

АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НАДВОДНОГО И ПОДВОДНОГО АППАРАТОВ

На рисунке 1 приведен алгоритм предварительной оценки взаимного положения надводного судна (НС) и автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) для их дальнейшего позиционирования.

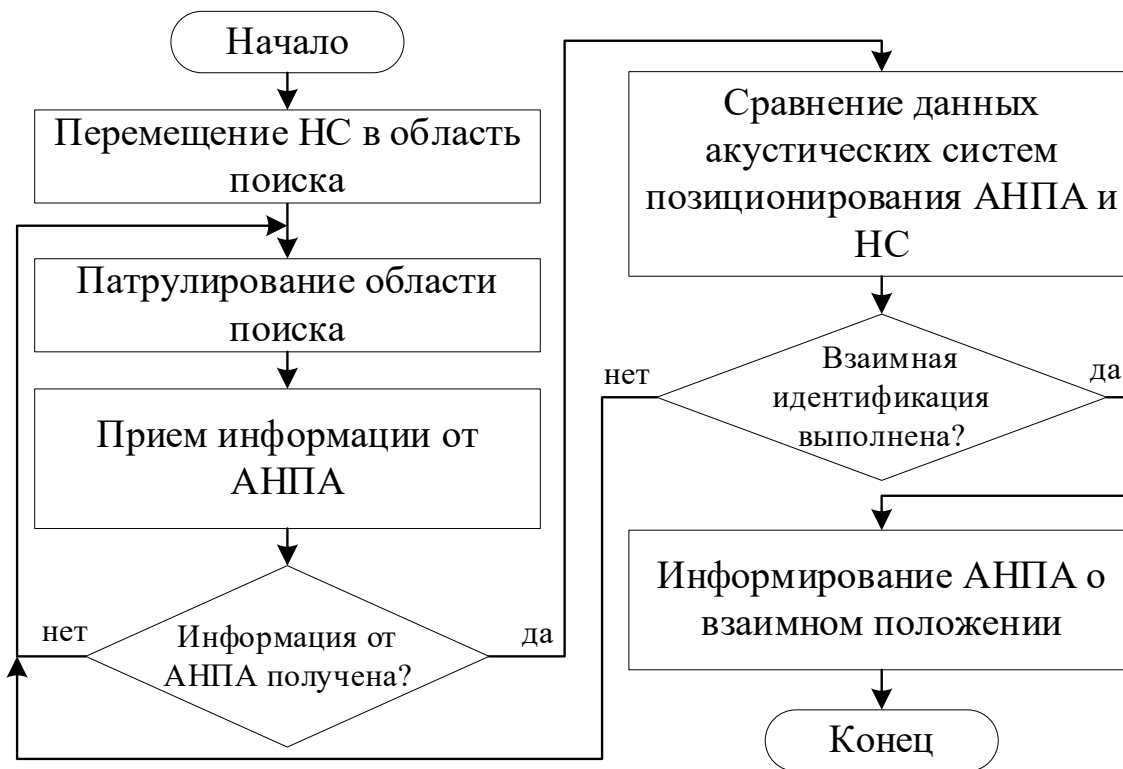


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма предварительной оценки взаимного положения НС и АНПА

На первом этапе алгоритма НС перемещается в область поиска АНПА, ориентируясь по показаниям глобальной системы навигации. После прибытия в область поиска НС осуществляет патрулирование с целью поиска АНПА, что соответствует второму этапу приведенного алгоритма. Принято, что НС и АНПА оснащены системами обмена данными друг с другом, функционирующими, например, на основе низкочастотной радиосвязи. В процессе патрулирования система обмена данными НС находится в режиме приема. Если принятые данные содержат информацию от целевого АНПА, то следующим этапом происходит сравнение данных акустических систем позиционирования АНПА и НС. Если результат сравнения показывает, что

АНПА и НС с учетом заданной допустимой погрешности идентифицировали друг друга, то НС информирует АНПА об их взаимном расположении в локальной системе координат, началом отсчета которой является НС. При несоблюдении условия взаимной идентификации НС продолжает патрулирование и попытки приема данных от АНПА.

После выполнения алгоритма предварительной оценки взаимного положения АНПА и НС дальнейшее функционирование определяется этапами алгоритма перемещения АНПА, блок-схема которого представлена на рисунке 2.

