

**Приложение к отчету о выполнении проекта № 19-08-01215**  
**«Теоретические основы двунаправленной беспроводной передачи**  
**энергии и алгоритмы построения автоматического перераспределения**  
**энергоресурсов в группе роботов» в 2020 году**

Целью проекта является разработка теоретических основ и алгоритмов построения автономных робототехнических средств для перераспределения энергетических ресурсов на основе технологии беспроводной передачи энергии при выполнении групповых задач. Реализация поставленной цели предполагает исследование и разработку технологических основ беспроводной передачи энергии между агентами роевых систем, разработку структурных и схмотехнических решений беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ), получение её характеристик и анализ ограничений.

В ходе первого этапа проекта был проведен анализ современного состояния проблемы беспроводной передачи энергии и перераспределения энергетических ресурсов между автономными робототехническими средствами. Определены направления исследований, нацеленные на решение проблемы перераспределения энергии в группе роботов и увеличение времени автономной работы роботов за счет оптимизации маршрутов движения агентов роя. Проведены анализ и классификация методов перераспределения энергетических ресурсов между автономными робототехническими средствами. Выявлены основные недостатки рассмотренных БСПЭ, в частности, существующие решения в большинстве случаев являются однонаправленными и позволяют осуществлять пополнение заряда агентов роя только от стационарных док-станций, что приводит к увеличению времени выполнения задач роевой системой. Также использование однонаправленных БСПЭ для перераспределения энергии не является эффективным решением, поскольку для передачи энергии от одного агента к другому требуется установка приемной и передающей частей устройства на каждого робота. Более эффективным решением данной задачи являются двунаправленные

БСПЭ, в которых каждая часть системы может использоваться в качестве передающей и приемной. Также в рамках первого этапа проекта были разработаны теоретические и технологические основы двунаправленной передачи энергии непосредственно между агентами роя с применением специализированной системы управления беспроводной передачей энергии, обеспечивающей защиту от недопустимых режимов работы, контроль рабочих параметров и взаимодействие с пользователем. Разработаны решения, которые обеспечат работу передающего и приемного колебательных контуров в режиме резонанса, что позволит добиться наилучших показателей эффективности и передаваемой мощности при любом взаимном расположении частей устройства. Результаты первого года исследований представлены на 3 международных конференциях. Опубликовано 3 научных статьи в изданиях, индексируемых в базе Scopus/WoS.

Заявленные цели проекта на период, на который предоставлен грант:

1) осуществить анализ ограничений и разработать требования к алгоритмам управления построением автономных робототехнических средств для обеспечения перераспределения энергетических ресурсов внутри роя роботов;

2) разработать алгоритмы управления построением автономных робототехнических средств для обеспечения перераспределения энергетических ресурсов внутри роя роботов;

3) разработать прототип устройства для двунаправленной беспроводной передачи энергии;

4) подготовить серию статей для публикации в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях, индексируемых в РИНЦ и SCOPUS/WoS.

В соответствии с п.3, запланированных ранее задач по проекту на 2020 год необходимо разработать прототип устройства двунаправленной

беспроводной системы передачи энергии (БСПЭ) для перераспределения энергетических ресурсов внутри роя роботов.

В ранее проведенных работах исполнителями по данному проекту [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Smirnov, P. (2019, August). Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics (pp. 193-203). Springer, Cham.], [Савельев А.И., Крестовников К.Д., Солёный С.В. Разработка беспроводного зарядного устройства для мобильной робототехнической платформы // В сборнике: Интеллектуальные Энергосистемы. Материалы V Международного молодежного форума. 2017. С. 197-201.] были разработаны однонаправленные БСПЭ на катушках с сердечником и на катушках без сердечника. В процессе исследования было выявлено, что разработанные образцы на катушках без сердечника имеют меньший вес, лучшую эффективность и большую дистанцию для передачи энергии. Системы с однонаправленной передачей энергии хорошо подходят для эксплуатации совместно с различными мобильными сервисными платформами [Pavliuk N., Smirnov, P., Kovalev A.: Constructional and architectural solutions for service mobile platform with pluggable modules. Izvestiya Tula State University, Technical science, Vol. 10, 2019, pp. 181–193.]. В процессе анализа и разработки математической модели роевой робототехнической системы с возможностью двунаправленной передачи энергии между агентами [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Ronzhin, A. (2020). Mathematical Model of a Swarm Robotic System with Wireless Bi-directional Energy Transfer. In Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms (pp. 13-23). Springer, Cham.] было выявлено, что применение однонаправленных БСПЭ либо накладывает ограничения на способы передачи энергии между агентами и исключает возможность сквозной передачи энергии через агента, либо требует одновременной установки и приемных и передающих частей БСПЭ в каждом энергетическом соединении робота. Двунаправленная система лишена данных недостатков. Опираясь на

предыдущие исследования однонаправленных систем, разработана структура двунаправленной системы беспроводной передачи энергии, представленная на рисунке 1.

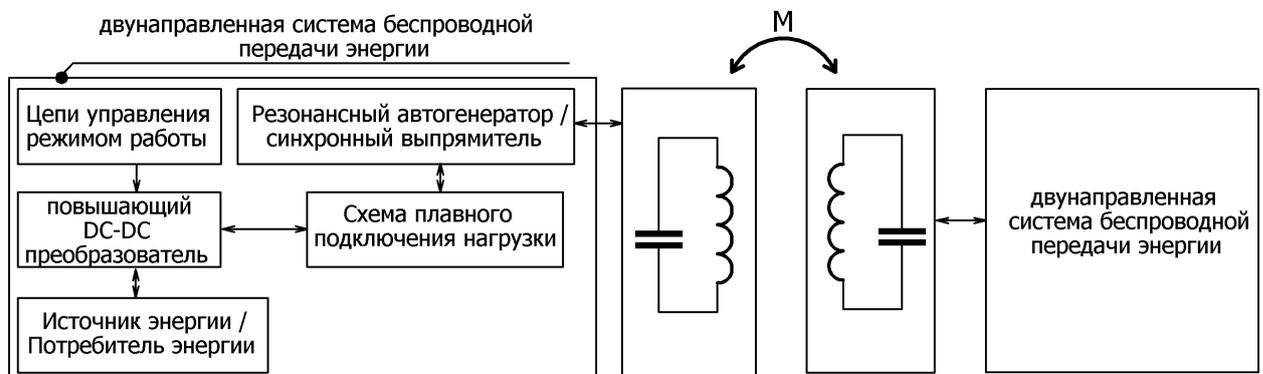


Рисунок 1. Структурная схема двунаправленной системы беспроводной передачи энергии

