

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ В ВОДНЫХ СРЕДАХ, ВКЛЮЧАЮЩИЙ АЛГОРИТМЫ, МЕТОД И МОДЕЛЬ ПРИМЕНЯЕМЫЙ ДЛЯ НАДВОДНЫХ И ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ.

Разработка комплексного подхода к беспроводной передаче энергии в водных средах требует создания методики расчета эффективности, которая позволит реализовать алгоритмы функционирования модулей беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) в составе распределенной системы управления автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА). Если расчетное значение эффективности системы выше реально измеренной, то можно косвенно сделать вывод либо об ошибках в позиционировании АНПА, либо о наличии посторонних предметов между приемной и передающей катушками. В ранее представленном авторами исследовании [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] получены системы уравнений, связывающие эффективность работы БСПЭ с передаваемой мощностью и расстоянием (1) или осевым смещением (2) между приемной и передающей спиралевидными катушками. Выведенные системы уравнений позволяют вычислять эффективность передачи энергии для БСПЭ, основанных на индуктивно связанных параллельных резонансных контурах с плоскими спиралевидными катушками.

$$\begin{cases} z = 0.1498 + 0.04462x + 3.14y - 2.147x^2 + 0.3625xy - 3.566y^2 + \\ \quad + 3.982x^3 - 0.02121x^2y - 0.5439xy^2 + 1.15y^3 \\ y \leq 0.3906x^2 - 1.738x + 1.016 \end{cases}, \quad (1)$$

где $x = L_{rel}$ – расстояние между катушками БСПЭ в относительных единицах, $y = P_{rel}$ – мощность нагрузки в относительных единицах, $z = \eta_{rel}$ – эффективность передачи энергии в относительных единицах, $x, y, z \in [0; 1]$.

$$\begin{cases} z = 0.2402 - 0.1936x + 2.322y - 0.4821x^2 + 0.1042xy - 1.774y^2 \\ y \leq -1.342x^2 - 0.7919x + 1.03 \end{cases}, \quad (2)$$

где $x = H_{rel}$ – смещение между катушками БСПЭ в относительных единицах, $y = P_{rel}$, $z = \eta_{rel}$, $x, y, z \in [0:1]$.

Представленные системы уравнений не учитывают потери при передаче энергии в воде и растворах. В работе [Krestovnikov K., Erashov A. Research of Performance Characteristics of WPT System Associated with Mutual Arrangement of Coils //Electromechanics and Robotics. – Springer, Singapore, 2022. – С. 359-369. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2814-6_31] представлены результаты исследования эффективности передачи энергии при эксплуатации БСПЭ в воде и растворах. Морская вода является диамагнитной средой. В воде происходит экранирование внешнего магнитного поля встречным внутренним магнитным полем, которое, в свою очередь, возникает за счет индуцированных незатухающих электрических макроскопических вихревых токов. Разница в магнитной проницаемости между водой и воздухом менее 0,001%, следовательно, разница в передаваемой мощности и эффективности при работе в разных средах также будет незначительная. Причиной снижения эффективности также являются диэлектрические потери. В соответствии с [Goronovskij I.T., Nazarenko Ju.P., Nekrjach E.F. A quick reference to chemistry. Naukova dumka, 1987, p.605 (In Russ).] диэлектрическая проницаемость воды ϵ для частот до 1 МГц принимается равной 80, а $tg\delta$ лежит в диапазоне от 0,065 до 0,17. В [Meinke H., Gundlach F.W. Taschenbuch der Hochfrequenztechnik. Springer-Verlag, 1986. pp. 52-53. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-96894-5>] приводится формула (3) для расчета мощности диэлектрических потерь при $tg\delta \leq 0,1$:

$$P_d = 2U^2\pi\omega_0 \left(\frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}\right) \cdot tg\delta, \quad (3)$$

где U – разность значений напряжения между катушками, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, S – площадь сечения среды между катушками БСПЭ, d – расстояние передачи энергии.

Как следует из формулы (3), мощность диэлектрических потерь пропорциональна частоте работы системы, таким образом, БСПЭ с высокой рабочей частотой будут иметь меньшее значение эффективности при работе в водной среде.

Переменными системы уравнений (1) и (2) являются параметры эффективности, мощности, расстояния и осевого смещения в относительных единицах. Соответственно учесть потери при передаче энергии в водной среде возможно при преобразовании перечисленных параметров в абсолютные значения (4-7):

$$P = P_{rel} \cdot P_{max} - P_d, \quad (4)$$

$$\eta = \eta_{rel} \cdot \eta_{max} - \frac{P_d}{P_{max}}, \quad (5)$$

$$L = L_{rel} \cdot D, \quad (6)$$

$$H = H_{rel} \cdot D, \quad (7)$$

где P – мощность нагрузки, P_{max} – максимальная мощность нагрузки БСПЭ, η – эффективность передачи энергии, η_{max} – максимальная эффективность БСПЭ, L – расстояние между катушками БСПЭ, H – смещение между катушками БСПЭ, D – диаметр контурной катушки.