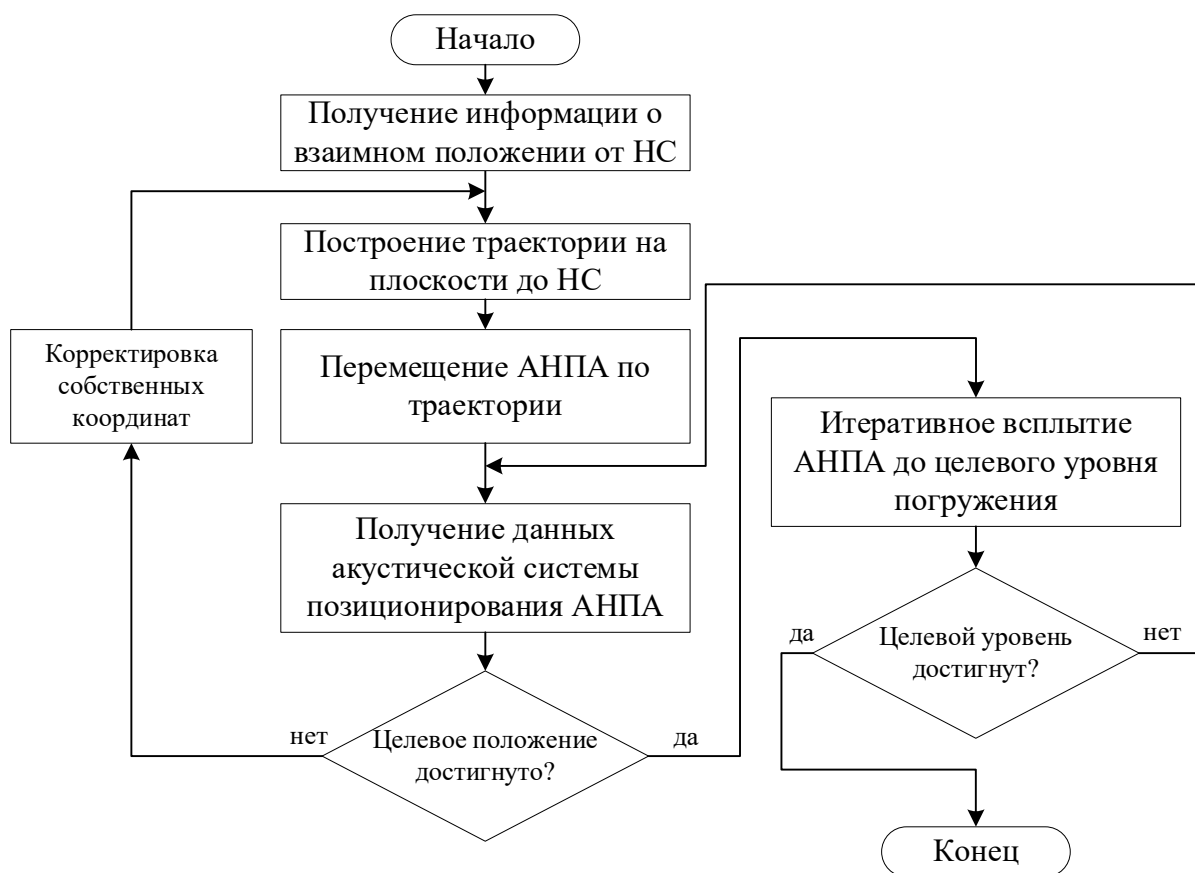


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма перемещения АНПА к НС

Примем, что на начальном этапе алгоритма, предложенного на рисунке 2, АНПА погружен ниже осадки НС. Первым этапом алгоритма перемещения является получение информации от НС о взаимном положении, которая позволяет АНПА локализоваться в системе отсчета, началом которой является целевая точка на НС связанная с размещением передающей части беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ). Как только информация от

НС получена возможен запуск планировщика траектории, например на основе алгоритма A* [Zhang Z. et al. Optimal path planning with modified A-Star algorithm for stealth unmanned aerial vehicles in 3D network radar environment //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2022. – Т. 236. – №. 1. – С. 72-81.]. После построения траектории АНПА начинает перемещение к НС в плоскости, а далее проверяются данные с акустической системы позиционирования. Если целевое положение в плоскости перемещения не достигнуто, то осуществляется корректировка собственных координат в локальной системе отсчета и процесс построения траектории и перемещения по ней начинается заново. В случае достижения целевого положения с заданной точностью АНПА переходит к итеративному всплытию до целевого уровня погружения. Целевым уровнем погружения является уровень расположения БСПЭ на НС. Итеративное всплытие подразумевает перемещение в вертикальном направлении на заданное расстояние, что необходимо для реализации динамической корректировки положения АНПА. Расстояние единичного перемещения по вертикальной оси задается исходя из размеров АНПА и требований к точности. После проведения одной итерации всплытия, проверяется достижение целевого уровня. В случае если уровень не достигнут АНПА снова, используя данные акустической системы позиционирования, проверяет целевое положение и корректирует свою позицию при необходимости. Если корректировка не требуется, то сразу проводится следующая итерация всплытия. По достижении целевого уровня погружения с заданной точностью алгоритм перемещения АНПА к НС завершает свою работу.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

ПОДВОДНОГО АППАРАТА И БСПЭ

Задача данной части исследования формулируется следующим образом. Даны АНПА и подводная зарядная станция. АНПА оборудован приемной

частью БСПЭ, а зарядная станция – передающей. На АНПА установлена камера системы технического зрения и вычислительный комплекс, применяемые для распознавания ArUco-маркера, расположенного на зарядной станции. При выполнении рабочих задач расходуется заряд аккумуляторной батареи АНПА, после достижения некоторого минимального значения аппарат следует к зарядной станции. Для передачи энергии между АНПА и зарядной станцией необходимо позиционировать АНПА с достаточной для передачи энергии точностью. В данной работе не рассматривается какая-либо фиксация АНПА относительно зарядной станции, так как это значительно усложняет конструктивные решения зарядной станции. Согласно ранее проводимым исследованиям, эффективность работы и передаваемая мощность БСПЭ в значительной мере зависят от расстояний и смещений между передающей и приемной частью. Ввиду постоянного движения водных масс положение аппарата относительно БСПЭ требуется корректировать, чтобы процесс заряда протекал с меньшими потерями энергии. Для решения поставленной задачи необходимо задаться геометрической моделью, определить рабочие параметры БСПЭ, которые позволят оценить эффективность передачи энергии, и разработать алгоритм динамического позиционирования.