Структура состоит из нескольких основных блоков. Основной частью системы является резонансный автогенератор с возможностью работы в режиме синхронного выпрямления. Передача энергии осуществляется методом электромагнитной индукции через индуктивно связанные параллельные резонансные контуры. Резонансный контур в свою очередь является частотоподающими (1) для автогенератора, если система работает в режиме передачи энергии.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Резонансные контуры являются идентичными, а система в общем симметрична относительно индуктивно связанных контуров. Использование DC-DC повышающего преобразователя обусловлено тем фактом что индуцированная ЭДС в приемной катушке будет иметь меньшую амплитуду чем в передающей катушке в виду присутствия воздушного зазора, который имеет высокое сопротивление для магнитного потока, а также активных потерь в резонансных контурах. Амплитуда ЭДС в передающей катушке рассчитывается по формуле (2) [Abdolkhani, A., Hu, A. P., & Tian, J. (2015). Autonomous Polyphase Current-Fed Push-Pull Resonant Converter Based on Ring

Coupled Oscillators. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(2), 568–576. doi:10.1109/jestpe.2014.2377171], [Abdolkhani, A., & Hu, A. P. (2014). Improved autonomous current-fed push–pull resonant inverter. *IET Power Electronics*, 7(8), 2103–2110. doi:10.1049/iet-pel.2013.0749], [Hu, A. P., & Si, P. (2004). A low cost portable car heater based on a novel current-fed push–pull inverter. In *Australasian Universities Power Engineering Conference.*]:

$$U_m = \pi V_{dc} , \quad (2)$$

где  $V_{dc}$ - напряжение источника.

Таким образом применение в структуре системы повышающего преобразователя позволяет получать напряжение на выходе системы работающей в режиме приема энергии равным и выше напряжения источника питания системы работающей в режиме передачи энергии. Данное свойство позволяет использовать систему для перераспределения энергетических ресурсов между автономными устройствами, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с равным рабочим напряжением. Такая особенность системы актуальна при её использовании в конструкции гомогенных роевых роботов, где необходимо перераспределение ресурсов внутри роя [К. Krestovnikov, E. Cherskikh, A. Ronzhin, Mathematical model of a swarm robotic system with wireless bi-directional energy transfer. *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms, Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. Vol. 272. p. 13-23. DOI: 10.1007/978-3-030-37841-7].

Схемотехническое решение двунаправленной системы беспроводной передачи энергии, представленное на рисунке 2 и рисунке 3, разработано на основе предыдущих исследований в которых описаны беспроводная система передачи энергии (БСПЭ) на катушках без сердечника [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Smirnov, P. (2019, August). Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. In *International Conference on Interactive Collaborative Robotics* (pp. 193-203). Springer, Cham.], и разработан синхронный выпрямитель, а так же рассчитаны

потери синхронного выпрямителя для применения в приемной части БСПЭ [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Pavliuk, N. (2019). Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system. IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies. doi:10.1109/eurocon.2019.8861856], [Krestovnikov, K., Saveliev, A., Shabanova, A., & Vatamaniuk, I. (2020). Comparative study of synchronous and non-synchronous rectifiers for use in the receiving part of a wireless charging system. In Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” (pp. 675-685). Springer, Singapore.]

На рисунке 2 представлена первая часть схемы, включающая в себя автогенератор с возможностью работы в режиме синхронного выпрямления и цепь плавного подключения нагрузки.

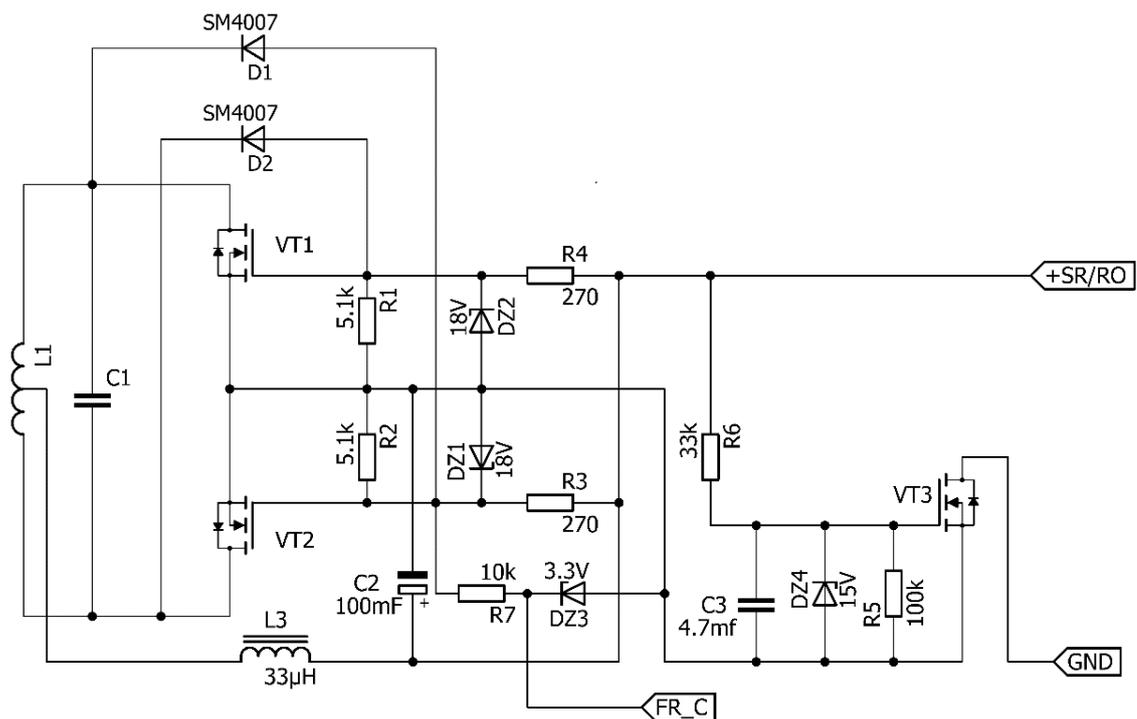


Рисунок 2. Принципиальная схема реверсивной системы передачи энергии, часть 1.

