

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103
УДК 629.584:621.3.031+621.314

А.А. Мартынов¹, В.К. Самсыгин², Д.В. Соколов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

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

СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Объект и цель научной работы. Объектом являются системы энергообеспечения подводных аппаратов. Цель состоит в сравнительной оценке характеристик систем энергообеспечения подводных аппаратов и поиске путей их совершенствования.

Материалы и методы. Исследование проводилось на основе аналитических методов и компьютерного моделирования электромагнитных процессов систем энергообеспечения подводных аппаратов.

Основные результаты. Выполнена сравнительная оценка характеристик основных систем энергообеспечения подводных аппаратов. Разработаны способ и методики расчета устройств энергообеспечения подводных аппаратов. Показаны пути совершенствования систем энергообеспечения подводных аппаратов.

Закключение. Результаты исследований позволяют определить пути дальнейшего совершенствования характеристик систем энергообеспечения подводных аппаратов и ускорить процесс их внедрения на практике.

Ключевые слова: подводный аппарат, судно-носитель, донное причальное устройство, аккумулятор, энергообеспечение, источник энергии, поплавковый генератор, электромашинно-вентильная система.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-93-103
UDC 629.584:621.3.031+621.314

A. Martynov¹, V. Samsygin², D. Sokolov²

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

² SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

METHODS AND EQUIPMENT FOR POWER SUPPLY OF UNDERWATER VEHICLES

Object and purpose of research. The object of the work is the power supply systems of submersibles. The aim is to assess the characteristics of the submersible energy supply systems and find ways to improve them.

Materials and methods. The study was conducted on the basis of analytical methods and computer simulation of electromagnetic processes of the systems of energy supply of submersibles.

Main results. A comparative assessment of the characteristics of the main systems of energy supply of submersibles has been carried out. New ways and devices powering submersibles, developed methods for calculating these devices. Ways to improve the power supply systems of submersibles are shown.

Conclusion. The results of the research allow us to identify ways to further improve the characteristics of the power supply systems of submersibles and to speed up the process of their implementation in practice.

Key words: submersible, carrier, dock, battery, power supply, wave energy source, float generator, electric machine-vent system.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В. Способы и устройства энергообеспечения подводных аппаратов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 4(398): 93–103.

For citations: Martynov A., Samsygin V., Sokolov D. Methods and equipment for power supply of underwater vehicles. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 4(398): 93–103 (in Russian).

Введение

Introduction

Подводные аппараты (ПА) находят широкое применение в сфере выполнения технологических операций, связанных с обслуживанием, ремонтом и профилактикой подводных трубопроводов и подводных кабельных магистралей связи, а также используются для выполнений широкого спектра научных исследований, аварийно-спасательных работ и т.п. [1–6]. Большое внимание уделяется исследованию шельфа Мирового океана в поисках полезных ископаемых. Выполнение подводных работ требует больших затрат времени, а длительность работы любого ПА под водой определяется количеством электрической энергии, запасенной в его аккумуляторных батареях (АБ). Одна зарядка АБ может обеспечить работу ПА только в течение нескольких часов. Совершенно очевидно, что для выполнения большого объема подводных работ необходимо периодически пополнять запас энергии АБ подводного аппарата. Подводные аппараты можно условно разделить на две группы:

- ПА работающие в ограниченном по площади районе Мирового океана;
- ПА совершающие длительные переходы в акватории Мирового океана.

Для энергообеспечения первой группы ПА находят применение донные причальные устройства, пополняющие запас энергии от бортовой сети судна-носителя.

Для энергообеспечения второй группы ПА часто применяют отдельное судно-носитель, что существенно удорожает стоимость работ, выполняемых подводным аппаратом.

С учетом этого разработка и исследование эффективных систем энергообеспечения ПА являются актуальными задачами.

Системы энергообеспечения подводных аппаратов, использующих энергию бортовой сети судна-носителя

Systems for power supply of underwater vehicles from the onboard grid of mother ship

Энергообеспечение подводных аппаратов можно производить путем зарядки АБ подводных аппаратов как на борту судна-носителя, так и под водой.

В первом случае необходимо поднять ПА на борт. Электрическая энергия постоянного тока передается АБ через электрический разъем, т.е.

с использованием электрического контакта. Достоинством этого решения является отсутствие дополнительных промежуточных преобразователей электрической энергии, снижение потерь мощности и повышение надежности системы зарядки в целом. Основным недостатком этого решения является необходимость подъема ПА при каждой зарядке АБ. Судно-носитель должно находиться в районе работы ПА, что удорожает процесс роботизации подводных работ и ограничивает автономность работы ПА. Кроме этого, выполнение операции подъема ПА осложняется при ухудшении метеоусловий в районе работы ПА – штормах, бурях, туманах и т.п.

Зарядка АБ подводного аппарата под водой возможна при использовании как контактного [4], так и бесконтактного [5–12] способа передачи энергии на подводный аппарат.