В рамках данного исследования эксплуатация двунаправленной БСПЭ рассматривается в составе группы подводных и надводных аппаратов. Каждый аппарат имеет собственную систему управления (СУ) реализация, которой возможна по распределенным принципам [К.Д. Крестовников, А.А. Ерашов Разработка архитектуры и обобщенной структуры модулей распределенной системы управления робототехническими комплексами различного назначения // Робототехника и техническая кибернетика. – Т. 10. - № 3. – Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – 2022. – С. 201-212. DOI 10.31776/RTSJ.10305]. В указанной работе представлена архитектура распределенной централизованной системы управления и обобщенная структура модулей для ее реализации. Предлагаемая архитектура, обладающая

свойствами масштабируемости и адаптируемости, состоит из трех уровней и может применяться для автономных робототехнических комплексов различного назначения и беспилотных аппаратов. Таким образом контроль двунаправленной БСПЭ может осуществляться отдельным аппаратным модулем уровня устройств, структурная схема которого представлена на рисунке 1.

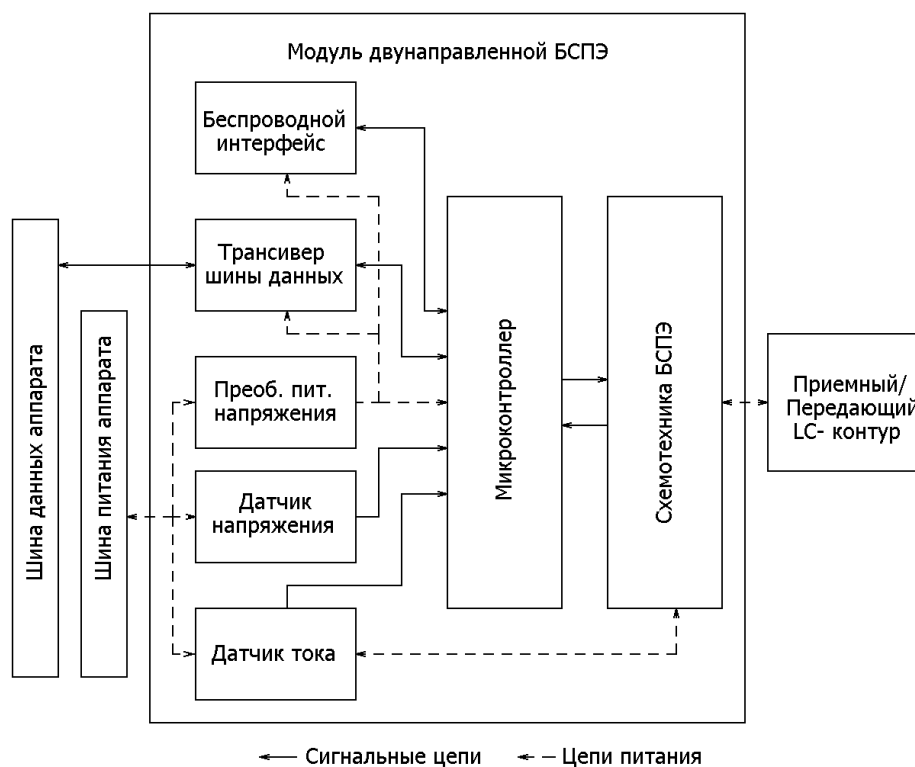


Рисунок 1 – Структурная схема модуля двунаправленной БСПЭ

Модуль двунаправленной БСПЭ имеет подключение к внутрисистемной шине данных аппарата и общей шине питания. Структурная схема модулей уровня устройств предполагает использование низкоуровневого вычислителя, в качестве которого применяется микроконтроллер. Обмен командами и сообщениями между модулем и высокоуровневым вычислителем системы управления аппарата осуществляется через внутрисистемную шину данных. Для этого модуль включает блок «трансивер шины данных» который обеспечивает аппаратную реализацию соответствующего интерфейса, а также выполняет функции согласования уровней сигналов и защиты. Блок «беспроводной интерфейс» необходим для реализации обмена рабочей информацией и параметрами между модулями двунаправленной БСПЭ,

установленными в разных аппаратах. Реализация передачи данных между частями двунаправленной БСПЭ принципиально возможна с использованием базовых схемотехнических решений, но осложнена ввиду низкой рабочей частоты и использования неуправляемого резонансного автогенератора. Данная задача актуальна при эксплуатации БСПЭ в составе АНПА, однако возможно использовать существующие решения низкочастотных беспроводных интерфейсов передачи данных. Микроконтроллер, трансивер шины данных и беспроводной интерфейс как правило имеют уровни питающего напряжения, значительно отличающиеся от уровня напряжения источника питания аппарата ввиду чего требуется использовать блок «Преобразователи питающего напряжения». Данный блок осуществляет формирование всех необходимых уровней напряжения внутри модуля. Датчики тока и напряжения необходимы для измерения рабочих параметров БСПЭ. При этом стоит отметить, что датчик тока должен иметь возможность измерения тока в любом направлении его протекания, так как рассматривается двунаправленная передача энергии.