Автогенератор реализован на транзисторах VT1 и VT2, а его частото задающим контуром является передающий/приемный резонансный контур L1C1. Цепь плавного подключения нагрузки работает по принципу



прямоугольной формы с рабочей частотой системы свидетельствует о том, что реверсивная система беспроводной передачи энергии работает в данный момент в качестве принимающей энергию, и переключение системы в режим передачи энергии не допустимо. Высокий уровень сигнала в цепи «TM/RM» поступает через токоограничивающий резистор R10 на базу транзистора VT6 и открывает его. Отпирание VT6 приводит к закрытию транзистора VT4 и отпиранию транзистора VT5. Закрытие транзистора VT4 отключает внутренние цепи DC-DC преобразователя, а VT5 шунтирует диод D3, таким образом «+» источника питания оказывается подключен к точке «+SR/RO». После подачи напряжения питания между точками «+SR/RO» и «GND» ток начинает течь к затвору VT3, открывая его тем самым шунтируя его внутренний диод и к затворам полевых MOSFET транзисторов VT1 и VT2, заряжая емкости затворов через резисторы R3 и R4, что приводит к запуску автогенератора. Для обеспечения надежного отпирания транзисторов и снижения динамических потерь эмпирическим путем было выявлено, что расчет необходимой величины затворных резисторов  $R_{3,4}$  возможно выполнить по формуле (3):

$$R_{3,4} = \frac{1}{30C_g f} \quad (3)$$

где  $C_g$  - затворная емкость применяемых транзисторов.

Формула (3) выведена исходя из того, что заряд затворной емкости должен происходить за 1/10 периода. Принцип работы автогенератора более подробно описан в работе [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Smirnov, P. (2019, August). Wireless Power Transmission System Based on Coreless Coils for Resource Reallocation Within Robot Group. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics (pp. 193-203). Springer, Cham.].

Методика расчета, представленная в [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Pavliuk, N. (2019). Concept of a synchronous rectifier for wireless power transfer system. IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies.

doi:10.1109/eurocon.2019.8861856] может быть использована для расчета потерь в автогенераторе в режиме передачи энергии, а для расчета потерь в резонансном контуре возможно использовать формулу (4):

$$P_{LC} = \sqrt{2}I_m^2(R_l + E_{sr}), \quad (4)$$

где  $R_l$ - активное сопротивление контурной катушки,  $E_{sr}$ - эквивалентное последовательное сопротивление контурного конденсатора.

Переключение системы в режим приема энергии осуществляется подачей сигнала низкого уровня в цепь, обозначенную маркером «ТМ/РМ». В этом случае транзистор VT5 закрыт и его внутренний диод подключен параллельно D3, а VT4 будет открыт, как только появится необходимый уровень напряжения в точке «+SR/RO» и ток потечет к его затвору через дроссель повышающего DC-DC преобразователя и диод D3. После запуска реверсивной системы беспроводной передачи энергии, выступающей в качестве передающей энергию, в катушке L1 выступающей в качестве приемной в данном режиме работы индуцируется ЭДС и через внутренние диоды MOSFEET транзисторов начинает заряжаться электролитическая емкость C2. Как только на емкости C2 появляется минимально необходимое напряжение для отпирания канала MOSFEET транзистора (VT1, VT2), транзистор открывается и шунтирует внутренний диод открытым каналом, имеющим значительно меньшее сопротивление, чем динамическое сопротивление диода. Для исключения сквозного тока через транзисторы VT1, VT2 предназначены диоды D1, D2. Диод D1 запирает транзистор противоположного плеча VT2, пока транзистор VT1 открыт, с диодом D2 и VT1 соответственно. R1, R2 служат для разряда затворной емкости и закрытия транзистора при отсутствии ЭДС в приемной катушке. Цепи DZ1-R3 и DZ2-R4 представляют собой параметрический стабилизатор, который требуется для ограничения напряжения в цепи затвор-исток транзистора. Также через резисторы R3, R4 заряжается затворная емкость при открытии транзистора. C2 и L3 образуют сглаживающий фильтр выпрямителя, при этом емкость C2 так

же необходима для хранения энергии, которая требуется для управления силовыми ключами. Напряжение на конденсаторе C2, когда система работает в режиме приема энергии рассчитывается исходя из (5):

$$U_m = k_{св} \frac{\pi V_{dc}}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

где  $k_{св}$ - коэффициент связи между индуктивно связанными приемной и передающей катушками.

После появления выпрямленного напряжения в точке «+SR/RO» через резистор R6 начинает заряжаться конденсатор C3, а также параллельно подключенная ему затворная емкость VT3. Транзистор VT3 плавно открывается, подключая DC-DC преобразователь к работающему в режиме синхронного выпрямления резонансному автогенератору. Далее открывается транзистор VT4 и происходит запуск повышающего DC-DC преобразователя, затем на выходе реверсивной системы беспроводной передачи энергии в точке «+OUT/IN» появляется выходное напряжение, величина которого устанавливается переменным резистором R15.

Первичная проверка работоспособности предложенного схемотехнического решения проведена в SPICE-симуляторе. Исходная схема системы была упрощена для модели путем исключения DC-DC преобразователя, но в расчетах выходной мощности и эффективности учитывалась его эффективность принятая равной 87%. Транзисторы VT3 заменены на активное сопротивление равное 0,065 Ом в приемной и передающей частях системы. Транзистор VT5 был также заменен на активное сопротивление 0,065 Ом в части системы работающей в режиме передачи энергии. Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора резонансного контура и активное сопротивление катушки приняты равными 0,01 Ом. Индуктивность приемной и передающей катушек составляла  $L1 = 14$   $\mu$ H, емкость резонансного конденсатора  $C1 = 0,47$   $\mu$ F. На основе наших предыдущих исследований коэффициент связи катушек приемной и

передающей частей системы принят равным  $k_c = 0,85$ , такое значение может быть достигнуто при непосредственной близости катушек. График зависимости эффективности передачи энергии от передаваемой мощности, построенный на основе данных моделирования, представлен на рисунке 4.

