновой электростанции с электрическими генераторами вращательного типа

Power supply to underwater docking system from float wave electric power plant with rotary electric generators

Рассмотрим устройство и принцип работы системы энергообеспечения доковой подводной станции от поплавковой волновой электростанции с генератором вращательного типа, используя материалы патента РФ № 205664 «Поплавковая волновая электростанция» (авт. А.А. Мартынов, опубл. 27.07.2021, бюл. № 21) [15].

На рис. 10 приведена структурная схема устройства для энергообеспечения доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генератором вращательного типа.

Устройство содержит два поплавка, 1 и 2, каждый из которых жестко соединен со штоками 3 и 4 соответственно. Поплавки 1 и 2 размещены с пространственным сдвигом, равным половине длины волны. Благодаря этому движение поплавков 1 и 2 происходит с временным сдвигом, равным половине периода волны. При движении одного поплавка от впадины волны к гребню волны под действием выталкивающей силы второй по-

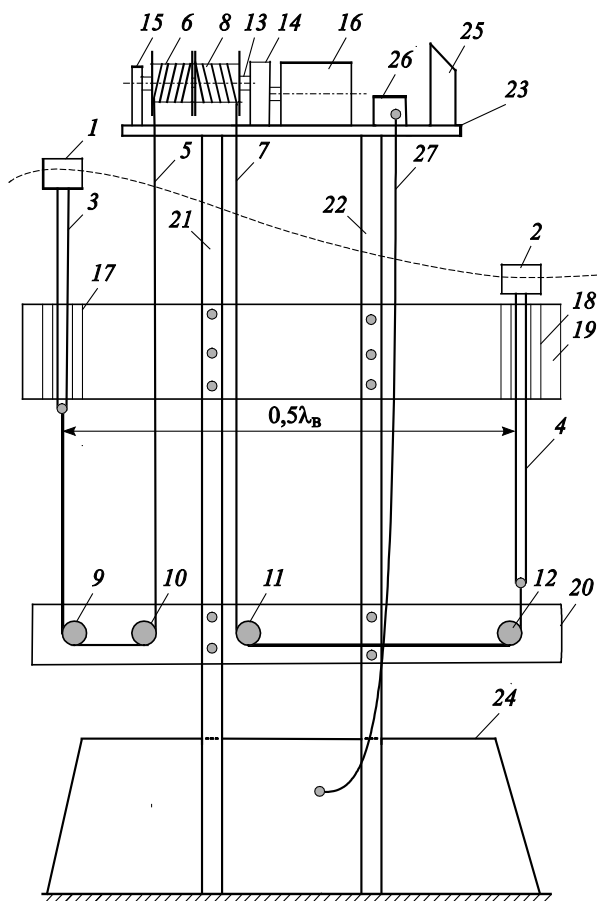


Рис. 10. Структурная схема устройства для энергообеспечения доковой станции от поплавковой волновой электростанции с генератором вращательного типа

Fig. 10. Structural diagram of device for power supply to docking system from float wave electric power plant with rotary generator

плавок перемещается от гребня волны к впадине очередной волны и т.д.

При движении поплавка 1 вверх, от впадины волны к гребню волны, шток 3 перемещается вверх, увлекая за собой трос 5 первого барабана 6. Трос 5 первого барабана 6 разматывается и приводит во вращение барабаны 6 и 8, закрепленные на общем валу 13. Барабаны при движении одного поплавка вверх совершат  $N$  оборотов, причем  $N = 2A/L$ , где  $A$  – амплитуда волны, а  $L$  – длина окружности поверхности барабана, на которую наматывается трос.

Вращение барабанов приводит во вращение входной и выходной валы мультипликатора 14, а также ротор синхронного генератора 16. При этом