Контактная (проводная) система передачи электроэнергии на подводный аппарат

Contact (umbilical) system of power supply to underwater vehicles

Контактная система передачи электрической энергии постоянного тока под водой осуществляется с помощью разъемного электрического соединителя при точном позиционировании ПА относительно источника электрической энергии. При этом способе передачи электрической энергии возникает коррозия положительного электрода соединителя, которая разрушает электрический контакт и снижает надежность зарядного устройства в целом.

Для предотвращения коррозии положительного электрода необходимо надежно изолировать соединитель от морской воды. Решение этой технической сложной задачи существенно усложняет конструкцию соединителя и снижает ее надежность. Поэтому контактный способ передачи электрической энергии на ПА находит ограниченное применение и применяется главным образом при зарядке малых ПА [1].

Бесконтактная (беспроводная) система передачи электроэнергии на подводный аппарат

Non-contact (wireless) system of power supply to underwater vehicles

Бесконтактная (беспроводная) система передачи энергии на ПА реализуется в основном с использо-

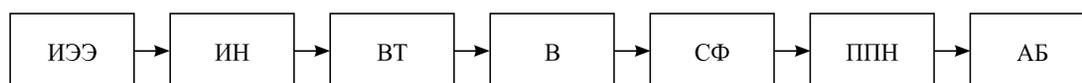


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема бесконтактной системы передачи электрической энергии на подводный аппарат: ИЭЭ – источник электроэнергии; ИН – инвертор напряжения; ВТ – высокочастотный двухобмоточный трансформатор; В – выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; ППН – преобразователь постоянного напряжения; АБ – аккумуляторная батарея

Fig. 1. General flowchart diagram of power supply to underwater vehicle: ИЭЭ – power source; ИН – voltage inverter; ВТ – high-speed double-wound transformer; В – rectifier; СФ – smoother; ППН – DC-DC converter; АБ – storage battery

ванием электромагнитного поля, без использования электрического (проводного) контакта [7–13]. Поэтому данный способ часто называют индукционным, или индуктивным.

На рис. 1 приведена обобщенная функциональная схема бесконтактной передачи электрической энергии на ПА [10].

Основным узлом бесконтактной системы передачи электрической энергии на ПА, во многом определяющим его характеристики, является высокочастотный двухобмоточный трансформатор (ВТ). Сердечник магнитопровода ВТ выполняется разъемным из двух половин. Первичная обмотка трансформатора размещается на стержне первой половины сердечника магнитопровода, а вторичная обмотка – на стержне второй половины. Первичная обмотка вместе с инвертором напряжения (ИН) и источником питания (ИЭЭ) составляют передающую часть зарядного устройства и размещаются на борту судна-носителя. Вторичная обмотка вместе с выпрямителем (В), сглаживающим фильтром (СФ) и регулируемым преобразователем постоянного напряжения (ППН) размещаются на борту ПА.

Недостатком индуктивного способа передачи энергии на ПА является влияние величины немагнитного зазора на магнитную связь первичной и вторичной обмоток трансформатора. Увеличение немагнитного зазора происходит из-за появления наростов, осадков солей на стыковочных плоскостях трансформатора. С увеличением немагнитного зазора существенно возрастает ток холостого хода и ослабляется магнитная связь обмоток трансформатора. Это приводит к снижению величины выходного напряжения, увеличению потерь мощности и росту температуры нагрева трансформатора.

В [10–13] приведены результаты разработки системы для бесконтактной зарядки АБ подводного

аппарата, которые показывали, что с увеличением немагнитного зазора:

- относительная величина тока холостого хода существенно увеличивается и при зазоре, равном 2 мм, составляет 87,5–89 % от величины тока, потребляемого трансформатором при номинальной нагрузке и отсутствии зазора;
- относительный параметр $P_{\text{нр}}/S_1$, характеризующий энергетические показатели системы в целом, существенно снижается; при увеличении зазора в 4 раза относительный параметр $P_{\text{нр}}/S_1$ уменьшается не менее чем в 1,5 раза.

Испытания разработанной бесконтактной системы передачи энергии на ПА подтвердили ее хорошие эксплуатационные характеристики и надежную работу [11].

Системы энергообеспечения подводных аппаратов, использующие энергию Мирового океана

Power supply system of underwater vehicles using ocean energy

Океан обладает огромными запасами энергии волн и течений. Вопросам преобразования энергии морских волн и течений уделяется большое внимание во многих странах мира [1–3], [14–19]. По ориентировочным оценкам потенциальный ресурс энергии волн океанов составляет 8–80 тыс. ТВт в год, ресурс энергии морских течений 0,8–5 ТВт в год [2]. Совершенно очевидно, что использование энергии Мирового океана для заряда аккумуляторных батарей ПА должно способствовать повышению уровня автономности работы ПА и снижению затрат на проведение подводных работ.

Можно указать следующие системы энергообеспечения ПА, использующие энергию Мирового океана, которые могут быть реализованы в настоящее время:

- волновые поплавковые генераторы, поплавковые волновые электростанции;
- обратимые электромашинно-вентильные системы, размещенные на ПА.