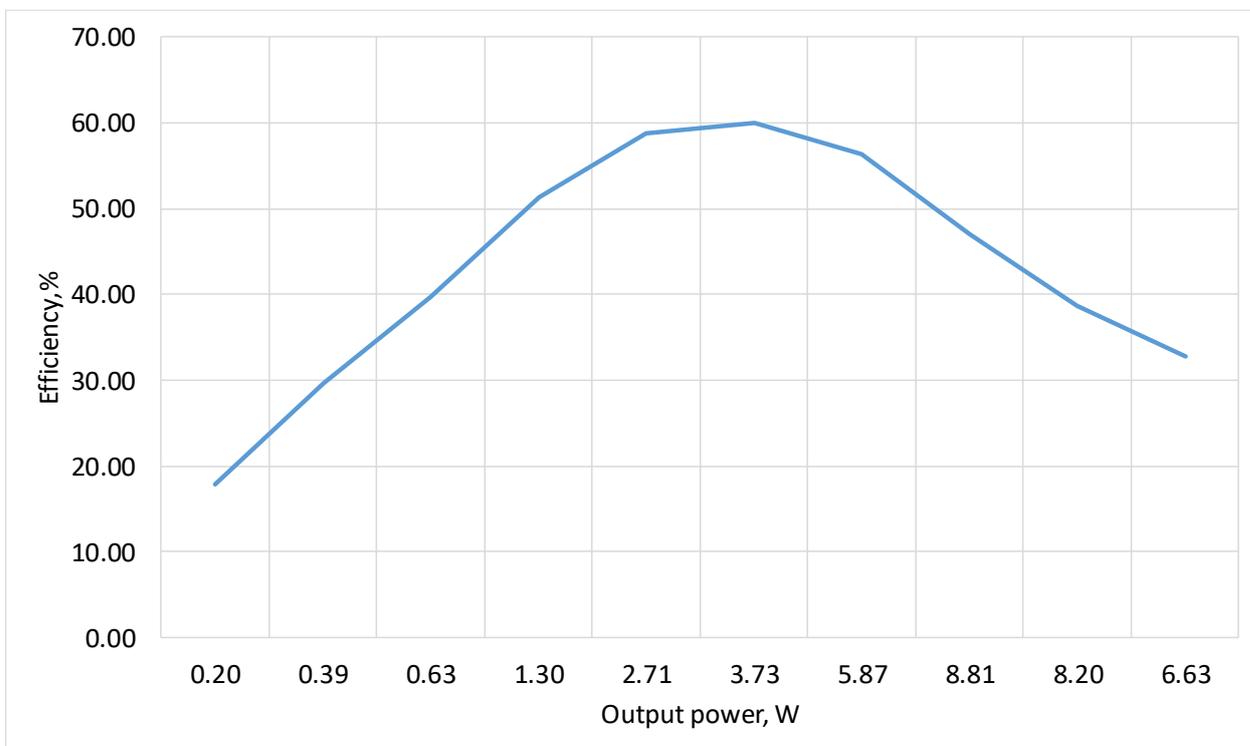


Рисунок 4. Зависимость эффективности передачи энергии от передаваемой мощности

Моделирование работы схемы проводилось на активную нагрузку с сопротивлением от 1 до 250 Ом. Наибольшей выходной мощности 8,81 Вт удалось достичь при сопротивлении нагрузки 2 Ом. Наибольшая эффективность 60,05% достигается при выходной мощности 3,73 Вт. Формы тока и напряжений при работе системы без нагрузки представлены на рисунке 5, напряжение источника питания системы работающей в режиме передачи энергии составляло 8,4 В.

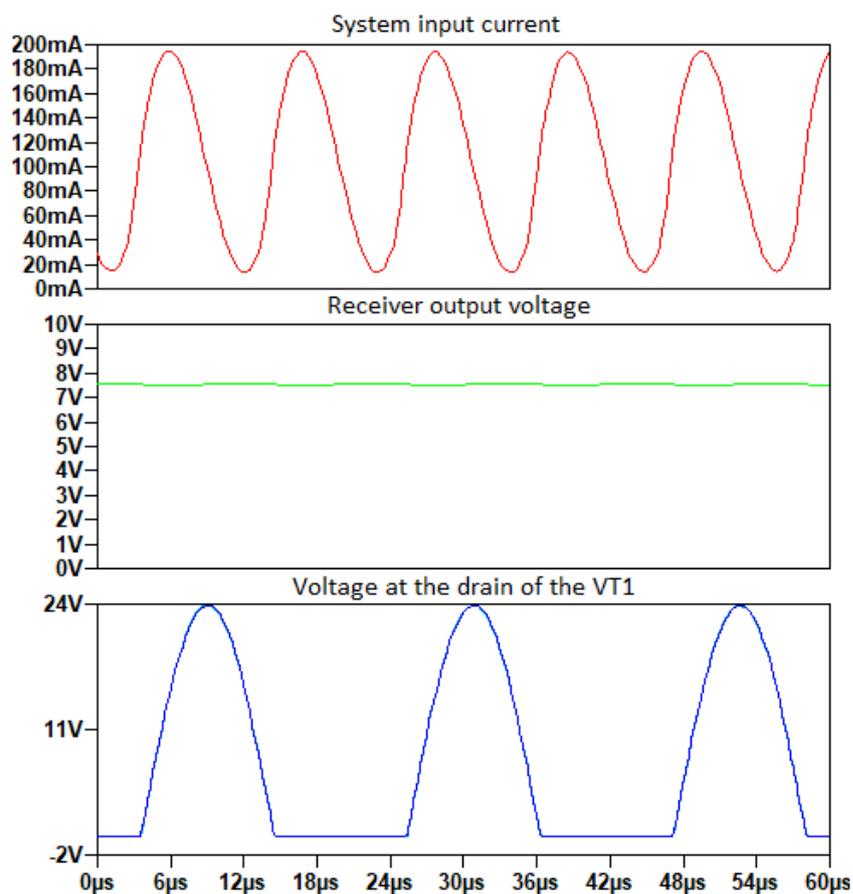


Рисунок 5. Формы напряжений и тока при работе системы без нагрузки

Исходя из графиков, представленных на рисунке 5 рабочая частота системы без нагрузки составила  $\sim 43$  кГц, а максимальный уровень выходного напряжения системы работающей в режиме приема энергии достигал 7,56 В.

Проведенное моделирование позволило проверить работоспособность предложенного схемотехнического решения и получить теоретическую зависимость эффективности системы от передаваемой мощности при заданных параметрах и ограничениях.

Правильный выбор параметров катушек резонансных контуров в индуктивных системах передачи энергии является важной задачей, так как в значительной степени влияет на эффективность и передаваемую мощность данных систем. Оптимизация контурной катушки является многокритериальной задачей, ввиду наличия взаимосвязанных параметров, косвенно влияющих друг на друга. Плоскую спиральную контурную катушку

(рисунок 4), с точки зрения конструктивных особенностей, возможно охарактеризовать следующими параметрами: количеством витков  $N$ , шагом намотки  $d$ , начальным радиусом намотки  $r$ .