скорость вращения выходного вала мультипликатора 14 и ротора синхронного генератора 16 больше скорости вращения барабанов в  $i_m$  раз, где  $i_m$  – коэффициент редукции мультипликатора. Таким образом, при подъеме поплавок 1 от впадины волны к гребню волны ротор синхронного генератора совершит  $N \cdot i_m$  оборотов. При подъеме поплавок 1 поплавок 2 вместе со штоком 4 опускается вниз от гребня волны к впадине волны, трос 7 наматывается на барабан 8, т.к. направления намотки тросов 5 и 7 на барабаны 6 и 8 – противоположные. Движение троса 5 направляется блоками троса первого барабана 9 и 10, а движение штока 3 задается направляющей втулкой 17. Движение троса 7 направляется блоками троса второго барабана 11 и 12, а движение штока 4 задается направляющей втулкой 18. После завершения движения поплавок 1 от впадины волны к ее гребню выталкивающая сила поплавок 1 исчезнет и процесс преобразования механической энергии волны в электрическую энергию с помощью поплавок 1 на этом интервале времени прекратится. Но в это же время поплавок 2 достигнет впадины очередной волны и под действием выталкивающей силы, действующей на него, начнет движение вверх от впадины второй волны к ее гребню, разматывая трос 7 и тем самым приводя во вращение барабаны 6 и 8.

Процесс преобразования механической энергии волны в электрическую энергию продолжится, но уже с помощью поплавок 2. На интервале времени подъема поплавок 2 поплавок 1 вместе со штоком 3 перемещается вниз от гребня волны 1 к впадине волны 2. Трос 5 наматывается на барабан 6, затрачивая лишь небольшую часть энергии поплавок 2 и практически не оказывая существенного влияния на эффективность преобразования энергии морской волны в электрическую энергию. Мощность, вырабатываемая поплавок 2 при подъеме от впадины второй волны к ее гребню и передаваемая на вал синхронного генератора, равна мощности, вырабатываемой поплавок 1 при подъеме от впадины первой волны до ее гребня и передаваемой на вал синхронного генератора. Устройство снабжено балками 19 и 20, закрепленными на вертикальных стойках 21 и 22, верхние концы которых закреплены на горизонтальной опоре 23, а нижние – в фундаменте доковой электростанции 24. На горизонтальной опоре 23 установлены выпрямитель 25 и модуль внешних коммуникаций 26.

Мощность, создаваемая выталкивающей силой поплавок 1 на интервале первого полупериода волны, определяется по формуле (9). Масса  $m$ , выра-

женная в кг, численно равна объему поплавок  $V_{п.}$ , выраженному в  $\text{дм}^3$ .

Электрическая мощность, вырабатываемая синхронным генератором на интервале первого полупериода волны,  $P_{г.}$ , Вт:

$$P_{г.} = P_{\text{попл}} \eta_{\text{пвэ}},$$

где  $\eta_{\text{пвэ}}$  – КПД поплавковой волновой электростанции в целом.

$$\eta_{\text{п.в.э}} = \eta_{г.} \eta_{м.} \eta_{б.}$$

где  $\eta_{г.}$  – КПД синхронного генератора,  $\eta_{г.} \approx 0,8-0,9$ ;  $\eta_{м.}$  – КПД мультипликатора,  $\eta_{м.} \approx 0,9-0,95$ ;  $\eta_{б.}$  – КПД барабана,  $\eta_{б.} \approx 0,9-0,95$ .

Нетрудно установить, что результирующий КПД  $\eta_{\text{пвэ}} \approx 0,65-0,81$ .

Используя приведенные выше расчетные соотношения, можно определить объем поплавок  $V_{п.}$ , необходимый для генерирования синхронным генератором требуемого значения электрической мощности  $P_{г.}$ :

$$V_{п.} = P_{г.} T_{в.} / (4Ag\eta_{\text{п.в.э}}). \quad (12)$$

К примеру, необходимо определить объем поплавок при следующих исходных данных:

$$P_{г.} = 10\,000 \text{ Вт}; T_{в.} = 5 \text{ с}; A = 2,5 \text{ м}; \eta_{\text{пвэ}} = 0,75.$$

$$V_{п.} = P_{г.} T_{в.} / (4Ag\eta_{\text{пвэ}}) = 10\,000 \cdot 5 / (4 \cdot 2,5 \cdot 9,8 \cdot 0,75) = 680 \text{ дм}^3.$$

Объем  $680 \text{ дм}^3$  имеет, в частности, поплавок диаметром 12 дм и высотой 6 дм. Напомним, что поплавковая волновая электростанция имеет два поплавок с одинаковыми размерами.

## Заключение

### Conclusion

Разработаны новые системы и устройства энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов с использованием энергии Мирового океана для заряда аккумуляторных батарей. Данные системы и устройства защищены патентами РФ.