Проведенный анализ ряда работ в направлении беспроводного заряда аккумуляторной батареи АНПА позволяет выделить следующие места установки приемной части системы или приемной катушки БСПЭ. Горизонтальное расположение приемной части системы в основании АНПА (см. рис. 3, *a*) рассмотрено авторами работы [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]. Аналогичный способ размещения использовался в [Ogihara M., Ebihara T., Mizutani K., Wakatsuki N. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles. In *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*. 2015. P. 1-5. doi:10.23919/OCEANS.2015.7404400], где был предложен

беспроводной способ передачи энергии и данных между зарядной станцией и АНПА.

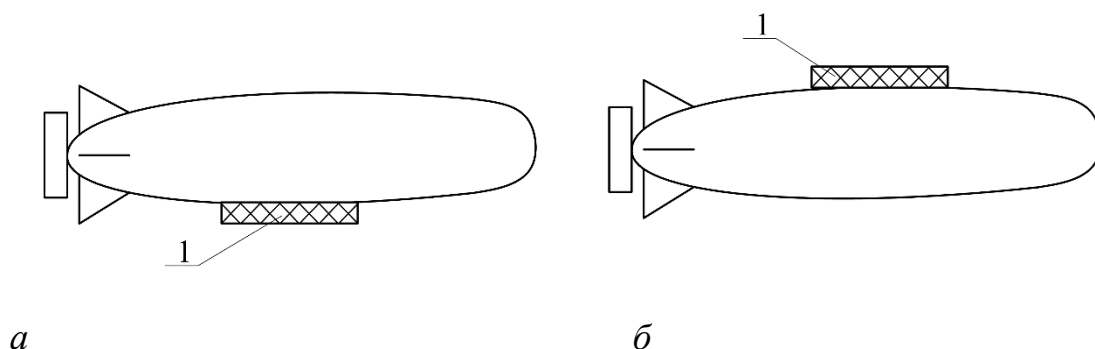


Рисунок 3 – Горизонтальная установка приемной части БСПЭ (1) на АНПА: а – снизу в основании; б – сверху

Также возможно горизонтальное размещение приемной части БСПЭ сверху АНПА (см. рис. 3, б). Данный способ установки рассмотрен авторами работы [Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., et al. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean. In 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). 2016. P. 177-180. doi:10.1109/auv.2016.7778668], где для малого АНПА была разработана приемная часть с размерами 240×240×15 мм, которая позволила передавать энергию и данные на АНПА, при этом передаваемая мощность составила 24 Вт.

Для АНПА с корпусом цилиндрической формы возможна установка катушки соленоидного типа снаружи на корпусе аппарата (рис. 4). Данный способ установки катушки приемной части использован в аппарате, который представлен в работе [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]. Рассмотренный в работе АНПА имеет торпедную форму, конструкция зарядной станции представляет собой конусообразную направляющую, к которой присоединен полый цилиндр, на поверхности которого размещена катушка передающей части БСПЭ.

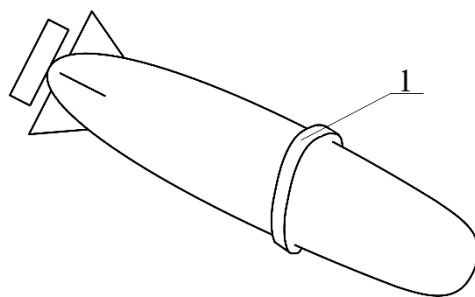


Рисунок 4 – Установка катушки приемной части БСПЭ соленоидного типа (1) снаружи на корпусе АНПА

Данный способ установки БСПЭ на АНПА и зарядной станции актуален для аппаратов торпедной формы. Однако 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 приемной части БСПЭ на АНПА менее универсальным и конструктивно более сложным, чем способы горизонтального расположения системы в основании АНПА.

Анализ научных работ в направлении позиционирования АНПА с применением систем технического зрения показал, что чаще всего камеры устанавливают следующим образом. Возможна установка камеры в передней части АНПА или в носовой части аппаратов с корпусом аппарата торпедной формы (см. рис. 5, *а*). Данный способ использовался авторами работ [Yang S., Peng S., Fan S., Zhang S., Wang P., Chen Y. Study on docking guidance algorithm for hybrid underwater glider in currents. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 125. P. 170-181. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.08.002, Chavez A.G., Mueller C.A., Doernbach T., Birk A. Underwater navigation using visual markers in the context of intervention missions. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. Vol. 16(2). P. 1729881419838967. doi:10.1177/1729881419838967]. Также возможна установка камер в нижней части АНПА с направлением оптической оси камеры вниз (см. рис. 5, *б*). Данный способ рассмотрен в работах [Xu Z., Haroutunian M., Murphy A.J., Neasham J., Norman R. An Underwater Visual

Navigation Method Based on Multiple ArUco Markers. Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9(12). P. 1432. doi:10.3390/jmse9121432, 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]. Аналогичный способ установки камеры использован в АНПА Sparus II, предназначенного для инспекции морского дна. Кроме того, существуют АНПА, в котором совмещены оба ранее рассмотренных способа установки камеры. Так, в АНПА торпедной формы Urashima [Tsukioka S., Aoki T., Yamamoto I., et al. Results of a long distance experiment with the AUV "Urashima". In Oceans' 04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04. 2004. Vol. 3. P. 1714-1719. doi:10.1109/OCEANS.2004.1406383] используются две камеры: одна на носовой части, другая – в нижней. Камеры, как отмечают авторы, использовались для научных исследований.

Учитывая конструктивные особенности АНПА, принципы работы технического зрения и БСПЭ, разработаны следующие геометрические модели, описывающие совместную установку данных систем (см. рис. 3).

