

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 551.46.077; 551.46.073

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62

Анализ подходов к функционированию автономного необитаемого аппарата и надводного судна при проведении совместных миссий*

А.И. САВЕЛЬЕВ^а, К.Д. КРЕСТОВНИКОВ^б, А.А. ЕРАШОВ^с

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

^а saveliev@iias.spb.su ^б k.krestovnikov@iias.spb.su ^с erashov.a@iias.spb.su

Автономные необитаемые подводные аппараты позволяют успешно решать разнообразные гражданские, научные и военные задачи. Робототехнические комплексы данного класса демонстрируют свою высокую эффективность при выполнении сейсмических исследований, гидрохимического мониторинга акваторий и инспекции состояния технических объектов различного назначения. Аппараты, источником питания которых является аккумуляторная батарея, имеют, как правило, сильно ограниченный запас хода, а также при работе требуют периодического пополнения заряда батарей. Физические свойства среды функционирования накладывают значительные ограничения на применяемые способы коммуникации, что усложняет передачу информации между оператором и автономным необитаемым подводным аппаратом. Доставка аппарата к месту проведения миссии, а также обеспечение питания аппарата и информационного обмена с оператором требуют определенной дополнительной инфраструктуры. Данная работа направлена на поиск и выбор решений в области транспортировки, энергетического и коммуникационного обеспечения автономных необитаемых подводных аппаратов. Рассмотрены конструктивные решения подводных доков и общие принципы построения систем обеспечения функционирования аппаратов данного типа, а также выполнена классификация подходов к энергетическому обеспечению подводных аппаратов. На основании проведенного анализа выбраны наиболее перспективные решения, обеспечивающие долгосрочную автономную работу. Ряд преимуществ в эксплуатации имеют док-станции с возможностью подъема и погружения подводного аппарата непосредственно внутри станции. Использование контактных методов для передачи энергии и информации требует высокой точности позиционирования подводного аппарата и усложнения его сенсорной системы, а также применения особых методов для защиты

* Статья получена 11 ноября 2022 г.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3094.2022.1.6.

контактных пар от воздействия окружающей среды. Данных недостатков лишены беспроводные решения, активно внедряющиеся в настоящее время.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, докование АНПА, стыковка АНПА, резидентные системы, донное причальное устройство, способы заряда АНПА, беспроводная передача энергии, конструкция док-станции

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) различных миссий периодически требуется обеспечивать информационный обмен с оператором и осуществлять заряд или замену его аккумуляторной батареи. Данные процессы могут реализовываться с помощью подъема аппарата на надводное судно, однако это возможно не при любых погодных условиях, а также сопряжено с затратами времени и необходимостью привлечения квалифицированного персонала, что увеличивает эксплуатационные издержки. Авторы работы [1] приводят ряд проблем, связанных с эксплуатацией АНПА: значительное время подготовительных работ, повышенная сложность конструкции обслуживающих систем и самого аппарата, а также проблемы энергетического и коммуникационного обеспечения. Данных недостатков при эксплуатации лишены телеуправляемые подводные аппараты (ТПА), использующие кабель-трос для взаимодействия с надводным судном. В акваториях с сильным течением, неблагоприятной ледовой обстановкой или глубоководными участками ТПА имеют значительные ограничения.

Исследования в области разработки решений для беспроводной передачи энергии, ранее проведенные авторами настоящей работы, позволили сделать вывод, что применение технологии для передачи энергии в водной среде является актуальным [2]. Предлагаемые конструктивные решения разработанных однонаправленных [3] и двунаправленных [4] беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ) предназначены для применения в наземных робототехнических комплексах. Для успешной адаптации БСПЭ к эксплуатации в составе АНПА необходимо провести анализ существующих подходов и решений в данной области.

С учетом вышеизложенного задача данного исследования формулируется следующим образом: на основе анализа существующих решений в области управления и эксплуатации АНПА необходимо провести систематизацию перспективных способов их транспортировки, энергетического и коммуникационного обеспечения.

1. АНАЛИЗ

В первую очередь стоит обратить внимание на системы резидентного типа, где АНПА может быть размещен у стационарной подводной станции значительное время, получать от нее энергию и команды и совершать обмен информацией с надводным судном. Авторами работы [5] представлен результат

разработки гибридного интервенционного АНПА резидентного типа. Основными блоками представленной системы являются наземный пункт управления, подключенная к кабельной инфраструктуре подводная док-станция, подводный аппарат. Док-станция выполняет функции зарядной системы, передачи информации оператору, анализа состояния бортовых систем АНПА. Перемещение АНПА в ближней зоне и преодоление течений, как отмечают авторы, осуществляется посредством винтовых движителей. В бортовые системы АНПА входят навигационная, энергетическая, аварийная системы, а также система связи и группового управления.