Приведены основные расчетные соотношения, позволяющие в первом приближении оценить зависимость массогабаритных показателей разрабатываемой системы энергообеспечения от генерируемой электрической мощности.

Наибольшую эффективность применения разработанных систем энергообеспечения доковых станций можно прогнозировать для резидентных

подводных роботов и робототехнических комплексов со значительным энергопотреблением при выполнении геологоразведочных, аварийно-спасательных, обзорно-поисковых работ с применением научно-исследовательской, фотографической и телевизионной аппаратуры на больших глубинах с использованием мощных осветительных приборов.

Разработанные системы энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов отличаются более высокой степенью автономности работы, простотой конструкции, надежностью в работе по сравнению с используемыми в настоящее время системами энергообеспечения доковых станций с заменяемыми съемными энергетическими модулями, и, как следствие этого, характеризуются низкими затратами при эксплуатации. Эффективность и непрерывность работы новых систем энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов в меньшей степени зависят от погодных условий в акватории Мирового океана, где проводятся подводные работы.

С учетом сказанного можно прогнозировать востребованность разработанных систем энергообеспечения резидентных подводных роботов и робототехнических комплексов как на внутреннем, так и на внешнем рынке.

## Список использованной литературы

1. Аспекты применения гетерогенных групп робототехнических комплексов повышенной автономности, в том числе из состава обсерваторий, с целью получения океанографических данных и их дальнейшего использования для освоения Арктической зоны / С.Б. Волошин, Ф.О. Драгомощенко, В.Ю. Занин, А.М. Маевский // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на освоение и развитие Арктики и континентального шельфа, 2020. Москва : Технологии развития, 2020. С. 62–75.
2. Бочаров А.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.
3. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов // Известия Томского политехнического ун-та. 2004. Т. 307, № 5. С. 120–123.
4. Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий / В.Ю. Занин, А.М. Маевский, И.В. Кожемякин [и др.] // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа, 2019. Москва : Технологии развития, 2019. С. 18–26.
5. Ким Л.В., Шмаков А.С., Дмитриев С.С. Некоторые конструктивные решения создания донных причальных устройств для подводных аппаратов // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2019. № 8. С. 180–185.
6. Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems : A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market / M. Furuholmen [et al.] // Offshore Mediterranean conference and exhibition (OMC 2013) : proceedings. Ravenna, 2013. P. 20–22.
7. Ridao [et al.]. Intervention AUVs: The next challenge // Annual Reviews in Control. 2015.
8. Scope and feasibility of autonomous robotic subseainter-vention systems for offshore inspection, maintenance and repair / L. Fahrni [et al.] // Advances in Renewable Energies Offshore : Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018). London : Taylor and Francis, 2019. P. 85–95.
9. The development on a streamlined underwater vehicle for autonomous manipulation / X. Jinyu, Z. Tiedong, H. Hai [et al.] // OCEANS 2017: conference proceedings. [Piscataway] : IEEE, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084612.
10. Мартынов А.А. Энергообеспечение подводных аппаратов // Завалишинские чтения'21 : XVI Междунар. конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург : ГУАП, 2021. С. 252–260. DOI 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-252-260.
11. Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В. Способы и устройства энергообеспечения подводных аппаратов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. Вып. 4(398). С. 93–103. DOI 10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103.
12. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации : пат. 2724197 Рос. Федерация / А.А. Мартынов, В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов. № 2019145189; заявл. 25.12.2019; опубл. 22.06.2020, Бюл. № 18. 14 с.
13. Система энергообеспечения подводного аппарата : пат. 2750396 Рос. Федерация / А.А. Мартынов. № 2020144021; заявл. 28.12.2020; опубл. 28.06.2021, Бюл. № 19. 14 с.
14. Способ энергообеспечения подводного энергоаккумулирующего объекта и устройство для его реали-