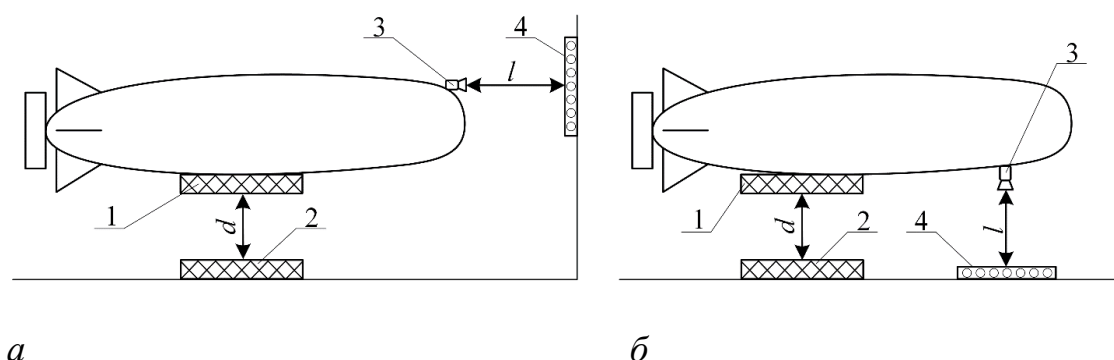


Рисунок 5 – Геометрические модели АНПА и зарядной станции: а – размещение камеры технического зрения в носовой части АНПА; б – размещение камеры технического зрения в нижней части АНПА; 1 – приемная часть БСПЭ, 2 – передающая часть БСПЭ, 3 – камера технического зрения, 4 – ArUco-маркер

Представленные на рис. 5 модели предполагают различный подход к перемещению АНПА до зарядной станции. В модели *a* аппарат перемещается

к зарядной станции до и после распознавания маркера в горизонтальном направлении, а в модели *б* – в вертикальном. Геометрическая модель *а* позволяет варьировать расстояние между камерой системы технического зрения и маркером в широком диапазоне, что позволяет использовать камеру практически с любым углом обзора и фокусным расстоянием. Благодаря этому данный вариант размещения систем также обеспечивает использование маркера большого размера, что улучшает его распознавание на значительном расстоянии. В модели *б* существенным недостатком является зависимость расстояния между камерой и маркером от расстояния между приемной и передающей частями БСПЭ, что накладывает ограничения на размеры маркера и параметры камеры. Для распознавания маркера и последующего расчета относительного расположения и ориентации необходимо, чтобы маркер полностью помещался на изображении. При этом, чем меньше расстояние между приемной и передающей частью БСПЭ, тем выше эффективность передачи энергии. Соответственно, геометрическая модель *б* требует либо поиска компромисса между расстоянием от АНПА до зарядной станции, при котором маркер будет распознан и передача энергии будет происходить с приемлемой эффективностью, либо применения особых конструктивных решений зарядной станции. Исходя из перечисленных достоинств и недостатков предложенных моделей совместного размещения БСПЭ и технического зрения на АНПА и зарядной станции, технически более удачной является модель, представленная на рис. 5, *а*.

В качестве параметра БСПЭ для оценки качества позиционирования возможно использовать величину выходного напряжения приемной части системы после выпрямителя, которая имеет прямую зависимость от ЭДС, индуцированной в приемной катушке БСПЭ, а также проста для измерений системой управления АНПА. ЭДС, индуцируемая в приемной катушке, в значительной степени зависит от расстояния и смещений между передающей и приемной частями системы [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement

of Coils. In Electromechanics and Robotics. Springer, Singapore. 2022. P. 359-369. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_31], а также от тока нагрузки. На рис. 6 показаны зависимости выходного напряжения приемной части прототипа БСПЭ, представленного в [Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems. Robotics and Technical Cybernetics. 2021. Vol. 9(3). P. 196-206. (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.9305], от расстояния между частями системы при различных значениях тока нагрузки. Для удобства значения напряжения выражены в относительных единицах от максимального выходного напряжения БСПЭ.