Блок «схемотехника БСПЭ» представляет собой реализацию принципиальной электрической схемы, представленной в упрощенном виде на рисунке 2:

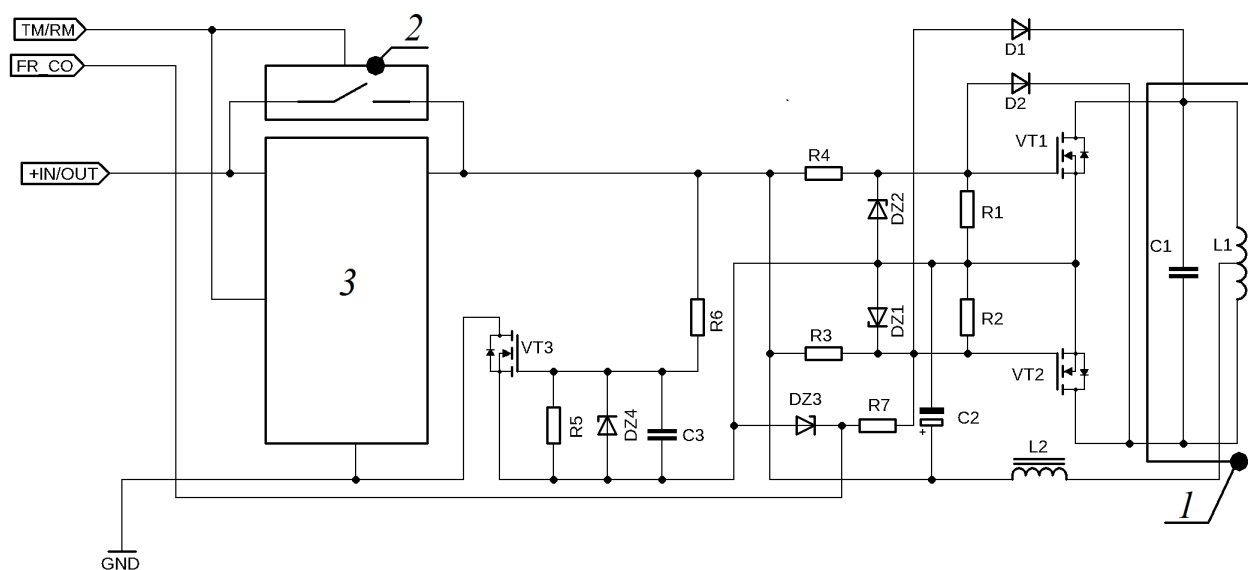


Рисунок 2 – Принципиальная схема двунаправленной БСПЭ

На рисунке 2 обозначены следующие блоки и цепи: 1 – приемный/передающий LC-контур, 2 – ключевой элемент, 3 – повышающий DC-DC преобразователь, ТМ/РМ – электрическая цепь управления режимом работы, FR_CO – электрическая цепь контроля рабочей частоты, +IN/OUT – электрическая цепь питания.

Приемный/передающий LC-контур в соответствии со структурной схемой вынесен за пределы модуля. Цепь питания подключается к датчику тока модуля БСПЭ, а цепи управления режимом работы и контроля рабочей частоты к микроконтроллеру. Микроконтроллер имеет возможность чтения сигнала с цепи контроля рабочей частоты и подачи сигнала в цепь выбора режима работы для управления ключевым элементом и повышающим DC-DC преобразователем. При работе резонансного автогенератора в цепи контроля рабочей частоты присутствуют импульсы прямоугольной формы, частота которых пропорциональна рабочей частоте. Цепь выбора режима работы осуществляет переключение системы между передачей и приемом энергии. В режиме передачи энергии ключевой элемент позволяет протекать току от источника питания ко входу резонансного автогенератора, при этом выключается DC-DC преобразователь. В режиме приема энергии DC-DC преобразователь включен, а ключевой элемент разомкнут. Ток, выпрямленный резонансным автогенератором, который работает в данном режиме как синхронный выпрямитель, поступает на вход повышающего DC-DC преобразователя.

Схемотехнические решения двунаправленной БСПЭ и принципы их работы подробно рассмотрены в предыдущих исследованиях [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics // Radioengineering , Vol. 30, No. 1, p. 142-149, 2021 <https://doi.org/10.13164/re.2021.0142>] и [Krestovnikov K. D., Cherskikh E. O. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots.

Для описанной выше структурной схемы и принципов работы общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ будет иметь вид, представленный на рисунке 3. Программное обеспечение микроконтроллера модуля двунаправленной БСПЭ функционирует в условно бесконечном цикле, пока присутствует питание микроконтроллера, что отражено в первом блоке алгоритма.