- зации : заявка на изобретение / *А.А. Мартынов, В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов*. № 2021125518; заявл. 30.08.2021.
15. Поплавковая волновая электростанция : пат. 205664 Рос. Федерация / *А.А. Мартынов*. № 2021114767; заявл. 25.05.2021; опубл. 27.07.2021, Бюл. № 21. 9 с.
16. *Мартынов А.А.* Проектирование и эксплуатация полупроводниковых преобразователей для электро-мехатронных систем. Санкт-Петербург : ГУАП, 2020. 134 с.
17. *Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N.* A review of wave energy converter technology // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. 2009. Vol. 223, № 8. P. 887–902. DOI: 10.1243/09576509JPE782.
18. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К.* Волногенератор поплавкового типа // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2014. Вып. 81(365). С. 133–143.
19. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К.* Основы методики расчета волногенератора поплавкового типа // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2018. Вып. 3(385). С. 115–121.
- vehicles // Technical problems in development of the World Ocean. 2019. Vol. 8. P. 180–185 (*in Russian*).
6. Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems : A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market / *M. Furuholmen* [et al.] // Offshore Mediterranean conference and exhibition (OMC 2013) : proceedings. Ravenna, 2013. P. 20–22.
7. *Ridao* [et al.]. Intervention AUVs: The next challenge // Annual Reviews in Control. 2015.
8. Scope and feasibility of autonomous robotic subsea intervention systems for offshore inspection, maintenance and repair / *L. Fahrni* [et al.] // Advances in Renewable Energies Offshore : Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018). London : Taylor and Francis, 2019. P. 85–95.
9. The development on a streamlined underwater vehicle for autonomous manipulation / *X. Jinyu, Z. Tiedong, H. Hai* [et al.] // OCEANS 2017: conference proceedings. [Piscataway] : IEEE, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084612.
10. *Martynov A.A.* Power supply of underwater vehicles // Zavalishin's Readings'21 : XVI International Conference on Electromechanics and Robot Engineering. St. Petersburg : GUAP, 2021. P. 252–260. DOI 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-252-260 (*in Russian*).
11. *Martynov A.A., Samsygin V.K., Sokolov D.V.* Methods and devices of power supply in underwater vehicles // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 4(398). P. 93–103. DOI 10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103 (*in Russian*).
12. Method of power supply in underwater vehicle and device for its implementation : Pat. 2724197 of Russian Federation / *A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov*. No. 2019145189; appl. 25.12.2019; publ. 22.06.2020. Bulletin No. 18. 14 p. (*in Russian*).
13. System of power supply in underwater vehicle : Pat. 2750396 of Russian Federation / *A.A. Martynov*. No. 202014402; appl. 28.12.2020; publ. 28.06.2021. Bulletin No. 19. 14 p. (*in Russian*).
14. Method of power supply of underwater power storage object and its implementation : Claim for an innovation / *A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov*. No. 2021125518; appl. 30.08.2021 (*in Russian*).
15. Float wave electric power station : Pat. 205664 of Russian Federation / *A.A. Martynov*. No. 2021114767; appl. 25.05.2021; publ. 27.07.2021. Bulletin No. 21. 9 p. (*in Russian*).
16. *Martynov A.A.* Design and operation of semiconductor converters for electro-mechanical systems. St. Petersburg : GUAP, 2020. 134 p. (*in Russian*).

17. *Drew B., Plummer A.R., Sahinkaya M.N.* A review of wave energy converter technology // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy. 2009. Vol. 223, No. 8. P. 887–902. DOI: 10.1243/09576509JPE782.
18. *Martynov A.A., Samsygin V.K.* Wave generator of float type // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2014. Vol. 81(365). P. 133–143 (*in Russian*).
19. *Martynov A.A., Samsygin V.K.* Fundamentals of the method for calculation of float-type wave generator // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Vol. 3(385). P. 115–121 (*in Russian*).

---

### Сведения об авторах

*Мартынов Александр Александрович*, к.т.н., доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Адрес: 190000, Россия, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 67. Тел.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7464-1236>.

*Самсыгин Вадим Константинович*, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-

Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-46. E-mail: setnil123@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.

*Соколов Дмитрий Владимирович*, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-48. E-mail: setnil123@yandex.ru.

### About the authors

*Alexandr A. Martynov*, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Electromechanics and Robotics Department, St. Petersburg University of Aerospace Engineering. Address: 67, Bolshaya Morskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190000. Tel.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7464-1236>.

*Vadim K. Samsygin*, Head of Laboratory, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-46. E-mail: setnil123@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3117-9042>.

*Dmitry V. Sokolov*, Lead Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-48. E-mail: setnil123@yandex.ru.

Поступила / Received: 03.03.22

Принята в печать / Accepted: 28.06.22

© Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В., 2022