Аналогичная система предложена в работе [6]. Предложенная распределенная система роботизированной подводной сейсморазведки предназначена для работы в подледных акваториях. Частями системы являются надводно-подводный робот-носитель «Тень», малогабаритные подводные автономные аппараты – носители сейсмоприемников, подводные автономные аппараты с возможностью отбора проб грунта и функционирования в качестве придонных станций наблюдения. Робот-носитель представляет собой устройство с изменяемой геометрией корпуса. Данный робот может передавать энергию, а также выполнять функции носителя и командно-навигационного ядра для группы более малогабаритных подводных автономных аппаратов – носителей сейсмоприемников. Авторы также ссылаются на аппарат, разработанный «Океанос» совместно с СПбГМТУ, в работе [5]. По представленным в работах иллюстрациям можно сделать вывод, что оба этих аппарата предполагается поднимать на борт надводного судна специальными лебедками для обслуживания.

Авторами изобретения [7] предложена конструкция АНПА, которая позволяет провести замену разряженных аккумуляторов. В качестве аккумуляторов авторами предложено использовать аккумуляторы с индивидуальными компенсаторами давления, которые не требуют специального оборудования. Для замены аккумуляторов необходим подъем АНПА на надводное судно и дополнительный персонал. Как отмечают авторы, процессы стыковки и расстыковки аккумулятора с электрическим разъемом могут составить несколько минут, расчетное время полной замены четырех контейнеров посредством двух человек составляет не более двух часов. Аналогичный подход с заменой предполагается использовать с АНПА Zeno, предназначенного для выполнения коротких миссий [8]. Помимо отмеченных ранее особенностей, подобные подходы требуют разработки специальных конструкций и устройств АНПА для фиксации и замены аккумуляторов.

Авторы работы [9] предлагают док-станцию, на которой заряд АНПА под водой производится с применением контактных методов. На АНПА и док-станции установлены части электрического штепсельного фланцевого разъема производства фирмы SIEMENS. Разъемное электрическое соединение также позволяет передавать информацию посредством интерфейса RS-485. Док-станция оборудована механизмом осевого центрирования, механизмом фиксации и механизмом коммутации разъемного соединения. Для навигации АНПА

перед входом в док-станцию используются четыре световых маяка, установленные по периметру воронки, направляющей аппарат в процессе входа в док. После захода аппарата в док выполняется осевое центрирование, фиксация, а далее – коммутация разъемного соединения. Для успешной коммутации разъемного соединения используется гибкий механизм, состоящий из пружины и карданного шарнира. Авторы работы провели успешные практические испытания разработанного решения. Иллюстрации в работе позволяют сделать вывод о том, что погружение и подъем АНПА на надводное судно посредством данной док-станции не рассматривается.

Система *Seaeye Sabertooth* [10, 11] предполагает стыковку АНПА с подводным доком, опускаемым с надводного судна или платформы. При стыковке *Seaeye Sabertooth* выполняет заряд аккумуляторной батареи, передает собранные данные и получает информацию о предстоящей миссии. Управление данным АНПА выполняется оператором и контролируется с использованием видео или данных гидролокатора, отправляемых оператору по каналу связи с низкой пропускной способностью (кабель-трос или низкочастотная радиосвязь). Кроме ручного режима управления АНПА также имеет автономный режим для выполнения заранее запрограммированного осмотра определенной территории или передвижения в определенное место. Док-станция помещена в защитное сооружение. Заряд АНПА выполняется посредством БСПЭ, которая может обеспечить передаваемую мощность до 2 кВт. Также авторы отмечают, что для передачи данных возможно применение расположенного на док-станции беспроводного радиомодема. Время автономной работы АНПА составляет примерно 2,4 часа, при этом максимально возможная дистанция перемещения аппарата соответствует диапазону 30...40 км.

Беспроводная передача энергии между подводным доком и АНПА является перспективным решением и позволяет повысить надежность функционирования АНПА. В книге [12] рассматривается проблема бесконтактной передачи энергии АНПА при базировании в подводном положении с применением донного причального устройства в качестве док-станции. Описываемая система представляет собой обмотки трансформатора, первичная часть которого установлена на донное причальное устройство, вторичная – на АНПА. Обе части системы представляют собой герметичные оболочки толщиной в несколько миллиметров, в которые помещены обмотки. Одним из ограничений работы системы является то, что оси обмоток при передаче энергии должны совпадать.