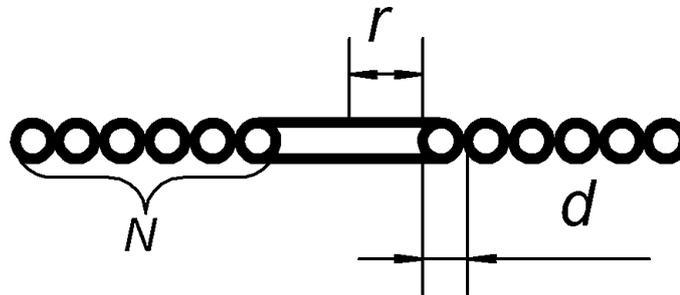


Рисунок 6. Конструктивные параметры плоской спиралевидной катушки

На параметр эффективности передачи энергии напрямую влияет коэффициент связи между приемной и передающей катушками который рассчитывается исходя из взаимоиндукции между катушками (6) [Chavchanidze, G. D. Electrical circuits of sine current. МПТ, Moscow, 2007]:

$$k_{coup} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \sqrt{\frac{\Phi_{M1} \Phi_{M2}}{\Phi_{11} \Phi_{22}}}. \quad (6)$$

где  $M_{12}$  – взаимная индуктивность;  $L_1, L_2$  – индуктивность;  $\Phi_{M1}, \Phi_{M2}$  – магнитный поток взаимной индукции;  $\Phi_{11}, \Phi_{22}$  – магнитный потоки самоиндукции, передающей и приемной катушек соответственно.

В БСПЭ при эксплуатации подразумевается наличие воздушного зазора и осевых смещений между катушками непостоянной величины. Из этого следует что коэффициент связи не является постоянной величиной, а исходя из (6) уменьшается с ростом расстояния передачи энергии, так как увеличение расстояния между катушками снижает величину взаимоиндукции  $M_{12}$ . Коэффициент связи показывает какая часть магнитного потока, индуцированного одной катушкой, индуцирует ЭДС во второй катушке (7):

$$\varepsilon_2 = -k_{coup} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7)$$

Таким образом исходя из (7), для повышения передаваемой мощности и эффективности работы системы в общем случае необходимо увеличивать либо коэффициент связи между катушками, что является возможным только в случае изменения параметров взаимного расположения приемной и передающих катушек, либо за счет увеличения магнитного потока, индуцирующего ЭДС в приемном контуре. В реальных условиях эксплуатации БСПЭ в составе робототехнических комплексов точное взаимное расположение [Pshikhopov, V. K., & Medvedev, M. Y. (2018). Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes. SPIIRAS Proceedings, 5(60), 39-63. <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>] катушек при передаче энергии и его повторное достижение являются сложной задачей и лишают данный способ передачи энергии преимуществ над контактными методами. Следовательно, выбор оптимального варианта контурной катушки не должен основываться на параметре взаимоиндукции и его максимизации.

По закону Био-Савара-Лапласа, величина вектора магнитной индукции, создаваемой некоторым элементарным током в каждой точке пространства, пропорциональна этому току. Магнитный поток пропорционален величине магнитной индукции  $B$ , которая в свою очередь пропорциональна току  $I$  в проводнике. Из этого возможно сделать вывод, что  $\Phi \sim I$ , а коэффициентом пропорциональности является величина индуктивности  $L$  (8):

$$\Phi = LI. \quad (8)$$

Исходя из (8), увеличить магнитный поток, создаваемый передающей катушкой, возможно за счет увеличения тока через нее или увеличения величины ее индуктивности. При этом параметры  $L$  и  $I_m$  катушки в составе LC контура, работающего на резонансной частоте, являются связанными соотношением (9):

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(2\pi fL)^2 + R_{con}^2}}, \quad (9)$$

где  $U_m$  – амплитуда переменного напряжения, подводимого к резонансному контуру,  $f$  – рабочая частота контурной катушки,  $R_{con}$  – активное сопротивление проводника катушки.

Изменение количества витков катушки приводит к изменению ее индуктивности, а, следовательно, ее реактивного сопротивления. Также с количеством витков изменяется длина проводника и его активное сопротивление. Наличие таких взаимосвязей требует расчета всех параметров катушки в зависимости от количества витков. Для этого необходимо выразить все расчетные соотношения через геометрические параметры катушки.

Электрическими параметрами катушки являются индуктивность и величина активного сопротивления. Величина активного сопротивления однородного проводника с постоянным сечением вычисляется по формуле (10):

$$R_{con} = \frac{\rho l_{con}}{S}, \quad (10)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника;  $l_{con}$  – длина проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

Длина проводника спиральной плоской катушки в зависимости от количества витков рассчитывается исходя из формулы (11):

$$l_{con} = 2\pi(Nr + d(0.5N^2 - 0.5N)). \quad (11)$$

Используя (10), (11), возможно вычислить активное сопротивление проводника спиральной катушки.

Расчет величины индуктивности плоской спиральной катушки с достаточно высокой точностью возможно выполнить по эмпирической формуле Вилера [de Queiroz, A. C. M. (2005). Mutual inductance and inductance calculations by Maxwell's Method. Home page of Dr. Antonio Carlos M. de Queiroz.], [Wheeler, H. A. (1928). Simple inductance formulas for radio coils. Proceedings of the institute of Radio Engineers, 16(10), 1398-1400.], приведенной к метрическим единицам и обозначенным выше геометрическим параметрам катушки (12):

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1000}{2.54} \frac{(2r+Nd)^2 N^2}{32r+60Nd}, \quad (12)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Расчет потерь на активном сопротивлении требует вычислить по (9) амплитудное значение тока, и используя его вычислить  $P_d$  (13):

$$P_d = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 R_{con}. \quad (13)$$

Для того, чтобы проводить сравнение катушек и выбрать оптимальное количество витков, необходимо ввести параметр, который возможно соотнести с параметром потерь  $P_d$  и который характеризует количество энергии магнитного поля, запасаемой в контурной катушке за единицу времени (14):

$$P_m = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 Lf. \quad (14)$$

Более наглядно показать разницу между контурными катушками с разным количеством витков позволит параметр  $\gamma$ , который является отношением потерь в контурной катушке к энергии магнитного поля, запасаемой в ней за единицу времени:

$$\gamma = \frac{P_d}{P_m}. \quad (15)$$

Коэффициент  $\gamma$  является выраженной через мощности добротностью контурной катушки на заданной частоте. Значения  $\gamma$  менее 1 показывают то, что потери в катушке больше, чем энергия магнитного поля, запасаемая в нем за единицу времени. С увеличением количества витков потери в катушке снижаются, так как увеличивается индуктивность и реактивное сопротивление, а, следовательно, уменьшается величина реактивного тока.