Технические решения, которые реализуют перечисленные выше системы, использующие энергию Мирового океана для зарядки аккумуляторных батарей ПА, защищены патентами [15, 19].

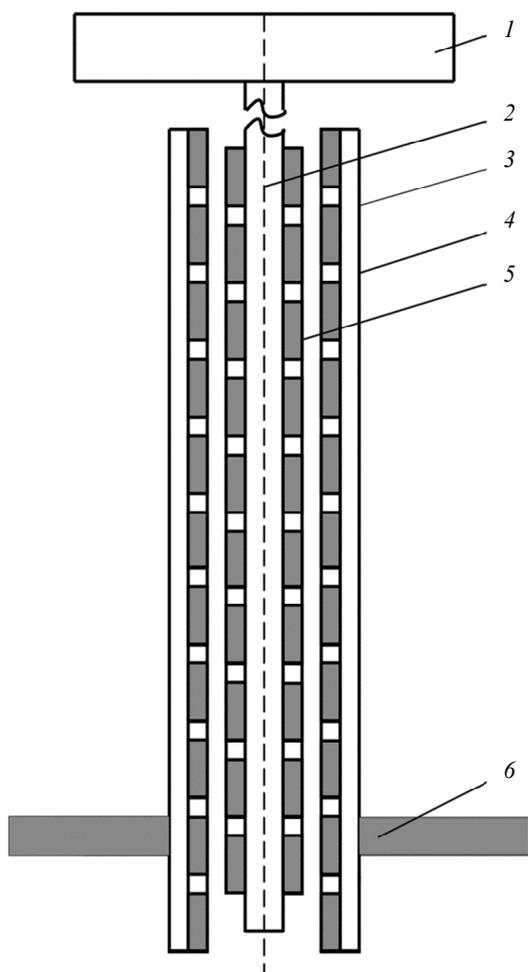


Рис. 2. Конструктивная схема трехфазной поплавковой волновой электростанции, выполненная с единым магнитопроводом: 1 – поплавок; 2 – шток; 3 – корпус; 4 – статор; 5 – индуктор; 6 – фундамент

Fig. 2. Structural scheme of three-phase float wave electric power station with a common magnetic conductor: 1 – float; 2 – rod; 3 – hull; 4 – stator; 5 – inductor; 6 – foundation

Системы энергообеспечения подводного аппарата, использующие энергию морских волн

Power supply system of underwater vehicles using sea wave energy

Преобразование энергии морских волн в электрическую энергию осуществляется волновыми поплавковыми электростанциями. Электрическая энергия, вырабатываемая волновой поплавковой электростанцией, может быть использована для энергообеспечения, например донного причального устройства, и реализации т.н. резидентного базирования автономных необитаемых ПА без использования судна-носителя. Волновые поплавковые электростанции могут быть однофазными или трехфазными и выполняться на мощность от десятков ватт до сотен киловатт [14].

Трехфазная поплавковая электростанция (рис. 2) содержит жестко закрепленный на опоре 6 корпус 3, внутри которого размещен статор 4 с единым ферромагнитным магнитопроводом и трехфазной электрической обмоткой, а также индуктор 5 с многополюсной магнитной системой, полюсное деление которой равно τ . Индуктор размещен на штоке 2, который одним концом жестко соединен с поплавком 1. Корпус генератора в сечении имеет прямоугольную форму и выполнен из немагнитного материала. Трехфазная обмотка статора выполнена по известной технологии обмоток электрических машин переменного тока и размещена в пазах магнитопровода статора с шагом, равным полюсному делению τ .

В поплавковых волновых электростанциях, в которых отсутствует механический редуктор, увеличение частоты генерируемой в обмотке статора ЭДС достигается при выполнении магнитной системы генератора с электрической редукцией [17, 18]. Основным параметром электрической редукции является коэффициент редукции k_p . Частота ЭДС, генерируемой в обмотке статора при возвратно-поступательном движении индуктора f_s , больше частоты колебания волны f_v в число коэффициента электрической редукции раз, т.е. $f_s = k_p f_v$.

Недостатком трехфазных волновых генераторов, трехфазные обмотки статора которых размещены в едином магнитопроводе, является увеличение линейных размеров генератора при реализации электрической редукции. Причем, чем выше требуемое значение коэффициента электрической

редукции, тем длиннее корпус генератора. Следует отметить, что при увеличении длины корпуса генератора возрастает отрицательное влияние воздействия поперечной силы волны на корпус генератора, что ведет к увеличению механических напряжений в корпусе и понижению надежности работы генератора. Возможны механические необратимые повреждения корпуса при высокой волне, штормах и бурях.

Повышение эффективности работы волновых электростанций является ключевой задачей современной волновой электроэнергетики. При решении этой задачи необходимо учитывать как конструктивные особенности поплавковой волновой электростанции, так и условия ее работы. Необходимо искать оптимальные конструктивные решения, при которых высокая эффективность преобразования энергии морских волн сочеталась бы с оптимальными массогабаритными показателями и высокой надежностью. В поплавковой волновой электростанции [15] авторами предложено решение по повышению эффективности преобразования энергии морских волн, повышению устойчивости конструкции генератора к воздействию поперечной силы волны на корпус генератора за счет уменьшения линейных размеров при сохранении требуемой величины электрической редукции.