Бесконтактная система стыковки для АНПА с использованием донного причального устройства, оборудованного БСПЭ, рассматривается авторами работы [13]. Рассматриваемая док-станция состоит из несущей части конструкции и основного блока, оснащенного системой наведения и блокировки, камерой, навигационными устройствами, устройствами сбора данных и беспроводной связи. Станция имеет конструкцию для стыковки с АНПА, состоящую из направляющей воронкообразного типа и запорных элементов. Центр конструкции находится в 3,25 м от дна. Внутренний и наружный диаметры

входа составляют 300 мм и 1200 мм соответственно. Стыковка выполняется с использованием акустической (на дистанции в пределах 100 м) и оптической навигации (на дистанции в пределах 20 м). После успешной стыковки АНПА запирается в воронке электромагнитным замком. В случае успешной стыковки передающая часть БСПЭ с достаточной точностью совмещается с приемной катушкой АНПА. Док-станция подключена к кабельной сети океанских обсерваторий с помощью специального кабеля, посредством которого получается энергия и обеспечивается связь. Для передачи данных под водой используется электромагнитно-волновая связь.

Воронкообразный док и оптическая навигация используется для докования АНПА, представленного в [14] и [15]. В [14] воронка док-станции значительно больше АНПА. Для докования используется пять световых индикаторов. Эксперименты по докованию АНПА проводились в бассейне без течения, при этом док-станция была стационарной и всегда находилась в поле зрения камеры АНПА. Авторы работы [15] рассматривают способы докования в целом. В качестве преимуществ доков воронкообразного типа было отмечено, что данная конструкция дает возможность направлять АНПА при стыковке и не требует высокой точности позиционирования.

В задачах позиционирования АНПА относительно док-станции помимо световых индикаторов возможно использование технологии позиционирования на основе реперных маркеров ArUco, ARToolKit и AprilTag, применяемой в наземной робототехнике [16, 17]. Данное направление активно развивается, публикуются исследования, посвященные улучшению детектирования маркеров в подводных условиях, так как точность определения маркера зависит от условий освещенности, рассеивания света, а также от степени замутненности воды [18, 19].

Оптическая навигация используется при доковании АНПА в [20]. В работе представлена система подводных световых маркеров, которые возможно использовать для корректирования данных, получаемых с бортовой инерциальной навигационной системы. АНПА хранится на борту надводного судна внутри системы развертывания и возврата, представляющей собой стационарное донное устройство. Следует отметить, что применение подводных световых маркеров ограничено степенью замутненности воды.

Аналогичное решение с использованием световых маркеров и донной док-станции для АНПА рассматривается в [21], где показано, что донная станция используется для пополнения запаса энергии АНПА. В работе описываются проведенные эксперименты, в которых АНПА удалось проработать в течение трех суток, совершать стыковку со станцией в условиях видимости менее двух метров и течением 0,5 м/с. Передача команд АНПА и обмен данными для проверки состояния аппарата осуществлялись посредством акустических волн.

Для рассмотренных разновидностей АНПА в зависимости от их способа перемещения, а также типа док-станции возможно несколько подходов к процессу докования. На данный процесс также влияет то, как расположены приемные и передающие компоненты БСПЭ. Проведенный анализ в направлении

мест установки передающей части БСПЭ позволил выделить следующие способы размещения. Возможно горизонтальное размещение устройства на поверхности донных док-станций [22–24] (рис. 1).

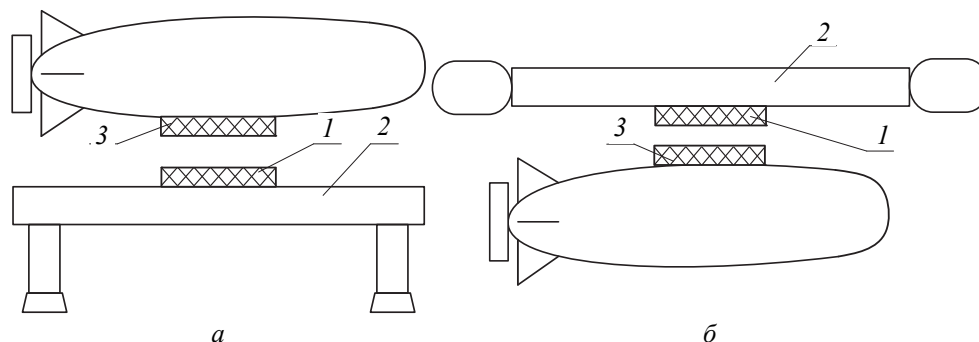


Рис. 1. Горизонтальная установка передающей части БСПЭ 1 на док-станции 2:

a – на верхней части; *б* – в нижней части; 3 – приемная часть БСПЭ

Fig. 1. Horizontal installation of the WPTS transmitting part 1 on the doc-station 2:

a – on the top; *б* – at the bottom; 3 is the receiving part of WPTS

Возможно горизонтальное размещение передающей части БСПЭ на надводной док-станции в нижней части таким образом, чтобы АНПА не потребовалось всплывать [25] (рис. 1, *б*). Также потенциально возможна установка передающей части вертикально в носовой или передней части АНПА [10].