Подход к выбору количества витков подразумевает расчет в табличной форме, так как при таком представлении данных рассчитанные параметры катушек наиболее удобно сравнивать между собой. Исходными параметрами для

расчета являются:  $U_m$  – амплитуда переменного напряжения подводимого к резонансному контуру,  $f$  – рабочая частота контурной катушки,  $r$  – начальный радиус намотки,  $d$  – шаг намотки катушки,  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника,  $S$  – сечение проводника,  $j$  – допустимая плотность тока в проводнике.

В данной работе подробно рассмотрен вариант выбора оптимального количества витков катушки  $N^*$  при заданном начальном радиусе и шаге намотки. Однако представленные выше формулы можно использовать для подбора оптимальных вариантов катушки при изменяемом шаге или начальном радиусе намотки, или изменяемой рабочей частоте системы. В качестве ограничивающего условия в представленном варианте выбора оптимального количества витков было задано допустимое значение тока в проводнике  $I_m^p: N = \{N | (N_1 \leq N \leq N_2) \wedge (I \leq I_m^p)\} \in \mathbf{R}^n$ . Данный параметр рассчитывается по допустимой плотности тока  $j$  и заданному сечению проводника  $S$ :

$$I_m^p = j^p S. \quad (16)$$

Целевая функция представлена действующим током в проводнике катушки:  $I: N \rightarrow \mathbf{R}^n$ . Таким образом, для обеспечения максимальной передаваемой мощности:  $I(N) \xrightarrow{N \in N} \max$ .

Если подбор параметров катушки направлен на минимизацию массогабаритных параметров, то ограничения накладываются на размеры катушки или емкость конденсатора резонансного контура. При использовании в передающей части БСПЭ автогенератора, частото задающим контуром которого является передающий LC контур, интерес может представлять подбор оптимальной катушки с условием фиксированной емкости конденсатора резонансного контура и изменяемой рабочей частотой, которая зависит от индуктивности контурной катушки.

Для выбора оптимального количества витков контурной катушки при  $f = const$  задается диапазон значений витков  $[N_1, N_2]$ . Для каждого значения  $N$  при помощи представленных формул рассчитываются геометрические ( $l_{con}$ ) и электрические ( $R_{con}, L$ ) параметры катушки. Затем определяется действующее значение тока в проводнике  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ , в зависимости от которого выбирается оптимальное количество витков  $N^*$ , такое что  $I(N^*) = \max I(N)$ .

При  $f = var$  сначала для каждого  $N$  рассчитываются геометрические и электрические параметры катушки, затем определяется рабочая частота по формуле:

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (17)$$

Далее аналогичным способом, как при  $f = const$  определяются  $I$  и  $N^*$ . При заданных ограничениях в размерах катушки ее внешний диаметр рассчитывается по формуле  $D = 2(r + Nd)$ , а количество витков выбирается такое, чтобы  $D_{max} \leq D$ .

В таблице 1 представлены исходные параметры для расчета и выбора оптимального количества витков для приемной и передающих катушек БСПЭ малой мощности для эксплуатации в составе роевой робототехнической системы для перераспределения энергии между агентами роя.

Таблица 1. Исходные параметры для расчета

Параметр	$U_m$	$r$	$d$	$\rho$	$S$	$j^p$
Значение	26.37 V	19 mm	0.74 mm	$0.0171 \frac{Om \cdot mm^2}{m}$	$0.374 mm^2$	$6.5 A/mm^2$

Для предложенного схематехнического решения, в котором система построена на основе автогенератора, частотозадающим контуром которого является передающий LC контур, более удобным представляется подбор оптимальной катушки с условием фиксированной емкости конденсатора

резонансного контура и изменяемой рабочей частотой, которая зависит от индуктивности контурной катушки. В качестве ограничивающего условия было задано допустимое значение тока в проводнике.

В таблице 2 приведены результаты расчета параметров для значения емкости конденсатора резонансного контура  $C = 0.47 \mu F$ .

Таблица 2. Результаты расчета при  $f = var, C = const$

N, turn	f, kHz	I, A	P <sub>d</sub> , W	P <sub>m</sub> , W	γ	N, turn	f, kHz	I, A	P <sub>d</sub> , W	P <sub>m</sub> , W	γ
1	771.4	42.4	9.8	252	25.6	11	76.3	4.2	1.2	24.9	19.6
2	391.1	21.5	5.1	127.8	24.7	12	70.2	3.8	1.1	22.9	19.2
3	263.9	14.5	3.5	86.2	24.0	13	65.0	3.5	1.1	21.2	18.9
4	200.1	11.0	2.8	65.4	23.3	14	60.6	3.3	1	19.8	18.5
5	161.6	8.9	2.3	52.8	22.6	15	56.7	3.1	1	18.5	18.2
6	135.8	7.4	2.0	44.4	22.0	16	53.2	2.9	0.9	17.4	17.9
7	117.3	6.4	1.7	38.3	21.5	17	50.2	2.7	0.9	16.4	17.6
8	103.3	5.6	1.6	33.7	21.0	18	47.5	2.6	0.8	15.5	17.3
9	92.4	5	1.4	30.1	20.5	19	45.0	2.5	0.8	14.7	17.0
10	83.5	4.6	1.3	27.3	20.1	20	42.8	2.3	0.8	14	16.8

Исходя из (16), для заданных исходных параметров допустимое значение тока проводника  $I_m^p$  составляет 2.43 А. Следовательно, возможными вариантами являются катушки с количеством витков 19 и 20. Следуя критерию максимизации магнитного потока, создаваемого передающей катушкой, наилучшим вариантом является катушка с 19 витками. Контурная катушка с 19 витками имеет действующее значение тока 2.5 А, что выше, чем рассчитанное значение  $I_m^p$  на 2,8%, поэтому допустимо использовать данный вариант. С учетом заданного ограничения по току, оптимальным вариантом является катушка с 19 витками.

Для эмпирической поверки разработанного схемотехнического решения, изготовленные экспериментальные образцы БСПЭ были установлены на подвижные автономные робототехнические платформы, (рисунок 7), и проведена серия экспериментов.