Конструкция этой поплавковой волновой электростанции приведена на рис. 3, где показано, что ферромагнитные корпуса *1* трех однофазных генераторов жестко соединены друг с другом и тем самым образуют единую конструкцию. Внутри корпуса каждого генератора размещены статор *2* и индуктор *3*, жестко закрепленный на штоке *5*. Для амортизации ударов индуктора при его возвратно-поступательном движении установлены две пружины *4* и *6*. Штоки генераторов жестко соединены с поплавком *7*, единым для трех генераторов. Магнитопроводы статоров генераторов с обмотками размещены в пространстве строго параллельно друг другу, а многополюсные магнитные системы индукторов генераторов сдвинуты в пространстве относительно друг друга на расстояние, равное $2\tau/3$.

Благодаря этому при возвратно-поступательном движении подвижной части поплавковой волновой электростанции в обмотках статоров генерируется трехфазная система напряжений. Выполнение трехфазной поплавковой волновой электростанции по «групповой» схеме, когда трехфазное напряжение получается от трех однофазных генераторов, позволяет существенно уменьшить длину волново-

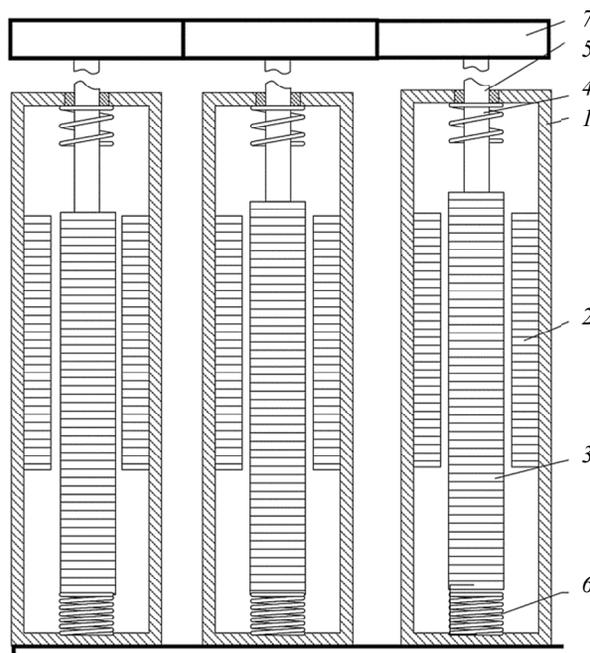


Рис. 3. Конструктивная схема трехфазной волновой поплавковой электростанции, выполненная по «групповой» схеме: *1* – корпус генератора; *2* – статор; *3* – индуктор; *4* и *6* – пружины; *5* – шток; *7* – поплавок

Fig. 3. Structural scheme of three-phase float wave electric power station with a group layout: *1* – generator body; *2* – stator; *3* – inductor; *4* & *6* – springs; *5* – rod; *7* – float

го генератора. Это происходит благодаря тому, что на расстоянии, равном одному полюсному делению магнитной системы индуктора τ , размещен только один паз магнитопровода статора с проводниками обмотки одной фазы.

Методики расчета волновых поплавковых электростанций разработаны авторами и приведены в [16–18]. На начальном этапе проектирования необходимо установить зависимость массы подвижной части m волногенератора от мощности генератора P_r . Воспользуемся уравнением баланса энергии волновой поплавковой электростанции. Энергия, определяемая выталкивающей силой поплавка $W_{\text{полп.}}$, при движении поплавка вверх затрачивается на создание электрической энергии $W_{\text{э.э.}}$, снимаемой с обмотки статора, на повышение потенциальной энергии подвижной части генератора $W_{\text{п.э.}}$ и на преодоление сил сопротивления движению поплавка вверх $W_{\text{с.с.}}$, создаваемых морской водой:

$$W_{\text{полп.}} > W_{\text{э.э.}} + W_{\text{п.э.}} + W_{\text{с.с.}} \quad (1)$$

В первом приближении можно принять равенство энергий $W_{э.э.} = W_{с.с.}$.

Величину электрической энергии можно определить как отношение

$$W_{э.э.} = P_{г.} / v_{волн.}, \quad (2)$$

где $P_{г.}$ – мощность, вырабатываемая генератором на интервале полупериода волны, на котором поплавок перемещается вверх; $v_{волн.}$ – линейная скорость перемещения волны.

Приведем расчетные соотношения для определения перечисленных выше параметров:

$$W_{полл.} = k_{зап.} \cdot F_{полл.} \cdot 2A = mg \cdot 2A + 2P_{г.} \cdot T_{в.} / 4A, \quad (3)$$

где $F_{полл.}$ – выталкивающая сила поплавок; A – амплитуда волны; g – ускорение свободного падения; $T_{в.}$ – период волны.