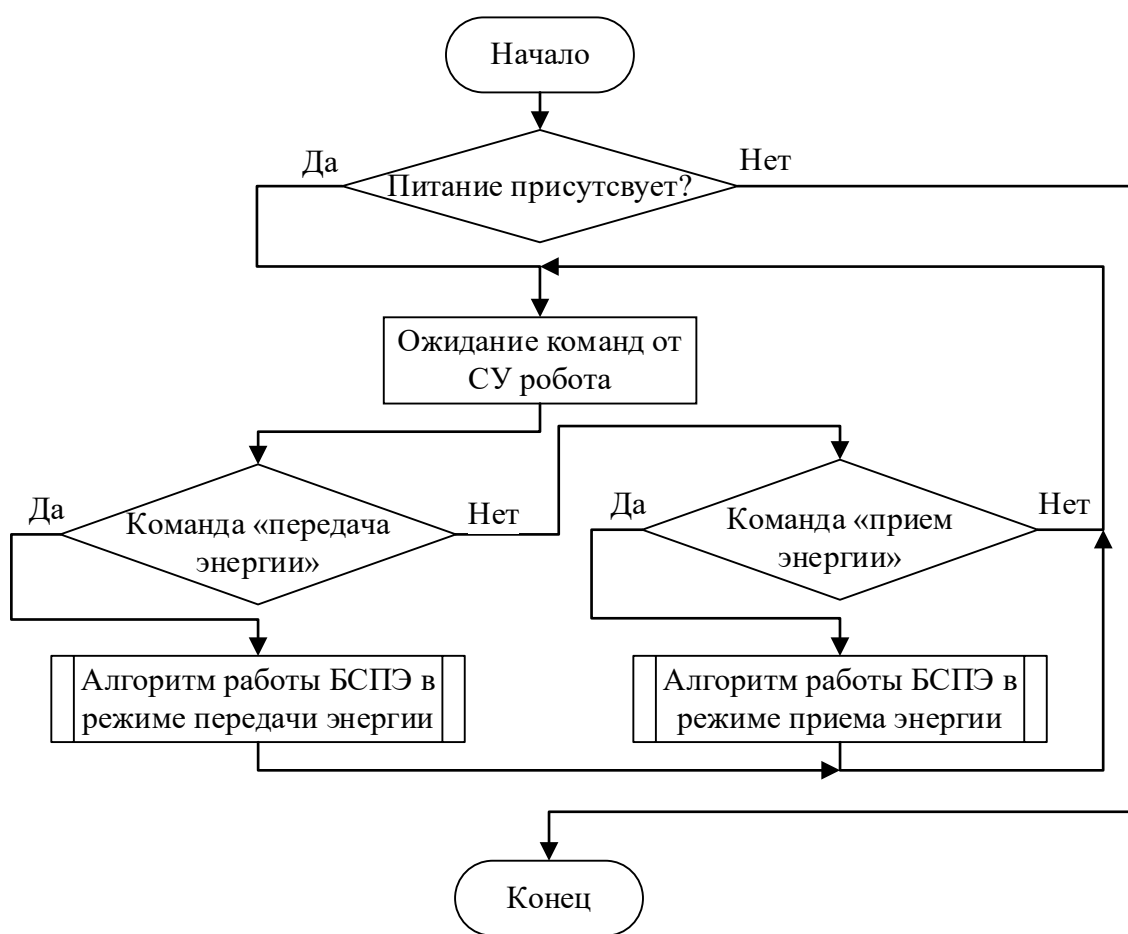


Рисунок 3 – Общий алгоритм функционирования модуля двунаправленной БСПЭ

При наличии питания модуль БСПЭ ожидает команды от СУ аппарата. В случае поступления команды «передача энергии», функционирование модуля продолжается по алгоритму в режиме передачи энергии, блок схема которого приведена на рисунке 4. В случае поступления команды «прием энергии»

модуль осуществляет функционирование по алгоритму, представленному на рисунке 5.

На первом шаге алгоритма функционирования БСПЭ в режиме передачи энергии осуществляется проверка сигнала контроля рабочей частоты. В соответствии с описанием схмотехнических решений сигнал в этой цепи позволяет определить текущий режим функционирования части системы, которая установлена в другом аппарате и должна принимать энергию. Если до начала передачи энергии в данной цепи присутствует сигнал с импульсами прямоугольной формы и в заданном диапазоне частот, то из этого следует что часть БСПЭ, установленная в другой аппарат, которая должна принимать энергию, в текущий момент осуществляет её передачу. В данном случае запуск невозможен, так как может вызвать повреждение силовых электронных компонентов БСПЭ. Если запуск невозможен, то СУ аппарата отправляется соответствующее сообщение, после чего вложенный алгоритм завершает свою работу, а в общем алгоритме происходит переход к ожиданию команд. Сообщения, отправляемые СУ аппарата от модуля двунаправленной БСПЭ, соответствующие им параметры и условия представлены в таблице 1.