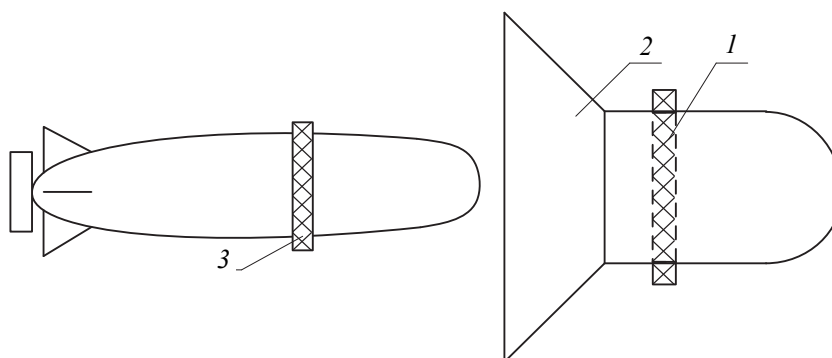


Рис. 2. Установка передающей части БСПЭ 1 на корпусе док-станции 2,

3 – приемная часть БСПЭ

Fig. 2. Installation of the WPTS transmitting part 1 on the doc-station body 2,

3 is the receiving WPTS part

В случае док-станций с воронкообразной направляющей для АНПА торпедообразной формы передающую катушку БСПЭ соленоидного типа располагают таким образом, чтобы аппарат находился внутри этой катушки (рис. 2). Данный способ установки представлен в работе [26]. Аналогичный способ установки в воронкообразной док-станции рассмотрен в [27, 28].

В рамках рассматриваемого способа установки БСПЭ необходимо, чтобы корпус аппарата был изготовлен из экранирующего материала, соответствующего по параметрам рабочей частоте БСПЭ, или чтобы электроника была размещена в местах, в которых нет воздействия магнитных полей, создаваемых БСПЭ. Перечисленные особенности делают данный вариант установки менее универсальным и конструктивно более сложным, чем способы горизонтального расположения.

Общими для рассмотренных вариантов расположения являются способы получения энергии для заряда аккумулятора АНПА: от надводного судна по кабель-тросу или от альтернативных источников энергии. Последний способ в случае горизонтального расположения передающей части возможно реализовать посредством дополнительного оборудования, размещаемого на надводной док-станции или иной платформе.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторами рассмотренных работ в основном предлагаются системы для эксплуатации АНПА с донными док-станциями. Док-станции с находящимся внутри АНПА опускают в водоемы с палуб надводных судов. Затем при погружении док-станций происходит выход АНПА из дока, выполнение им миссии и докование для поднятия обратно на надводное судно. Крепление АНПА внутри док-станций может осуществляться посредством электромагнитов или механических устройств. Для снижения требований к точности позиционирования АНПА и упрощения задачи стыковки с док-станцией распространено применение направляющих конструкций воронкообразного типа.

Док-станции выполняют функции заряда аккумуляторной батареи АНПА, контроля его состояния, передачи информации или команд надводному судну от АНПА и наоборот. Результаты проведенного анализа позволили классифицировать возможные подходы к энергетическому обеспечению АНПА, схематично представленные на рис. 3.