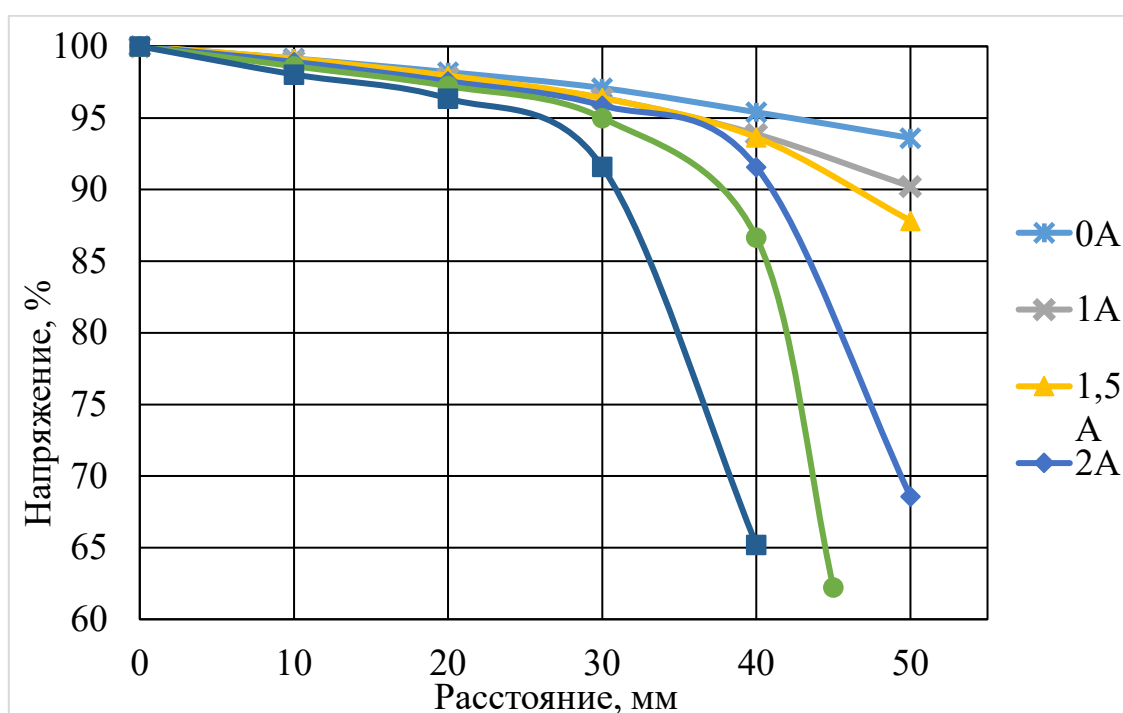


Рисунок 6 – Зависимости выходного напряжения БСПЭ от расстояния передачи энергии и тока нагрузки

Из графиков на рис. 6 следует, что при отсутствии нагрузки напряжение приемной части системы изменяется незначительно, менее чем на 7% при изменении расстояния на 50 мм. Аналогичен вид кривых при токе нагрузки до 1,5 А. При токе нагрузки 2 А и более зависимость выходного напряжения приемной части системы имеет более выраженный характер. Изменение расстояния от 40 до 50 мм при токе нагрузки 2 А приводит к изменению

выходного напряжения более чем на 20%. Аналогична форма кривых для токов нагрузки 2,5 и 3 А, при этом при дистанции передачи энергии более 30 мм выходное напряжение значительно снижается.

Результаты анализа кривых, представленных на рис. 6, показывают, что оценка качества позиционирования с использованием только значения выходного напряжения приемной части БСПЭ невозможна. При различном токе нагрузки и одинаковой дистанции передачи энергии значение выходного напряжения будет отличаться, что не позволяет выбрать одно пороговое значение для работы алгоритма, при котором система может приостановить процесс позиционирования. Необходимо отметить, что при заряде аккумуляторных батарей мощность, потребляемая контроллером заряда, будет меняться, значит, будет меняться и ток, отдаваемый приемной частью системы. Из этого следует, что для оценки качества позиционирования, исходя из рабочих параметров БСПЭ, необходимо использовать одновременно значение выходного напряжения и тока приемной части.

Характеристики прототипа БСПЭ, представленного в работе [Krestovnikov K., Vykov A., Erashov A. Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems. Robotics and Technical Cybernetics. 2021. Vol. 9(3). P. 196-206. (In Russian). doi:10.31776/RTCJ.9305], позволяют вывести неравенство для расчета пороговых значений выходного напряжения на основе значений тока нагрузки. Наиболее широкий диапазон токов и напряжений получен при передаче энергии на расстояние 15 мм, что продемонстрировано в таблице 1. Значения напряжения (U), тока (I) и мощности (P) с индексом «1» относятся к передающей части системы, а с индексом «2» – к приемной.

Таблица 1. Рабочие параметры прототипа БСПЭ

U_1 , В	I_1 , А	U_2 , В	I_2 , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	Эффективность, %
19,67	1,40	19,55	0,00	26,78	0,00	0,00
19,49	2,81	19,00	1,50	54,01	28,50	52,77

19,30	4,19	18,39	3,00	80,11	55,17	68,87
19,11	5,60	17,65	4,50	106,26	79,43	74,75
18,95	6,90	16,90	6,00	130,00	101,40	78,00
18,78	8,13	16,10	7,50	151,92	120,75	79,48
18,67	8,80	15,47	8,50	163,54	131,50	80,41
18,60	9,06	14,94	9,00	167,76	134,46	80,15

Для упрощения последующей адаптации и применения полученных результатов, приведенные в таблице значения тока и напряжения переведены в относительные единицы. Используя пакет программ для решения задач вычислений, преобразованные данные были аппроксимированы полиномом второго порядка. График полученной функции представлен на рис. 7.