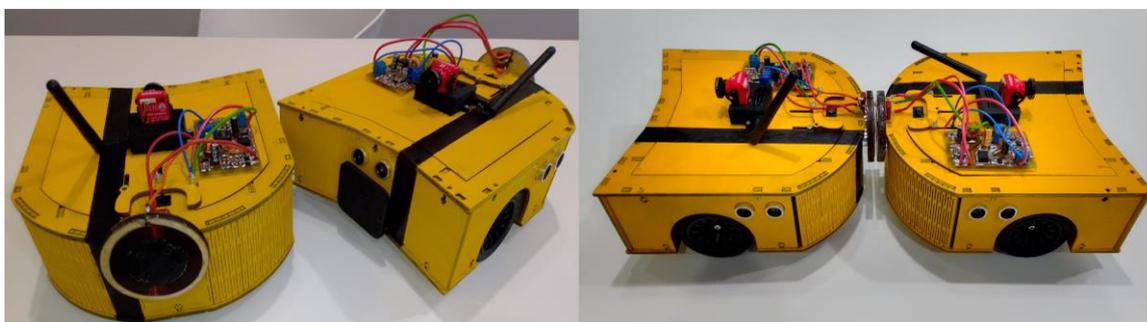


Рисунок 7. Экспериментальные образцы разработанной системы, установленные на мобильные автономные платформы

Катушки резонансного контура имеют 19 витков с отводом от середины, в качестве конденсатора резонансного контура используются пленочные MPP конденсаторы с низким значением ESR.

При проведении первого эксперимента, в резонансном контуре БСПЭ с фиксированной емкостью конденсатора  $C=0.47 \mu\text{F}$  была получена зависимость эффективности от передаваемой мощности (рисунок 8).

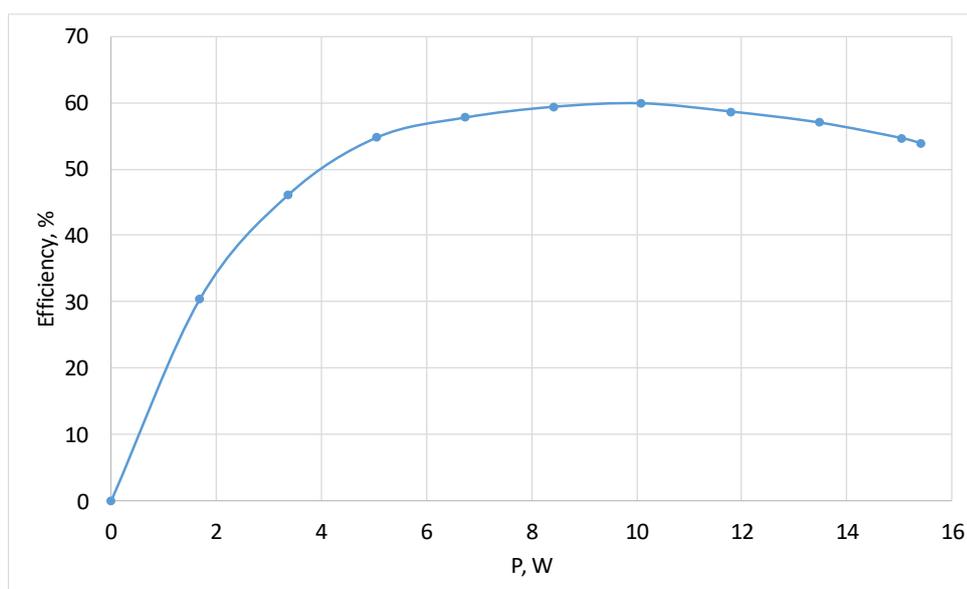


Рисунок 8. Зависимость эффективности системы от передаваемой мощности.

Из графика на рисунке 8 следует, что максимальная эффективность системы достигает 59.91% при передаваемой мощности 10.09 W. Максимальная передаваемая мощность 15.4 W.

Во втором эксперименте проводилось измерение максимальной передаваемой мощности БСПЭ при изменяемом расстоянии между приемной и передающей катушками. Полученная зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии представлена на рисунке 9.

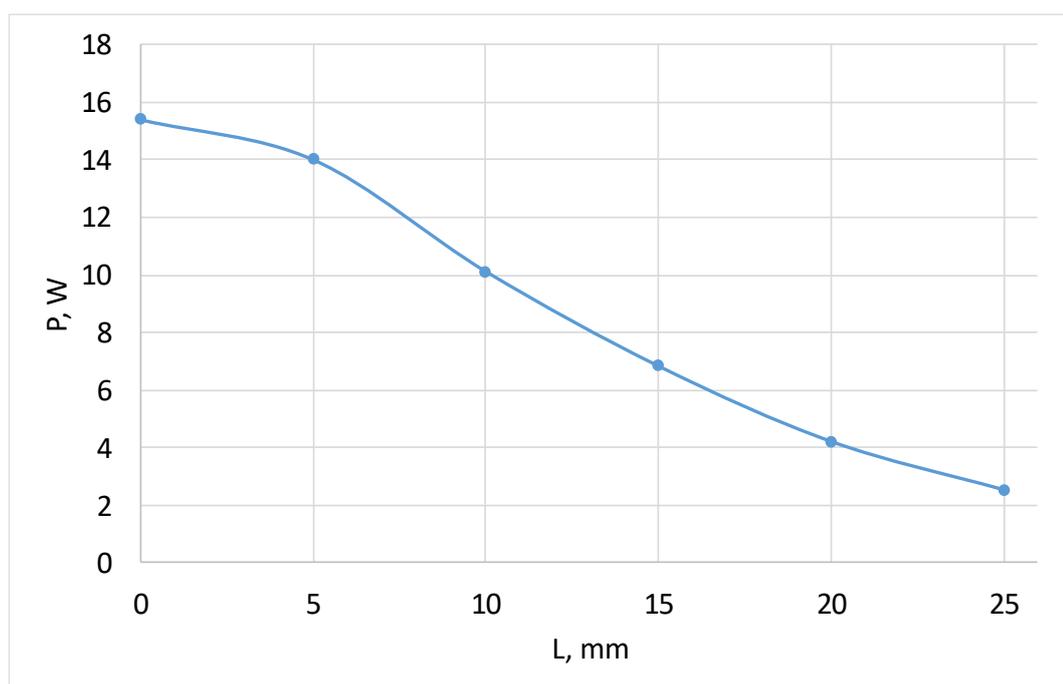


Рисунок 9. Зависимость максимальной передаваемой мощности системы от расстояния передачи энергии.