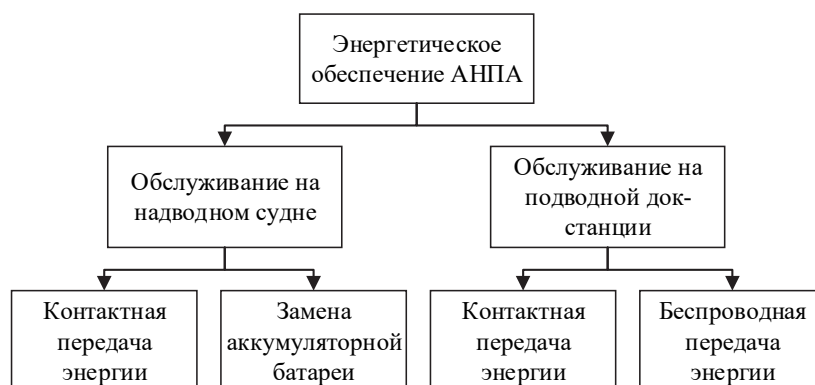


Рис. 3. Подходы к энергетическому обеспечению АНПА

Fig. 3. Approaches to energy supply of AUV

Из рис. 3 следует, что при обслуживании АНПА на подводной док-станции подход, подразумевающий замену аккумуляторной батареи, не используется. Это обусловлено высокой сложностью автоматизации данного процесса, а также требованиями к качественному контролю герметичности АНПА после проведения работ по замене батареи. Применение технологий беспроводной передачи энергии дает ряд преимуществ для подводной док-станции, но при обслуживании АНПА на надводном судне данный подход теряет свою актуальность. Данный факт обусловлен наличием потерь при передаче энергии [2], а также сравнительно большими габаритами приемной части системы по сравнению с электрическим разъемом. Стоит отметить, что для коммуникации с АНПА, как правило, используется тот же подход, который применяется для передачи энергии.

Использование контактных методов, подразумевающих автономную эксплуатацию, требует высокой точности позиционирования АНПА и усложнения его сенсорной системы, а также применения особых методов для защиты контактных пар от воздействия окружающей среды. Док-станции, оборудованные контактной системой для передачи энергии и информации, имеют в своем составе механизмы для центрирования и фиксации АНПА, а также механизмы для коммутации разъемного электрического соединения. Механические системы могут снижать общую надежность док-станции, а также требуют периодического обслуживания. Использование бесконтактных способов передачи энергии, а именно индуктивного способа, увеличивает общую надежность системы и снижает требования к точности позиционирования АНПА. Беспроводная передача энергии и информации в общем реализуется путем размещения передающей и приемной катушек таким образом, чтобы приемная часть находилась в соосном положении относительно расположенной на док-станции передающей части для достижения максимально возможной эффективности [29]. При этом сами док-станции имеют соединение с надводным судном или иным объектом через кабель-трос, посредством которого передается энергия и информация. В целом проведенный обзор позволяет сделать вывод, что док-станции дают возможность реализовать длительную и безопасную работу АНПА без поднятия на поверхность. Также они могут обеспечить легкий доступ человека к АНПА при необходимости и безопасность АНПА при поднятии его на борт судна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ подходов к транспортировке АНПА, энергетическому и коммуникационному обеспечению при выполнении совместных миссий с надводным судном. Рассмотрены варианты размещения беспроводной системы передачи энергии на док-станции. Результаты анализа позволили выделить ряд подходов к энергетическому обеспечению АНПА, которые используются при обслуживании на подводной док-станции и надводном судне. Энергетические ресурсы АНПА с питанием от

аккумуляторной батареи ограничены, поэтому в случае удаленности миссии от берега или объекта базирования транспортировка аппарата осуществляется на надводном судне. В месте проведения миссии необходимо спустить АНПА на воду, при этом возможен либо спуск отдельного аппарата, либо спуск АНПА совместно с док-станцией. Перспективным способом погружения и подъема АНПА на надводное судно является применение док-станций, которые позволяют располагать АНПА внутри во время проведения данных операций. Док-станция позволяет функционировать АНПА продолжительное время без необходимости поднятия на надводное судно, а также позволяет более безопасно осуществлять погружение и поднятие. Для питания и заряда аккумуляторной батареи аппарата док-станции оборудуются контактными и беспроводными системами передачи энергии. Применение беспроводных технологий позволяет отказаться от сложных механических узлов, снизить требования к точности позиционирования аппарата и повысить общую надежность АНПА и док-станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Resident autonomous underwater vehicle systems – a review of drivers, applications, and integration options for the subsea oil and gas market / M. Furuholmen, A. Hanssen, R. Carter, K. Hatlen, J. Siesjo // Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. – Ravenna, Italy, 2013.
2. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Исследование эффективности беспроводной системы передачи энергии при эксплуатации в воде и растворах // Датчики и системы. – 2022. – № 2 (261). – С. 19–27. – DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3.
3. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless power transmission system based on coreless coils for resource reallocation within robot group // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Cham: Springer, 2019. – P. 193–203. – DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19.
4. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics // Radioengineering. – 2021. – Vol. 30, N 1. – P. 142–149. – DOI: 10.13164/re.2021.0142.
5. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Перспективные системы и задачи управления: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов н/Д., 2019. – С. 91.
6. Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях / Б.А. Гайкович, В.Ю. Занин, В.С. Тарадонов, А.П. Блинков, И.В. Кожемякин, М.Ю. Токарев, Е.А. Бирюков // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. – М., 2018. – С. 64–86.
7. Патент № 2082646 Российская Федерация. Спасательно-рабочий подводный аппарат: опубл. 27.06.1997 / Доронин В.Д., Крылов Е.В., Дикарев Н.Ф., Лафер Р.И., Лавковский С.А., Федяев В.А., Козлов Ю.Г., Жучков А.И., Шитов Ю.Н., Агишев Е.Р., Голубев В.А. – 6 с.
8. Development and design of a compact autonomous underwater vehicle: Zeno AUV / J. Gelli, A. Meschini, N. Monni, M. Pagliai, A. Ridolfi, L. Marini, B. Allotta // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51 (29). – P. 20–25. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.463.
9. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission / J. Guo, R. Zheng, X. Yu, A. Wei, B. Yang // 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). – IEEE, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.