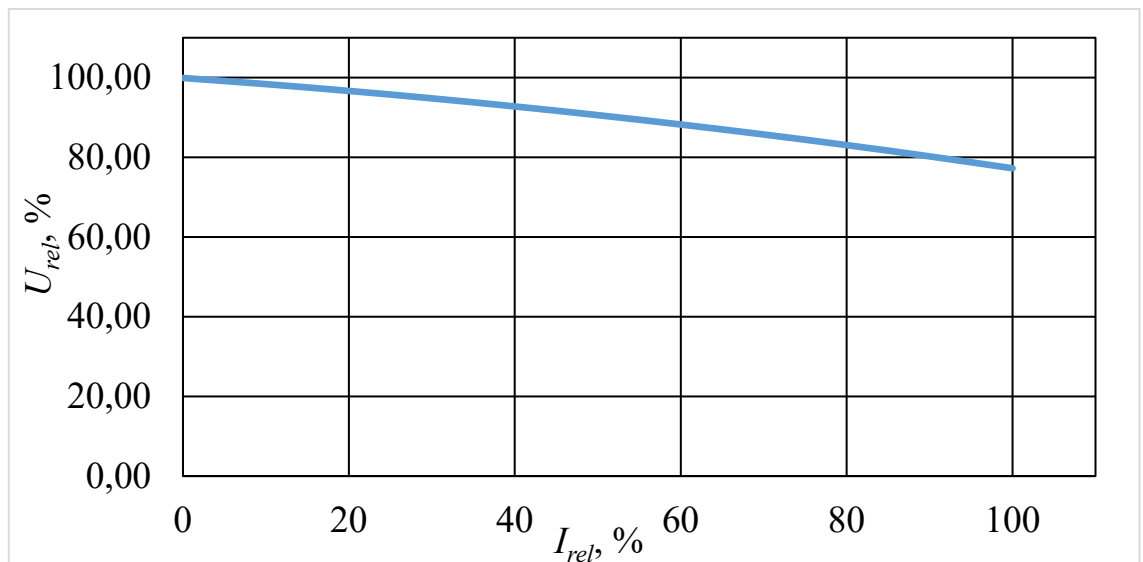


Рисунок 7 – Зависимости выходного напряжения БСПЭ от тока нагрузки в относительных единицах

Кривая на рис. 7 разделяет область рабочих параметров БСПЭ на две части. Если значение напряжения находится ниже кривой при заданном значении тока, то для повышения эффективности передачи энергии необходимо улучшать качество позиционирования АНПА. Следовательно, для оценки качества позиционирования АНПА относительно БСПЭ на основе рабочих параметров возможно использовать неравенство (1):

$$U_{rel} \geq -0,0008 \cdot I_{rel}^2 - 0,1466 \cdot I_{rel} + 99,905, \quad (1)$$

где $I_{rel} = I_{out} / I_{max} \cdot 100\%$, $U_{rel} = U_{out} / U_{max} \cdot 100\%$, I_{out} – значение тока нагрузки, U_{out} – значение выходного напряжения, I_{max} – максимальное значение тока нагрузки для используемой БСПЭ, U_{max} – максимальное значение выходного напряжения для используемой БСПЭ.

Если неравенство (1) соблюдается, то позиционирование приемной части системы относительно передающей выполнено достаточно точно, и передача энергии идет с высокой эффективностью. Неравенство (1) выведено на основе экспериментальных данных, полученных при тестировании прототипа БСПЭ, построенного на основе структурных и схемотехнических решений, изложенных в [Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems. Robotics and Technical Cybernetics. 2021. Vol. 9(3). P. 196-206. (In Russian). doi:10.31776/RTSJ.9305]. Ранее проведенные исследования показали, что ЭДС, индуцированная в приемной катушке БСПЭ, зависит также от вида и размеров приемной и передающей катушек. Таким образом для систем БСПЭ, имеющих иные конструктивные, структурные и схемотехнические решения, данное неравенство потребует корректировки коэффициентов или вывода аналогичным образом, исходя из рабочих характеристик системы.

С учетом предложенных решений по контролируемым рабочим параметрам БСПЭ был разработан алгоритм позиционирования АНПА, представленный на рис. 8.



Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма динамического позиционирования АНПА

На первом этапе алгоритма активируется режим перемещения АНПА в направлении зарядной станции. Данный процесс зависит от применяемых алгоритмов построения траектории и методов глобального перемещения АНПА.

На последующих этапах обрабатываются изображения, получаемые с камеры. Сперва захватывается изображение с камеры, затем полученные данные передаются блоку распознавания маркера на изображении. Задача распознавания ArUco-маркера решается посредством библиотеки OpenCV, которая позволяет распознавать данные маркеры на изображении и вычислять их пространственные характеристики посредством методов, представленных

в [Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47(6). P. 2280-2292. doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005]. Если маркер, расположенный на зарядной станции, не распознан, то АНПА продолжит движение к зарядной станции, то есть произойдет возврат к первому этапу алгоритма. Если маркер распознан, то на следующих этапах алгоритма вычисляются пространственные характеристики ArUco-маркера и с помощью рассчитанных значений производится корректирование положения и ориентации АНПА относительно маркера. При этом АНПА продолжит перемещение к зарядной станции до тех пор, пока не будет определена передающая часть БСПЭ. Детектирование передающей части системы основано на измерении выходного напряжения приемной части, установленной в АНПА. Если измеренное значение напряжения ниже заданной пороговой величины, то считается, что передающая часть БСПЭ не определена, и повторяются все этапы алгоритма, начиная с блока захвата изображения с камеры. В предложенном алгоритме принято, что процесс заряда аккумуляторной батареи начинается после определения передающей части БСПЭ. После начала процесса заряда производится измерение рабочих параметров БСПЭ. С учетом измеренных параметров проверяется соблюдение условия (1). Если данное условие не соблюдается, то процесс позиционирования продолжается и снова выполняются блоки алгоритма, начиная с блока захвата изображения. Если условие (1) соблюдается, то позиционирование останавливается и продолжается заряд аккумулятора. В случае выхода рабочих параметров за допустимые пределы и соответственно несоблюдения условия (1) происходит повторное выполнению блоков, отвечающих за позиционирование АНПА с помощью системы технического зрения. Когда уровень заряда аккумулятора достигает заданного максимального значения, выполнение алгоритма завершается. Необходимо отметить, что заряд аккумулятора АНПА не прекращается во время позиционирования и происходит все время, пока

АНПА находится в рабочей зоне БСПЭ. Динамическое позиционирование АНПА позволяет повысить эффективность передачи энергии и компенсировать смещение аппарата относительно передающей части БСПЭ ввиду течения воды и иных факторов.

На рис. 9 приведено изображение сцены из среды моделирования, которая использовалась для имитации процесса позиционирования АНПА при заряде аккумуляторной батареи.