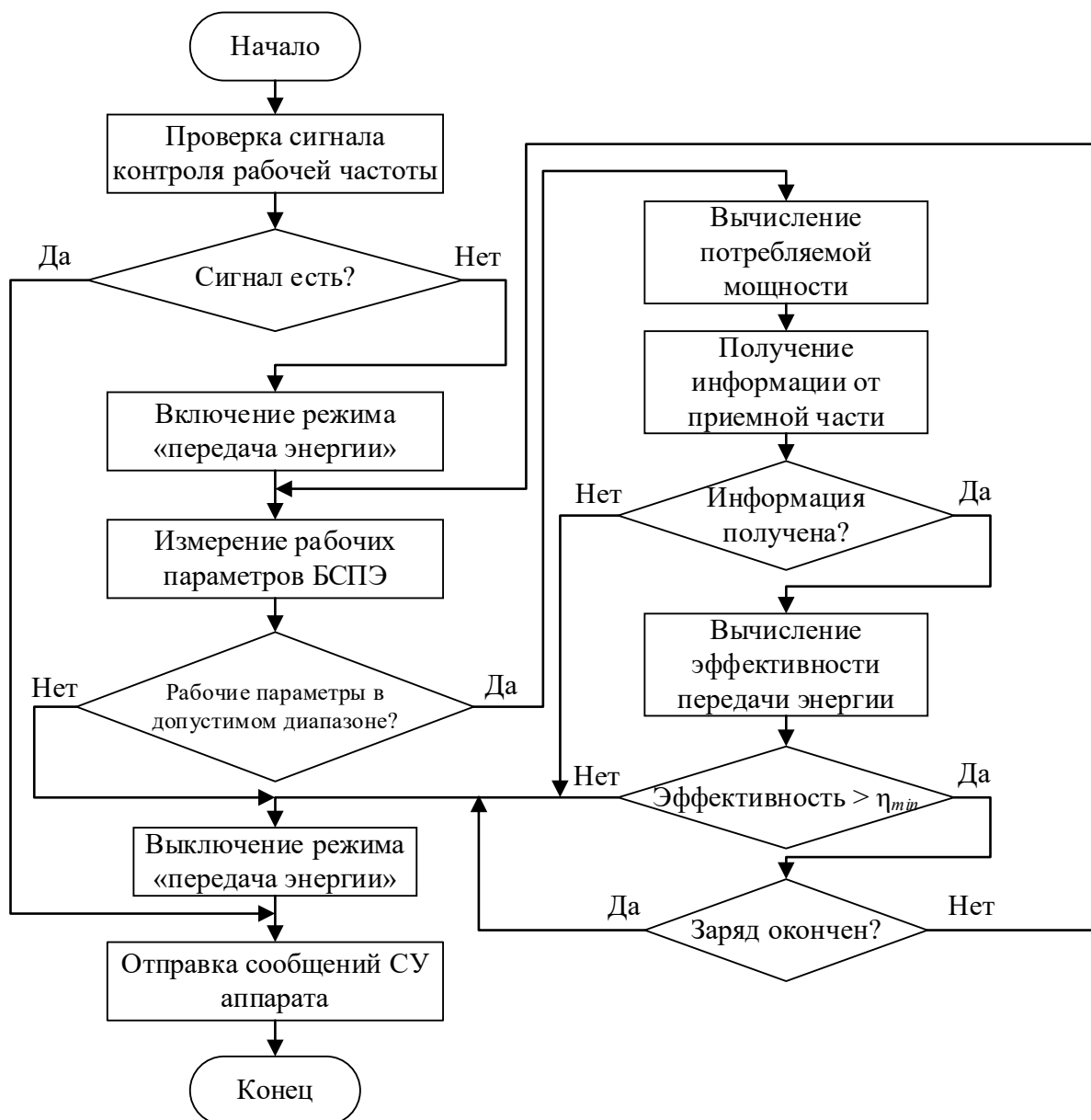


Рисунок 4 – Алгоритм функционирования БСПЭ в режиме передачи энергии

В случае отсутствия соответствующего сигнала в цепи контроля рабочей частоты, включается режим передачи энергии и происходит измерение рабочих параметров БСПЭ. Если параметры в допустимом диапазоне, то вычисляется потребляемая мощность, для того чтобы осуществить дальнейший расчет эффективности передачи энергии. Для расчета эффективности передачи энергии необходима информация от приемной части системы о значении напряжения и тока нагрузки в текущий момент. В случае если информация от приемной части не получена, режим передачи энергии выключается, СУ аппарата отправляется соответствующее сообщение, и

происходит переход к ожиданию команд в основном алгоритме. Если эффективность передачи энергии больше минимального заданного значения, то выполняется проверка уровня заряда аккумуляторной батареи, информация о котором предоставляется приемной частью системы. Пока процесс заряда не завершен, а все рабочие параметры и эффективность передачи энергии находятся в допустимом диапазоне, функционирование системы в режиме передачи продолжается с циклической проверкой данных параметров. По окончании процесса заряда модуль двунаправленной БСПЭ отправляет соответствующее сообщение (таблица 1) СУ аппарата.

Функционирование модуля осуществляется в режиме приема энергии при получении соответствующей команды от СУ аппарата.