При равенстве амплитуды перемещения поплавок амплитуде волны время перемещения поплавок вверх, от дна волны к ее гребню, составляет половину периода волны $T_{в.}/2$. Учитывая, что выталкивающая сила поплавок $F_{полл.}$ равна произведению расчетного значения объема поплавок $V_{п.}$ на ускорение свободного падения g , а расчетное значение объема поплавок равно массе подвижной части волногенератора, т.е. $V_{п.} = m$, получим

$$F_{полл.} \geq mg$$

$$k_{зап.} \cdot mg \cdot 2A = mg \cdot 2A + P_{г.} \cdot T_{в.} / 2A \quad (4)$$

или

$$mg \cdot 2A(k_{зап.} - 1) = P_{г.} \cdot T_{в.} / 2A, \quad (5)$$

где $k_{зап.}$ – коэффициент запаса, величина которого может быть принята в пределах от 1,5 до 2,0.

Средние значения скорости морских течений

Average speeds of sea currents

№ п/п	Наименование течения	Скорость течения, км/час
1	Гольфстрим	6
2	Течение Игольного мыса	до 7,5
3	Флоридское	6,5
4	Японское (Курисио)	до 6
5	Восточно-Австралийское	до 5,7

Из соотношения (5) можно приблизительно установить зависимость массы подвижной части волногенератора от его мощности:

$$m \geq P_{г.} \cdot T_{в.} / [4g \cdot A^2 \cdot (k_{зап.} - 1)]. \quad (6)$$

В предварительных расчетах амплитуда волны может быть принята в пределах от 1,5 м до 2,5 м.

Системы энергообеспечения подводных аппаратов, использующие энергию морских течений

Power supply system of underwater vehicles using sea current energy

Для энергообеспечения подводных аппаратов, предназначенных для автономной и длительной работы в акватории Мирового океана без связи с судном-носителем, авторами предложен и запатентован новый способ энергообеспечения ПА и устройство для его реализации [19]. Электрическая энергия для заряда АБ подводного аппарата вырабатывается обратимой электроэнергетической системой самого ПА за счет преобразования кинетической энергии морского течения в электрическую энергию. В акватории Мирового океана есть много течений, скорость которых может обеспечить выработку электрической энергии в объеме, достаточном для эффективного заряда аккумуляторной батареи ПА.

В таблице приведены средние значения скорости некоторых морских течений [20].

Обратимая электроэнергетическая система ПА, использующая энергию морских течений (рис. 4), содержит аккумуляторную батарею 1, обратимый полупроводниковый преобразователь 2, синхронную машину 3, гребной винт 4, устройство контроля положения продольной оси корпуса подводного аппарата и управления им 5 и устройство для фиксации положения продольной оси корпуса подводного аппарата 6 встречно по отношению к направлению потока воды и неподвижно по отношению к морскому дну.

Обмотка статора синхронной машины выполнена многофазной из N трехфазных обмоток, а обратимый полупроводниковый преобразователь сделан по модульной схеме из N однотипных полупроводниковых модулей, мощность каждого из которых равна $1/N$ мощности синхронной машины. При режиме заряда (дозаряда) АБ корпус необитаемого подводного аппарата зафиксирован по отно-

шению к морскому дну с помощью якоря или иного устройства, выполняющего функцию якоря, его продольная ось совпадает с направлением встречного потока воды, который, проходя через лопасти гребного винта, работающего в режиме турбины, приводит его во вращение. Кинетическая энергия потока воды преобразуется в механическую энергию вращения гребного винта. Синхронная машина, находясь в генераторном режиме, вырабатывает электрическую энергию переменного тока и передает ее обратимому полупроводниковому преобразователю.

Обратимый полупроводниковый преобразователь работает в режиме активного выпрямителя, преобразует электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока и заряжает АБ. При заряде АБ для согласования величины выходного напряжения обратимого полупроводникового преобразователя с напряжением АБ цепи постоянного тока N модулей соединены последовательно и подключены к АБ. Согласование величины выходного напряжения с напряжением АБ осуществляется также путем изменения величины коэффициента модуляции μ напряжения цепи переменного тока обратимого полупроводникового преобразователя. Диапазон регулирования коэффициента модуляции μ : $0 < \mu < 1$.

Обратимый полупроводниковый преобразователь может работать в двух режимах. При двигательном режиме работы электрической машины он работает в режиме инвертора и преобразует электрическую энергию постоянного тока АБ в электрическую энергию переменного тока, передаваемую в обмотку статора электрической машины. В цепи переменного тока активных выпрямителей должны быть установлены фильтрующие дроссели.