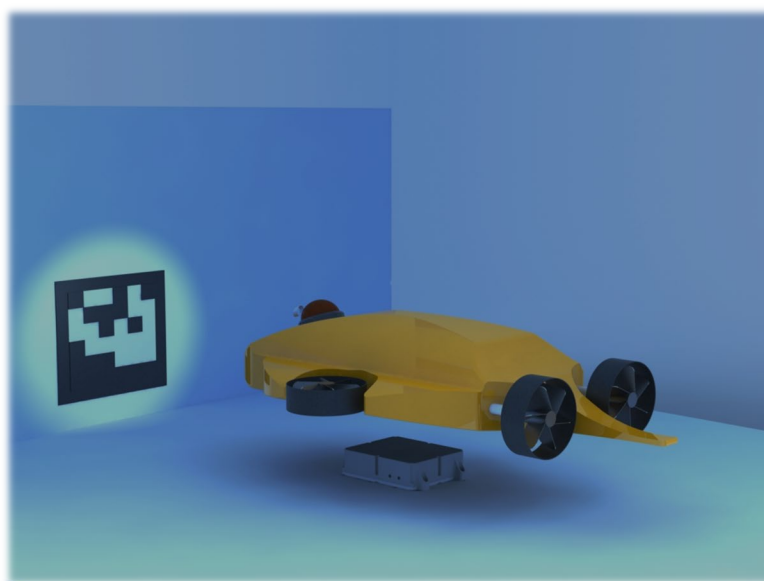


Рисунок 9 – Позиционирование АНПА по ArUco-маркеру в среде моделирования Gazebo

Аппарат в соответствии с [ГОСТ Р 56960-2016. Аппараты необитаемые подводные. Классификация] относится к малым по мощности системы электроснабжения и легким по массе, и имеет положительную плавучесть. Модель АНПА имеет четыре гребных винта, два из которых отвечают за погружение, а два других за маневрирование в горизонтальной плоскости. В передней части корпуса АНПА установлена камера для получения изображений, необходимых для поиска ArUco-маркера и позиционирования аппарата относительно него.

Процесс заряда начинается после прибытия АНПА к зарядной станции. В разработанной модели уровень остаточного заряда аккумуляторной батареи

у прибывшего аппарата составляет 20%, а его энергоёмкость равна 65 Вт·ч. Также принято, что в идеальных условиях, то есть в отсутствии течения, а, соответственно, и смещений АНПА относительно зарядной станции, заряд батареи с 0 до 100% происходит за 1 час. При этом характеристика заряда аккумуляторной батареи линейная при постоянной мощности заряда, а максимальная мощность, ограниченная контроллером заряда, составляет 65 Вт. Допускается, что в аккумуляторной батарее отсутствуют потери энергии.

Принято, что компенсация линейных отклонений АНПА относительно передающей части БСПЭ выполняется со статической ошибкой, прямо пропорциональной скорости течения. Также допускается, что статическая ошибка составляет 0,03 м при скорости течения 0,3 м/с. Данное значение скорости подводного течения принято за максимальное. Кроме того, принято, что при скорости течения 0,3 м/с приводы гребных винтов АНПА для компенсации смещения суммарно потребляют мощность 200 Вт, при этом данное значение является максимально возможным. Диаметр катушек БСПЭ равен 160 мм, максимальная передаваемая мощность задана значением 130 Вт. Максимальная эффективность работы БСПЭ принята 80,41% в соответствии с [Krestovnikov K., Bykov A., Erashov A. Structure and circuit solution of a wireless power transfer system for application in mobile robotic systems. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2021. Vol. 9(3). P. 196-206. (In Russian). doi:10.31776/RTSJ.9305.].

Возможно два варианта течения процесса заряда батареи, которые зависят от мощности, потребляемой электроприводами АНПА для компенсации отклонений по положению, а также от передаваемой мощности БСПЭ. Первый вариант – передаваемая мощность меньше или равна потребляемой приводами. В этом случае батарея аппарата не заряжается, ее заряд по необходимости расходуется для питания приводов. Вторым вариантом является ситуация, когда передаваемая мощность БСПЭ выше мощности, расходуемой приводами гребных винтов. В этом случае часть передаваемой

мощности расходуется на электроприводы, оставшаяся часть запасается в аккумуляторе. При этом, как отмечено выше, мощность, расходуемая на заряд батареи, не превышает 65 Вт. Соответственно, если потенциальная передаваемая мощность БСПЭ для данного взаимного положения больше, чем суммарная мощность, расходуемая на компенсацию смещений и заряд батареи, то эффективность системы рассчитывается именно для мощности, потребляемой аппаратом. Таким образом модель учитывает эффективность системы в соответствии с системами уравнений, предложенными в [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils. In Electromechanics and Robotics. Springer, Singapore. 2022. P. 359-369. doi:10.1007/978-981-16-2814-6_31].