10. Johansson B., Siesjö J., Furuholm M. Seacye Sabertooth a hybrid AUV/ROV offshore system // OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle. – IEEE, 2010. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5663842.
11. Johansson B., Siesjö J., Furuholm M. Seacye Sabertooth, a hybrid AUV/ROV offshore system // SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition. – Aberdeen, UK, 2011. – DOI: 10.2118/146121-MS.
12. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.
13. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle / R. Lin, D.-J. Li, T. Zhang, M. Lin // Journal of Marine Science and Technology. – 2019. – Vol. 24 (3). – P. 902–916.
14. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera / J.Y. Park, B.H. Jun, P.M. Lee, J. Oh // Ocean Engineering. – 2009. – Vol. 36 (1). – P. 48–61.
15. Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle docking // Springer Handbook of Ocean Engineering. – Cham: Springer, 2016. – P. 387–406.
16. Толстой И.М., Захаров К.С., Кан И.А. Локализация и навигация мультиагентной робототехнической системы на основе ARUCO-маркеров // Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019). – СПб., 2019. – С. 39–47.
17. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами / А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1279–1306. – DOI: 10.15622/ia.20.6.4.
18. Detecting square markers in underwater environments / J. Čejka, F. Bruno, D. Skarlatos, F. Liarokapis // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11 (4). – P. 459. – DOI: 10.3390/rs11040459.
19. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments / D.B. dos Santos Cesar, C. Gaudig, M. Fritsche, M.A. dos Reis, F. Kirchner // OCEANS 2015 – Genova. – IEEE, 2015. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.
20. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles / P. Tršić, A. Weir, J. Riordan, E. Omerdic, D. Toal, G. Dooley // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (2). – P. 529.
21. Jabari R., Cheng T. Autonomous evolution robotic systems for underwater surveillance and inspection // Offshore Technology Conference (OTC-2020). – Houston, TX, USA, 2020. – Vol. 1. – P. 464–474.
22. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 224. – P. 108744. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108744.
23. Yang C., Wang T., Chen Y. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform // IET Power Electronics. – 2019. – Vol. 12 (8). – P. 2108–2117. – DOI: 10.1049/iet-pel.2018.5663.
24. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles / M. Ogihara, T. Ebihara, K. Mizutani, N. Wakatsuki // OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. – IEEE, 2015. – P. 1–5. – DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7404400.
25. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean / S. Yoshida, M. Tanomura, Y. Hama, T. Hirose, A. Suzuki, Y. Matsui, N. Sogo, R. Sato // 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). – IEEE, 2016. – P. 177–180. – DOI: 10.1109/auv.2016.7778668.
26. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications / C. Cai, Y. Zhang, S. Wu, J. Liu, Z. Zhang, L. Jiang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 65432–65442. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984530.
27. Shi J., Li D., Yang C. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications // Journal of Zhejiang University. Science C. – 2014. – Vol. 15 (1). – P. 51–62. – DOI: 10.1631/jzus.C1300171.

28. Yang C., Lin M., Li D. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2018. – Vol. 45 (2). – P. 430–441. – DOI: 10.1109/JOE.2018.2872449.

29. Krestovnikov K., Erashov A. Research of performance characteristics of WPT system associated with mutual arrangement of coils // Electromechanics and Robotics. – Singapore: Springer, 2022. – P. 359–369. – DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_31.