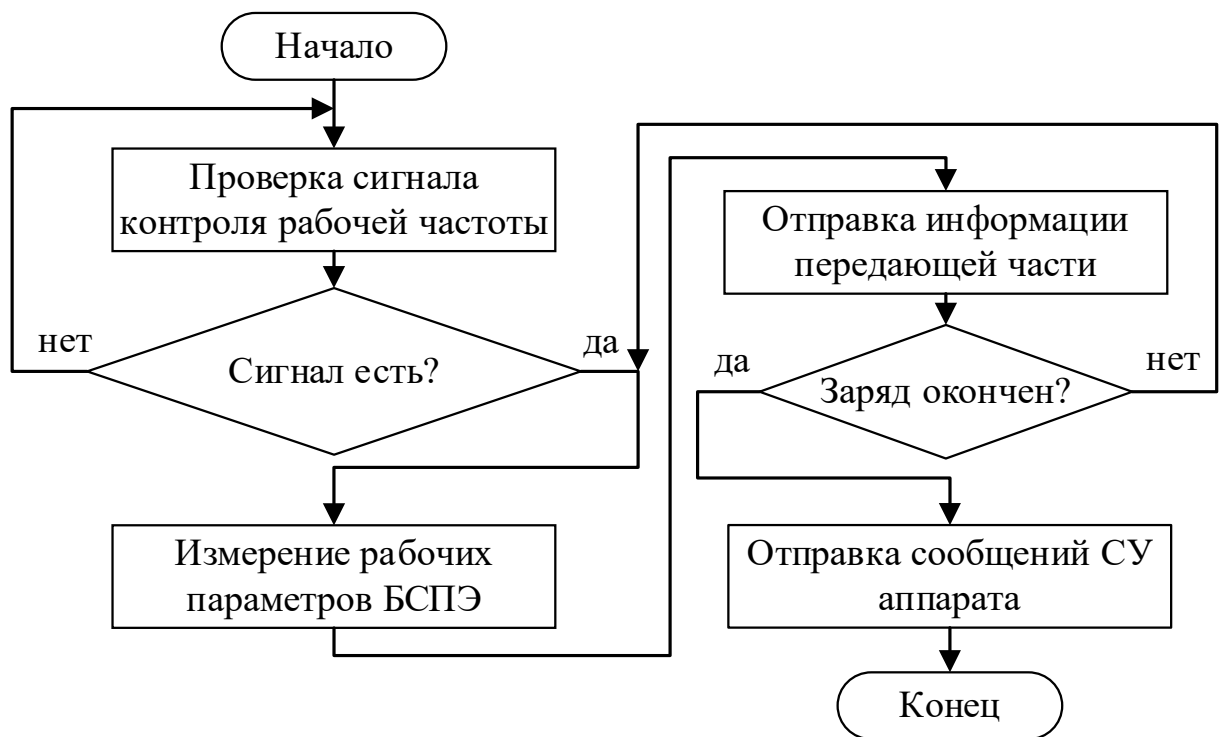


Рисунок 5 – Алгоритм функционирования БСПЭ в режиме приема энергии

Основными операциями алгоритма (рисунок 5) являются измерение рабочих параметров БСПЭ и отправка данной информации на передающую часть. По окончании заряда модуль информирует СУ аппарата, а алгоритм работы модуля в режиме приема энергии завершает свою работу.

Таблица 1. Сообщения модуля двунаправленной БСПЭ

Режим передачи энергии	
Условие	Сообщение
Присутствует сигнал в цепи контроля рабочей частоты	«Передача не возможна»
Ток потребления $< I_{min}$	«Нет нагрузки»
Ток потребления $> I_{max}$	«Перегрузка»
Рабочая частота $> F_{max}$	«Не номинальный режим работы»
Напряжение питания $< U_{min}$	«Низкий заряд батареи»
Информация от приемной части отсутствует	«Нет связи с приемной частью»
Эффективность $< \eta_{min}$	«Низкая точность позиционирования»
Заряд окончен	«Заряд окончен»
Режим приема энергии	
Заряд окончен	«Заряд окончен»

Параметры в таблице 1 для режима передачи энергии имеют следующие значения: I_{min} – минимальное значение тока потребления; I_{max} – максимальное значение тока потребления; F_{max} – максимальное значение рабочей частоты; U_{min} – минимальное значение напряжения питания; η_{min} – минимальное значение эффективности передачи энергии.

В представленных алгоритмах подразумевается, что модуль двунаправленной БСПЭ имеет питание от бортовой сети аппарата, а уровень питающего напряжения соответствует напряжению аккумуляторной батареи. Критерием для определения окончания заряда может служить уровень напряжения, измеряемый частью БСПЭ, которая функционирует в режиме приема энергии. Разработанные алгоритмы позволяют осуществлять управление и мониторинг параметров двунаправленной БСПЭ. Использование БСПЭ рассматривается в составе распределенной системы управления надводных и подводных аппаратов. Предложенные алгоритмы реализуют функции защиты, которые учитывают специфику разработанных схемотехнических решений.

Учитывая конструктивные особенности АНПА, принципы работы технического зрения и БСПЭ, разработана геометрическая модель, описывающие совместную установку данных систем (рисунок 6).