Мощность P_r , генерируемая синхронной машиной, определяется с учетом эффективности работы генератора и турбины (винта):

$$P_r = \eta_r \cdot \eta_t \cdot P_n \quad (7)$$

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

$$P_n = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \text{ Вт}, \quad (8)$$

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

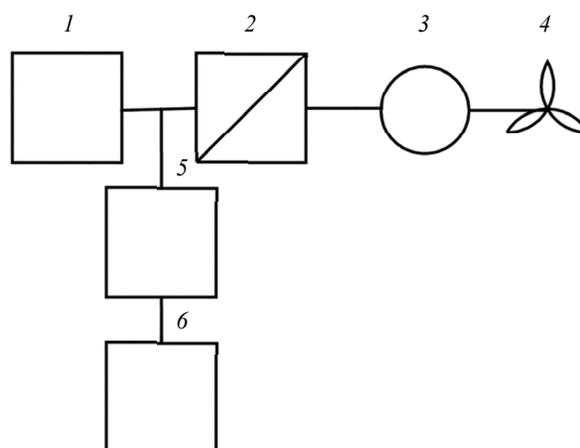


Рис. 4. Функциональная схема обратимой электро-энергетической системы подводного аппарата, использующая энергию морских течений: 1 – аккумуляторная батарея; 2 – обратимый полупроводниковый преобразователь; 3 – синхронная машина; 4 – гребной винт; 5 – устройство контроля положения продольной оси корпуса подводного аппарата и управления им; 6 – устройство для фиксации положения продольной оси корпуса подводного аппарата

Fig. 4. Flowchart diagram of UV reversible power system using sea current energy: 1 – storage battery; 2 – reversible semiconductor transducer; 3 – synchronous machine; 4 – propeller; 5 – device to check the UV longitudinal axis position and UV control; 6 – device to fix the UV longitudinal axis position

$$Q = S_T \cdot v_n \quad (9)$$

где S_T – площадь сечения, через которое проходит поток воды на лопасти винта, м^2 .

Скоростной напор потока воды H можно определить по формуле

$$H = v_n^2 / 2g \quad (10)$$

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

$$P_n = 0,5 \cdot \rho \cdot S_T \cdot v_n^3, \text{ Вт}. \quad (11)$$

Мощность, генерируемая синхронной машиной с учетом минимально возможных значений КПД генератора $\eta_r = 0,9$ и турбины (винта) $\eta_t = 0,5$, равна

$$P_r = 225 \cdot S_T \cdot v_n^3 \quad (12)$$

Для повышения эффективности работы винта как в штатном режиме, так и в режиме турбины

предпочтительна кольцевая конструкция синхронного двигателя с постоянными магнитами [21]. Ротор электрического двигателя кольцевого типа образует кольцо вокруг лопастей гребного винта, что вместе с усовершенствованной формой лопастей подавляет или вообще устраняет кавитацию. Статор электрического двигателя встроен в насадку, которая управляет потоком воды и обеспечивает повышенный упор гребного винта в расширенном диапазоне скоростей. Простые подшипники в ступице ротора несут всю нагрузку и не требуют циркуляционного смазочного насоса. Управление скоростью вращения ротора в двигательном режиме осуществляется изменением частоты напряжения, подаваемого на обмотку статора от обратимого преобразователя.

При зарядке аккумуляторной батареи гребной винт работает в режиме турбины, а синхронной машины – в режиме генератора.

Из «Физики» [22] известно, что при стационарном течении жидкости скорость движения ее частиц через разные поперечные сечения трубы обратно пропорциональны площадям этих сечений. С учетом этого поток, направляемый на лопасти винта, целесообразно пропустить через насадку конической формы с разными диаметрами входного и выходного сечений.

Если принять отношение диаметра входного сечения насадки к диаметру выходного сечения насадки равным, например, 1,41:1, отношение площадей входного и выходного сечения насадки составит 2:1. Следовательно, скорость морского потока в полости винта при установке такой насадки вырастет в 2 раза по отношению к скорости морского потока вне капсулы, а генерируемая мощность с учетом зависимости мощности от скорости потока увеличится в 8 раз.

Совершенно очевидно, что это существенно расширяет районы Мирового океана, пригодные для эффективной зарядки аккумуляторных батарей ПА.

Можно показать, что при $S_r = 0,5 \text{ м}^2$ и установке на двигатель конической насадки с отношением площадей входного и выходного сечения насадки, равным 2:1, при скорости морского течения, равной 1,66 м/с, мощность, генерируемая синхронной машиной с учетом минимально возможных значений КПД генератора составит

$$P_r = 225 \cdot S_r \cdot (4v_n)^3 = 225 \cdot 0,5 \cdot (2 \cdot 1,66)^3 = 4116 \text{ Вт.}$$

Приведенный пример показывает высокую эффективность использования энергии морских течений для энергообеспечения подводных аппаратов.

Заключение

Conclusion

Выполнена сравнительная оценка систем энергообеспечения ПА, установлены достоинства и недостатки контактного и бесконтактного способов передачи электрической энергии бортовой сети судна-носителя на ПА. Приведены результаты исследований разработанной бесконтактной системы передачи электрической энергии на ПА, подтверждающие ее хорошие эксплуатационные характеристики и работоспособность.

Выполнены разработка и исследование новых электроэнергетических систем преобразователей энергии Мирового океана для энергообеспечения подводных аппаратов, а именно:

- волновой поплавковой электростанции для преобразования энергии морских волн в электрическую энергию;
- обратимой электроэнергетической системы подводного робота для преобразования энергии морских течений в электрическую энергию.