Савельев Антон Игоревич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автономных робототехнических систем, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – математическое обеспечение, кросс-платформенные программные средства и мобильные сервисы окружающего киберфизического пространства, методы и алгоритмы управления робототехническими системами. Имеет более 100 печатных работ. E-mail: saveliev@iiias.spb.su

Крестовников Константин Дмитриевич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – модели и алгоритмы распределения энергетических ресурсов в рое робототехнических средств путем двунаправленной беспроводной передачи энергии, мехатроника. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: k.krestovnikov@iiias.spb.su

Ерашов Алексей Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социоконвергентных систем Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы управления робототехническими средствами с применением технического зрения и машинного обучения. Имеет более 15 печатных работ. E-mail: erashov.a@iiias.spb.su

Saveliev Anton I., PhD (Eng.), head of the Autonomous Robotic System laboratory, senior researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical software, cross-platform software and mobile services of the surrounding cyber-physical space, methods and algorithms of robotic systems controlling. He has more than 100 publications. E-mail: saveliev@iiias.spb.su

Krestovnikov Konstantin D., junior researcher in the Autonomous Robotic Systems laboratory, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on models and algorithms for the distribution of energy resources in a swarm of robotic means by bi-directional wireless power transfer, and mechatronics. He has more than 30 publications. E-mail: k.krestovnikov@iiias.spb.su

Erashov Aleksei A., junior researcher in the laboratory of Big Data Technologies in Socio-cyberphysical Systems, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on methods and algorithms for controlling robots using computer vision and machine learning. He has more than 15 publications. E-mail: erashov.a@iiias.spb.su

Analysis of approaches to functioning of an autonomous unmanned vehicle and a surface ship in joint missions *

A.I. Saveliev^a, K.D. Krestovnikov^b, A.A. Erashov^c

Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14 Line V.O., Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

^a saveliev@iias.spb.su ^b k.krestovnikov@iias.spb.su ^c erashov.a@iias.spb.su

Abstract

Autonomous unmanned vehicles can successfully solve a variety of civil, scientific and military tasks. Robotic complexes of this class demonstrate their high efficiency when performing seismic surveys, hydrochemical monitoring of water areas and inspection of technical facilities of various purposes. Vehicles powered by a rechargeable battery, as a rule, have a very limited power reserve, and require periodic replenishment of the battery charge. The physical properties of the operating environment impose significant limitations on the communication methods used, which complicates the transfer of information between the operator and an autonomous unmanned submersible. Delivery of the vehicle to the mission site, as well as providing power to the vehicle and information exchange with the operator require some additional infrastructure. This paper focuses on finding and selecting solutions for transportation, power and communications support for autonomous underwater vehicles. The constructional solutions of underwater docks and general principles of building systems for ensuring the operation of this type of vehicles are considered, and a classification of approaches to the energy supply of underwater vehicles is made. Based on the analysis the most perspective solutions ensuring long-term autonomous operation were selected. Docking stations with the ability to lift and dive an underwater vehicle directly inside the station have a number of operational advantages. The use of contact methods for energy and information transfer requires high accuracy of underwater vehicle positioning and complication of its sensor system, as well as application of special methods for protection of contact pairs from environmental impacts. These disadvantages are deprived by wireless solutions, which are actively introduced at present.

Keywords: autonomous underwater vehicle, AUV docking, AUV docking, resident systems, bottom mooring device, AUV charging methods, wireless power transfer, docking station design

REFERENCES

1. Furuholmen M., Hanssen A., Carter R., Hatlen K., Siesjo J. Resident autonomous underwater vehicle systems – a review of drivers, applications, and integration options for the subsea oil and gas market. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, Ravenna, Italy, 2013.
2. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Issledovanie effektivnosti besprovodnoi sistemy peredachi energii pri ekspluatatsii v vode i rastvorakh [Study of efficiency of wireless power transmission system when operating in water and solutions]. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2022, no. 2 (261), pp. 19–27. DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3.
3. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless power transmission system based on coreless coils for resource reallocation within robot group. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham, Springer, 2019, pp. 193–203. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19.

* Received 11 November 2022.

The reported study was funded by the grant MK-3094.2022.1.6 from the President of the Russian Federation.

4. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics. *Radioengineering*, 2021, vol. 30 (1), pp. 142–149. DOI: 10.13164/re.2021.0142.
5. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. [Development of a lightweight interventional autonomous unmanned underwater vehicle for use in underwater resident systems]. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Perspective systems and control tasks]. Materials of XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and X Youth School-Seminar "Management and Processing of Information in Technical Systems", Rostov-on-Don, 2019, p. 91. (In Russian).
6. Gaikovich B.A., Zanin V.Yu., Taradonov V.S., Blinkov A.P., Kozhemyakin I.V., Tokarev M.Yu., Biryukov E.A. Kontseptsiya robotizirovannoi podvodnoi seismorazvedki v podlednykh akvatoriakh [Concept of robotic underwater seismic survey in submarine areas]. *Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tehnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2018 goda* [Collection of works by laureates of the International contest of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and exploitation of the Arctic and the continental shelf, 2018]. Moscow, 2018, pp. 64–87.
7. Doronin V.D., Krylov E.V., Dikarev N.F., Lafer R.I., Lavkovskij S.A., Fedjaev V.A., Kozlov Yu.G., Zhuchkov A.I., Shitov Yu.N., Agishev E.R., Golubev V.A. *Spasatel'no-rabochii podvodnyi apparat* [Rescue work submersible vehicle]. Patent RF, no. 2082646, 1997.
8. Gelli J., Meschini A., Monni N., Pagliai M., Ridolfi A., Marini L., Allotta B. Development and design of a compact autonomous underwater vehicle: Zeno AUV. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (29), pp. 20–25. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.463.
9. Guo J., Zheng R., Yu X., Wei A., Yang B. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission. *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*. IEEE, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.
10. Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M. Seaeeye Sabertooth a hybrid AUV/ROV offshore system. *OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle*. IEEE, 2010, pp. 1–3. DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5663842.
11. Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M. Seaeeye Sabertooth, a hybrid AUV/ROV offshore system. *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition*, Aberdeen, UK, 2011. DOI: 10.2118/146121-MS.
12. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye* [Underwater robotic: systems, technologies, applications]. Vladivostok, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2018. 368 p.
13. Lin R., Li D.-J., Zhang T., Lin M. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, vol. 24 (3), pp. 902–916.
14. Park J.Y., Jun B.H., Lee P.M., Oh J. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera. *Ocean Engineering*, 2009, vol. 36 (1), pp. 48–61.
15. Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle docking. *Springer Handbook of Ocean Engineering*, Cham, Springer, 2016, pp. 387–406.
16. Tolstoy I.M., Zakharov K.S., Kan I.A. [Localization and navigation of a multi-agent robotics system based on ARUCO markers]. *Pyatyi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo in-tellekta» (BTS-II-2019)* [Fifth All-Russian Scientific and Practical Seminar "Unmanned Vehicles with Artificial Intelligence"], St. Petersburg, 2019, pp. 39–47. (In Russian).
17. Erashov A., Kamynin K., Krestovnikov K., Saveliev A. Metod otsenki vremeni besprovodnoi peredachi energeticheskikh resursov mezhdu dvumya robotami [Method for estimating time of wireless transfer of energy resources between two robots]. *Informatika i avto-matizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, vol. 20 (6), pp. 1279–1306. DOI: 10.15622/ia.20.6.4.
18. Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Detecting square markers in underwater environments. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (4), p. 459. DOI: 10.3390/rs11040459.

19. Santos Cesar D.B. dos, Gaudig C., Fritsche M., Reis M.A. dos, Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. *OCEANS 2015 – Genova*. IEEE, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.
20. Trslíć P., Weir A., Riordan J., Omerdic E., Toal D., Dooly G. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles. *Sensors*, 2020, vol. 20 (2), p. 529.
21. Jabari R., Cheng T. Autonomous evolution robotic systems for underwater surveillance and inspection. *Offshore Technology Conference (OTC-2020)*, Houston, TX, USA, 2020, vol. 1, pp. 464–474.
22. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 224, p. 108744. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108744.
23. Yang C., Wang T., Chen Y. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform. *IET Power Electronics*, 2019, vol. 12 (8), pp. 2108–2117. DOI: 10.1049/iet-pel.2018.5663.
24. Ogiwara M., Ebihara T., Mizutani K., Wakatsuki N. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles. *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*. IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7404400.
25. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., Hirose T., Suzuki A., Matsui Y., Sogo N., Sato R. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean. *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. IEEE, 2016, pp. 177–180. DOI: 10.1109/auv.2016.7778668.
26. Cai C., Zhang Y., Wu S., Liu J., Zhang Z., Jiang L. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 65432–65442. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984530.
27. Shi J., Li D., Yang C. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, vol. 15 (1), pp. 51–62. DOI: 10.1631/jzus.C1300171.
28. Yang C., Lin M., Li D. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, vol. 45 (2), pp. 430–441. DOI: 10.1109/JOE.2018.2872449.
29. Krestovnikov K., Erashov A. Research of performance characteristics of WPT system associated with mutual arrangement of coils. *Electromechanics and Robotics*. Singapore, Springer, 2022, pp. 359–369. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_31.

Для цитирования:

Савельев А.И., Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Анализ подходов к функционированию автономного необитаемого аппарата и надводного судна при проведении совместных миссий // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 49–62. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62.

For citation:

Saveliev A.I., Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Analiz podkhodov k funktsionirovaniyu avtonomnogo neobitaemogo apparata i nadvodnogo sudna pri provedenii sovmestnykh missii [Analysis of approaches to functioning of an autonomous unmanned vehicle and a surface ship in joint missions]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 49–62. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62.