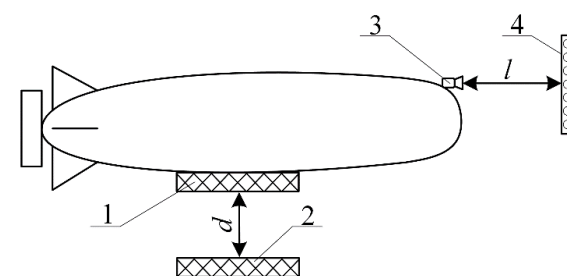


Рисунок 6 – Геометрическая модель АНПА и зарядной станции с размещением камеры технического зрения в носовой части; 1 – приемная часть БСПЭ, 2 – передающая часть БСПЭ, 3 – камера технического зрения, 4 – ArUco-маркер

В представленной модели аппарат перемещается к зарядной станции до и после распознавания маркера в горизонтальном направлении. Для распознавания маркера и последующего расчета относительного расположения и ориентации необходимо, чтобы маркер полностью помещался на изображении. Геометрическая модель 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.

Как указано ранее, эффективность работы и передаваемая мощность БСПЭ в значительной мере зависят от расстояний и смещений между передающей и приемной частью. В данном исследовании не рассматривается какая-либо фиксация АНПА относительно зарядной станции, так как это значительно усложняет конструктивные решения зарядной станции. Ввиду постоянного движения водных масс положение аппарата относительно БСПЭ требуется корректировать, чтобы процесс заряда протекал с меньшими

потерями энергии. Для решения данной задачи разработан метод динамического позиционирования аппарата относительно БСПЭ. Предлагаемый метод основан на комплексировании рабочих параметров БСПЭ и данных с системы технического зрения. Управляющие воздействия для исполнительных устройств аппарата формируются на основе данных о пространственном положении системы технического зрения относительно ArUco-маркера. Задача распознавания ArUco-маркера решается посредством библиотеки OpenCV, которая позволяет распознавать маркеры на изображении и вычислять их пространственные характеристики. Оценка достижения требуемой точности при позиционировании осуществляется на основе рабочих параметров БСПЭ. Для этого проведен анализ характеристик БСПЭ в различных режимах и рассчитаны пороговые значения выходного напряжения на основе значений тока нагрузки. Используя пакет программ для решения задач вычислений, преобразованные данные были аппроксимированы полиномом второго порядка. График полученной функции представлен на рисунке 7.

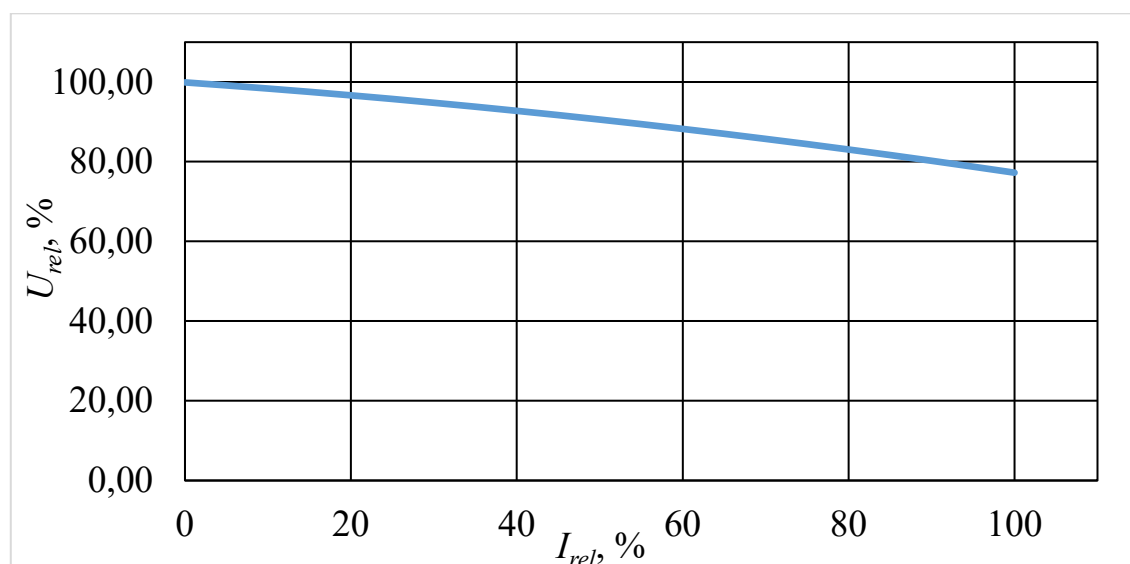


Рисунок 7 – Зависимости выходного напряжения БСПЭ от тока нагрузки в относительных единицах

Кривая на рисунке 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. Для оценки достижения требуемой точности позиционирования АНПА относительно БСПЭ на основе рабочих параметров возможно использовать неравенство (8):

$$U_{rel} \geq -0,0008 \cdot I_{rel}^2 - 0,1466 \cdot I_{rel} + 99,905, \quad (8)$$

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 (8) соблюдается, то позиционирование приемной части системы относительно передающей выполнено достаточно точно, и передача энергии идет с высокой эффективностью. Неравенство (8) 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/RTCJ.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 способом, исходя из рабочих характеристик системы. На основе предлагаемого метода разработан алгоритм позиционирования АНПА, представленный на рисунке 8.