Обе электроэнергетические системы обеспечивают преобразование энергии Мирового океана в электрическую энергию, автономность и скрытность работы подводных аппаратов. Применение разработанных систем на практике обеспечит существенное снижение затрат на проведение работ с использованием подводных роботов, поскольку обе системы используют по сути даровую энергию Мирового океана для энергообеспечения подводных роботов.

Список использованной литературы

1. Самоходные обитаемые подводные аппараты / [Ю.А. Боженов, А.П. Борков, В.М. Гаврилов и др.]. Ленинград: Судостроение, 1986. 262, [1] с.
2. 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.
3. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: Хабаровская краевая тип., 2011. 302, [1] с.
4. Система электроснабжения телеуправляемого подводного аппарата с судна-носителя: пат. 46611 Рос. Федерация / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н. № 2005107228/22, заявл. 15.03.2005; опубл. 10.07.2005. 16 с.
5. Moradewicz A.J. Contactless Energy Transmission System with Rotatable Transformer – Modeling, Analyze and Design: Doctoral Thesis (Ph.D.) / Ar-

- tur J. Moradewicz*; Electrotechnical Institute. Warsaw, 2008. 118 p.
6. *Moradewicz A.J., Kazmierkowski M.P.* High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter // *Bulletin of the Polish academy of sciences. Technical sciences.* 2009. Vol. 57, № 4. P. 375–381. DOI: 10.2478/v10175-010-0141-0.
 7. Contactless Power Transfer to a Rotating Disk / *J.P.C. Smeets, D.C.J. Krop, J.W. Jansen, E.A. Lomonova* // *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010).* Piscataway: IEEE, 2010. P. 748–753. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637414.
 8. Устройство бесконтактной подачи электричества: пат. 2487452 Рос. Федерация / *Kau T., Тхронгнумтаи К., Минагава Ю.* [и др.]. № 2011150679/07; заявл. 14.05.2010; опубл. 10.07.2013, бюл. № 19. 66 с.
 9. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект: пат. 2502170 Рос. Федерация / *Кувшинов Г.Е., Копылов В.В., Герасимов В.А.* [и др.]. № 2012118280/07; заявл. 03.05.2012; опубл. 20.12.2013, бюл. № 35. 18 с.
 10. К вопросу разработки беспроводных и проводных систем электроснабжения телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* [и др.] // Перспективные системы и задачи управления: материалы Двенадцатой Всерос. научно-практ. конференции и Восьмой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. С. 388–396.
 11. Исследование устройства для беспроводной передачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* [и др.] // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2017. С. 92–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100.
 12. Расчет и моделирование преобразователя постоянного напряжения с промежуточным резонансным высокочастотным инвертором / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В., Коковин А.А.* // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2018. № 4(386). С. 139–148. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-139-148.
 13. *Мартынов А.А., Салова И.А.* Моделирование электромагнитных процессов трансформатора для бесконтактной передачи электрической энергии на подводный аппарат // *Завалишинские чтения'16: сборник докладов.* Санкт-Петербург: ГУАП, 2016. С. 168–176.
 14. *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. С. 887–902. DOI: 10.1243/09576509JPE782.
 15. Поплавковая волновая электростанция: пат. 194378 Рос. Федерация / *А.А. Мартынов.* № 2019119758; заявл. 24.06.2019; опубл. 12.09.2019, бюл. № 34. 11 с.
 16. Sea Wave Electric Generator To Power An Autonomous Off-Shore Facility / *A.A. Martynov, V.P. Platonov, S.S. Timofeyev* [et al.] // *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019).* Piscataway: IEEE, 2019. P. 8840119. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840119.
 17. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К.* Волногенератор поплавкового типа // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2014. Вып. 81(365). С. 133–142.
 18. *Мартынов А.А., Самсыгин В.К.* Основы методики расчета волногенератора поплавкового типа // *Труды Крыловского государственного научного центра.* 2018. № 3(385). С. 115–121. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-115-121.
 19. Способ энергообеспечения подводного аппарата и устройство для его реализации: пат. 2724197 Рос. Федерация / *Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.* № 2019145189; заявл. 25.12.2019; опубл. 22.06.2020, бюл. № 18. 14 с.
 20. Атлас океанов. Проливы мирового океана. Санкт-Петербург: Глав. упр. навигации и океанографии, 1993. 392 с.
 21. *Бочаров Л.Ю.* Характеристики зарубежных технологий создания кольцевых электродвигателей-двигателей для необитаемых подводных аппаратов и кораблей // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2014. Т. 7, № 2. С. 86–90.
 22. *Фарбер Ф.Е.* Физика: учеб. пособие. Москва: Высш. школа, 1979. 320 с.