В среде моделирования была проведена серия экспериментов, направленная на имитацию процесса заряда аккумуляторной батареи АНПА с использованием разработанного подхода. Как следует из раздела с постановкой задачи, динамика рассматриваемого подводного аппарата и система управления позиционированием не входят в рамки проводимого исследования. Вопросы динамики и управления АНПА рассматриваются в работах [Туркин И.И., Крятов А.Ю., Хеин М. (2016). Система автоматического оптимального управления пространственным движением автономного необитаемого аппарата типа глайдер. Морские интеллектуальные технологии, (2-1), 52-58], [Сакович С. Ю., Сиек Ю.Л. (2018). Позиционное управление движением необитаемого подводного аппарата по видеоинформации при осмотре подводного трубопровода. Морские интеллектуальные технологии, (2-1), 127-133] и ряде других исследований, результаты которых возможно использовать совместно с предлагаемым подходом. Эксперименты проводились при наличии подводного течения, направление и скорость которого относительно аппарата менялось случайным образом. Направление течения относительно горизонтальной оси также изменялось случайным образом в диапазоне углов от 0° до 30° . Изменение уровня заряда аккумулятора

с течением времени определялось на основании расчетных значений эффективности передачи энергии, а также суммарной мощности потребления электроприводов, которая зависит от скорости течения. На рис. 10 приведены кривые процессов заряда при различных значениях, ограничивающих случайную величину скорости течения. На графике также отображена линия, которая показывает процесс заряда при идеальных условиях, а именно при постоянной мощности заряда 65 Вт.

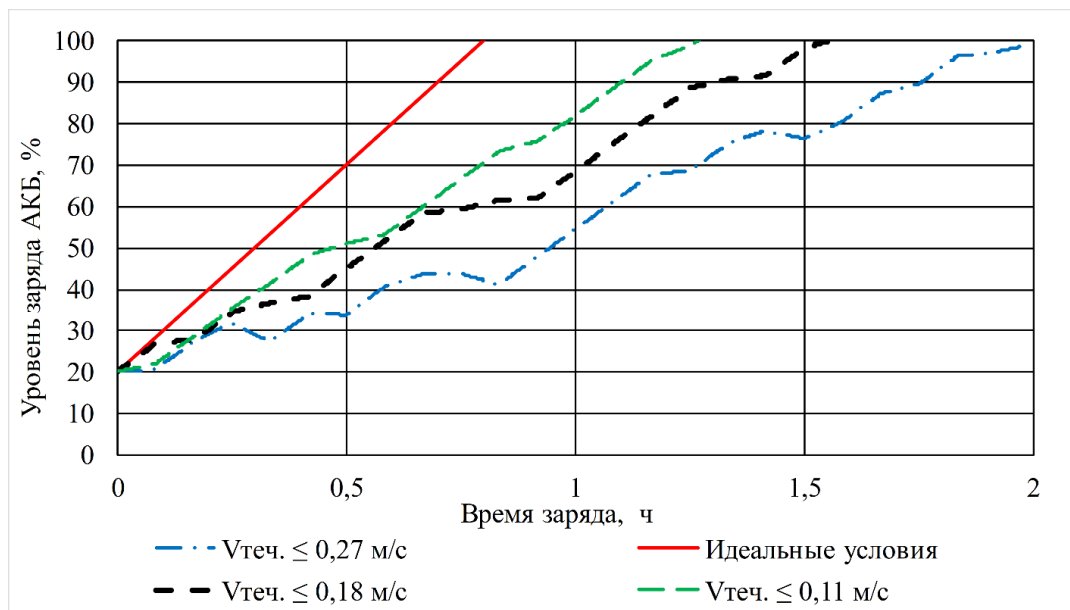


Рисунок 10 – Графики заряда аккумуляторной батареи при различных скоростях течения

Из рис. 10 следует, что чем больше максимальная скорость течения, тем больше времени требуется на заряд аккумулятора при параметрах БСПЭ, заложенных в модель. Для удобства сравнения результатов экспериментов вычислены средние значения скорости течения, эффективности и скорости заряда. Данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Средние значения параметров в экспериментах

Скорость течения, м/с	Средняя скорость течения, м/с	Средняя эффективность, %	Средняя скорость заряда, %/ч	Время заряда, ч
0	0	80,41	100	0,8
$\leq 0,11$	0,049	67,70	62,17	1,28
$\leq 0,18$	0,064	67,10	51,94	1,54
$\leq 0,27$	0,09	65,94	39,9	2

Из таблицы выше следует, что наличие подводного течения снижает эффективность передачи энергии на 12-15%. При этом средняя эффективность для различной скорости течения меняется незначительно на 0,6-1,76%. Время заряда имеет значительную зависимость от скорости течения из-за расхода энергии приводами гребных винтов при компенсации смещений АНПА относительно передающей части БСПЭ.

Результаты анализа существующих алгоритмов позиционирования АНПА показали актуальность разработки алгоритма, комплексизирующего рабочие параметры БСПЭ и данные с системы технического зрения для реализации динамического позиционирования АНПА в процессе беспроводного заряда аккумуляторной батареи. В процессе исследования проведен анализ и представлены геометрические модели размещения БСПЭ и камеры системы технического зрения на АНПА и зарядной станции. Разработан алгоритм, обеспечивающий позиционирование с точностью, соответствующей попаданию выходного напряжения приемной части БСПЭ в заданный диапазон. Функционирование представленного алгоритма динамического позиционирования АНПА в окрестностях передающей части БСПЭ основано на распознавании и вычислении пространственных характеристик ArUco-маркера. Предложенное решение позволяет осуществлять позиционирование исходя из параметра, который является важным именно для передачи энергии и связан с эффективностью данного процесса. Для апробации предложенного подхода разработана модель и проведен ряд экспериментов. На основе результатов экспериментов рассчитаны средние значения скорости заряда батареи и эффективности передачи энергии в зависимости от средней скорости течения. При течении, направление которого меняется случайным образом, а скорость не превышает 0,27 м/с, эффективность передачи энергии падает менее чем на 15%. При заложенных в модель параметрах БСПЭ и АНПА время заряда аккумуляторной батареи увеличивается в 2,5 раза при средней скорости течения 0,09 м/с по сравнению со временем заряда при отсутствии течения.