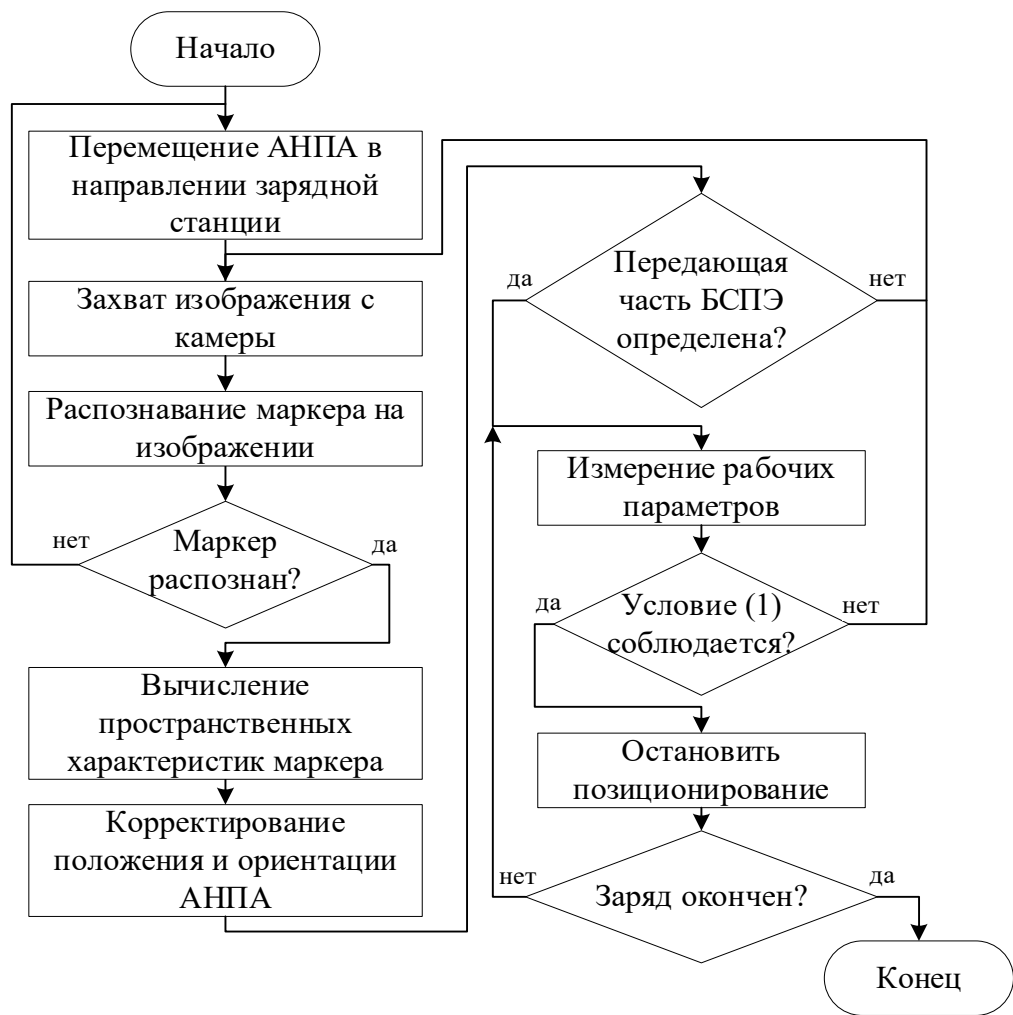


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма динамического позиционирования АНПА

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

В результатах за отчетный период представлено разработанное аппаратное и алгоритмическое обеспечение, реализующее процесс обмена энергетическими ресурсами для надводных и подводных аппаратов. Совокупность результатов за текущий и прошедшие периоды исследования формируют комплексный подход к беспроводной передаче энергии применяемый для надводных и подводных аппаратов, который включает в себя: геометрическую модель, алгоритмы оценки положения и перемещения аппаратов, метод динамического позиционирования аппарата и методику расчета эффективности передачи энергии, аппаратные решения модуля БСПЭ и алгоритмы его функционирования.

Представленная геометрическая модель отличается взаимным размещением БСПЭ, камеры технического зрения и маркеров, что позволяет реализовать динамическое позиционирование аппарата относительно передающей части БСПЭ. Алгоритм предварительной оценки положения и перемещения надводного и подводного аппаратов отличается реализацией взаимной идентификации на основе акустических систем позиционирования. Предлагаемый метод динамического позиционирования аппарата относительно БСПЭ отличается комплексированием рабочих параметров БСПЭ и данных системы технического зрения, что позволяет реализовать соответствующий алгоритм поддержания пространственного положения АНПА в процессе беспроводного заряда аккумуляторной батареи. Представленная методика расчета эффективности передачи энергии отличается тем, что учитывает потери энергии при передаче через индуктивно связанные резонансные контуры в водной среде. Разработанные аппаратные

решения отличаются структурой модуля БСПЭ, которая позволяет интегрировать его в распределенную систему управления подводным или надводным аппаратом. Предложенные алгоритмы функционирования модулей БСПЭ учитывают специфику разработанных схемотехнических решений и реализуют функционирование модулей в составе распределенной системы управления аппаратом.