References

1. *Yu. Bozhenov, A. Borkov, V. Gavrilov et al.* Self-propelled UUVs. Leningrad: Sudostroyeniye, 1986. 262 [1] p. (*in Russian*).
2. *V. Rulevsky, Yu. Demytyev, O. Bubnov.* Electric power systems for underwater ROVs // *Bulletin of Tomsk Polytechnic University,* 2004. Vol. 307. No. 5. P. 120–123 (*in Russian*).
3. *G. Illarionov, K. Sidenko, L. Bocharov.* Threat from underneath: XXIst century. Khabarovsk: Publishing House of Khabarovsk Region, 2011. 302 p. (*in Russian*).

4. Patent RU 46611. Power supply system for underwater ROV from mother ship. *V. Mishin, O. Bubnov, V. Rulevsky, Yu. Dementyev*. Priority date July 10, 2005. Published on July 10, 2005 (*in Russian*).
5. *Moradewicz A.J.* Contactless Energy Transmission System with Rotatable Transformer – Modeling, Analyze and Design: Doctoral Thesis (Ph.D.) / *Artur J. Moradewicz*; Electrotechnical Institute, Warsaw, 2008. 118 p.
6. *Moradewicz A.J., Kazmierkowski M.P.* High efficiency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter // Bulletin of the Polish academy of sciences. Technical sciences, 2009. Vol. 57, № 4. P. 375–381. DOI: 10.2478/v10175-010-0141-0.
7. Contactless Power Transfer to a Rotating Disk / *J.P.C. Smeets, D.C.J. Krop, J.W. Jansen, E.A. Lomonova* // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010). Piscataway: IEEE, 2010. P. 748–753. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637414.
8. Device for non-contact electric power supply. RU Patent 2487452 / *T. Kai, K. Throngnumtai, Yu. Minagava* et al. No. 2011150679/07, application date 14.05.2010; publication date 10.07.2013, bull. No. 19. 66 p. (*in Russian*).
9. Patent RU 2502170. Device for non-contact power transfer to underwater object / *G. Kuvshinov, V. Kopylov, V. Geraximov, L. Naumov, A. Filozhenko, P. Chepurin*. Priority date March 03, 2012. Published on December 20, 2013 № 35. 18 p. (*in Russian*).
10. *A. Martynov, V. Samsygin, D. Sokolov, M. Sergeev, A. Kokovinov*. On development of wireless and wire-based power systems for underwater ROVs // Advanced control tasks and systems. Materials of the 12th All-Russian Scientific & Practical Conference and the 8th Youth Workshop School Data management and processing in technical systems in technical systems. Publishing house of South Federal University, Rostov-on-Don, 2017. P. 388–396 (*in Russian*).
11. *A. Martynov, V. Samsygin, D. Sokolov, A. Kokovinov, K. Nikulkin*. Wireless charger for underwater unmanned vehicle (UUV) // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2017. Vol. 2 (380). P. 92–100 (*in Russian*). DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100.
12. *A. Martynov, V. Samsygin, D. Sokolov, D. Ulitovsky, A. Kokovinov*. Calculation and simulation of DC-to-DC converter with intermediate resonance-based high-frequency inverter // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2018. Vol. 4(386). P. 139–148 (*in Russian*). DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-139-148.
13. *A. Martynov, I. Salova*. Simulation of electromagnetic processes in transformer for non-contact electric power supply to underwater vehicle // Zavalishin Readings-2016. Compendium of Papers, St. Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), 2016. P. 168–176 (*in Russian*).
14. *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.
15. Float-type wave farm. Patent RU 194378 / *A. Martynov*, No. 2019119758; application date 24.06.2019; publication date 12.09.2019, bull. No. 34. 11 p. (*in Russian*).
16. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). Piscataway: IEEE, 2019. P. 8840119. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840119.
17. *A. Martynov, V. Samsygin*. Float-type wave-power generator. Transactions of the Krylov State Research Centre, 2014. Vol. 81(365). P. 132–142. (*in Russian*).
18. *A. Martynov, V. Samsygin*. Basic principles in calculation of a float-type wave-power generator // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2018. Vol. 3(385). P. 115–121 (*in Russian*). DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-115-121.
19. UUV powering method and device for its implementation. Patent RU 2724197, appl. date 25.12.2019; publ. date 22.06.2020; bul. No. 18. 14 p. (*in Russian*).
20. Atlas of oceans. Ocean straits. St. Petersburg. General Directorate of Navigation and Oceanography, 1993. 392 p. (*in Russian*).
21. *L. Bocharov*. International state of the art in development of ring motors for UUVs and ships // Fundamental and Applied Hydrophysics, 2014. Vol. 7. No. 2. P. 86–90 (*in Russian*).
22. *F. Farber*. Physics. Student’s Guide. Moscow: Vysshaya Shkola, 1979. 320 p. (*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, ул. Большая Морская, д. 67. Тел.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru.

Самсыгин Вадим Константинович, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-46. E-mail: setnil123@yandex.ru.

Соколов Дмитрий Владимирович, ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 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, Bol-

shaya Morskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190000. Tel.: +7 (812) 494-70-34. E-mail: Martynov41@mail.ru.

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.

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: 08.06.21
Принята в печать / Accepted: 28.10.21
© Коллектив авторов, 2021