При увеличении расстояния между катушками снижается величина взаимной индукции, как следствие снижается передаваемая мощность. Кривая имеет нисходящий характер, наибольшее значение передаваемой мощности достигается при непосредственной близости приемной и передающих частей системы. При расстоянии 25 мм передаваемая мощность уменьшается в 6,1 раз и составляет 2,5 Вт.

На рисунке 10 представлена зависимость эффективности работы системы БСПЭ от расстояния между приемной и передающей катушками при

максимальной передаваемой мощности для заданного расстояния передачи энергии.

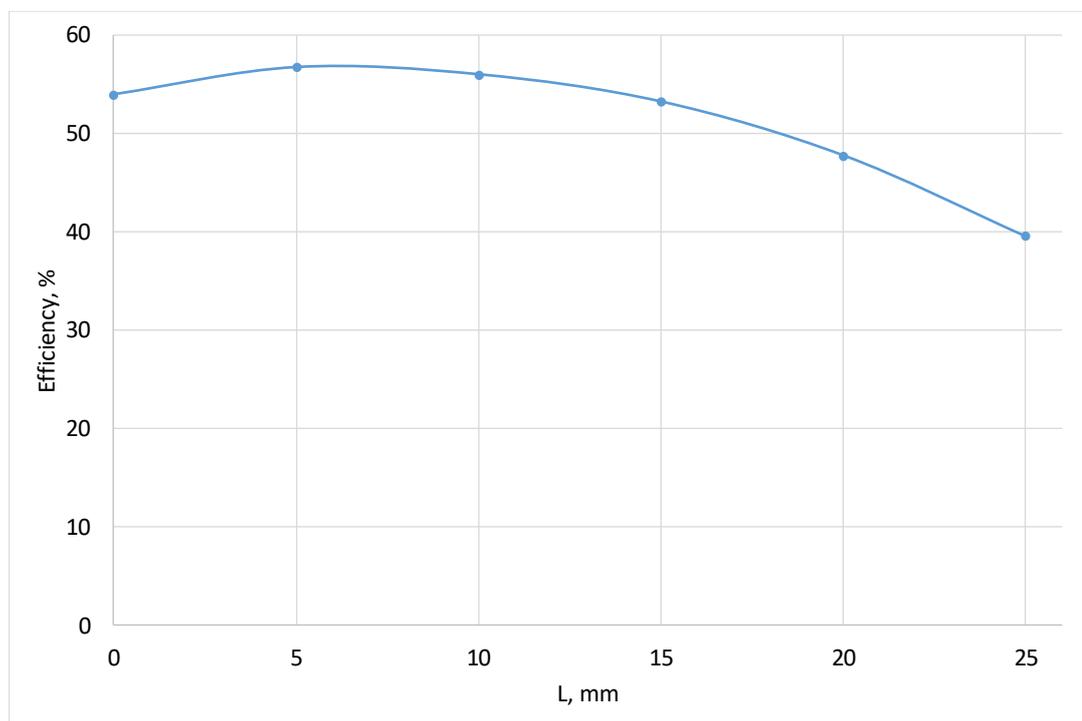


Рисунок 10. Зависимость эффективности системы от расстояния передачи энергии.

Из графика на рисунке 10 следует, что максимальное значение эффективности при максимальной передаваемой мощности для заданного расстояния достигает 56,58 % при расстоянии между приемной и передающей частями 5 мм, передаваемая мощность при этом составила 14,01 Вт. Данный факт обусловлен лучшей, по сравнению с другими случаями, согласованностью сопротивления нагрузки с БСПЭ при данной передаваемой мощности и расстоянии.

Далее образцы системы были подключены к Li-ion аккумуляторным батареям с рабочим напряжением 7,4 V и емкостью 2500 mA/h. Один из образцов работал в режиме передачи энергии, другой в режиме приема энергии. На рисунке 11 представлена осциллограмма формы напряжения на передающей и приемной катушках, когда аккумулятор, подключенный к образцу системы,

работающему в режиме приема энергии заряжен, и выходной ток имеет минимальное значение, то есть система работает без нагрузки.

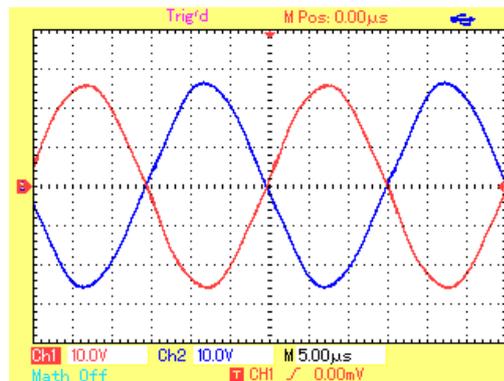
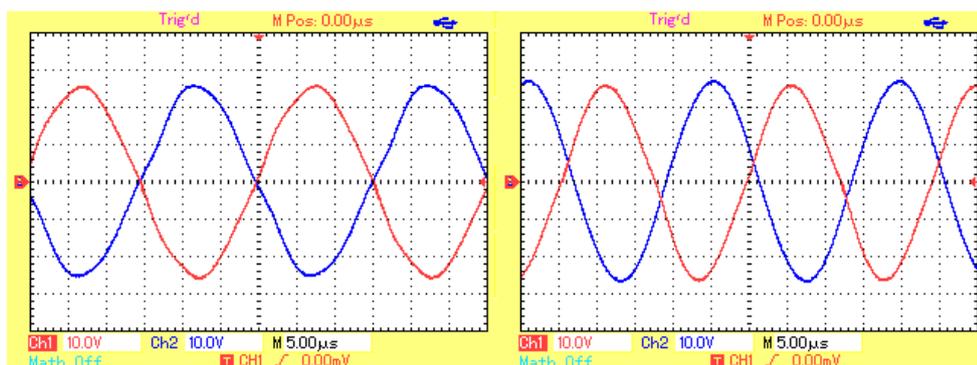


Рисунок 11. Форма напряжения на передающей и приемной катушках при заряженной аккумуляторной батарее

На рисунке 11 и на всех следующих (рисунках 12, 13) красным цветом обозначена кривая напряжения на передающей катушке, а синим на приемной. Напряжения на приемной и передающей катушках имеют синусоидальную форму с незначительными искажениями и близкую амплитуду. Фаза кривых сдвинута на 180 градусов так как катушки имеют одинаковое направление намотки, а установлены встречно друг другу.

На рисунке 12 представлены кривые напряжения при зарядном токе аккумулятора 0.5 А и разном расстоянии между катушками.



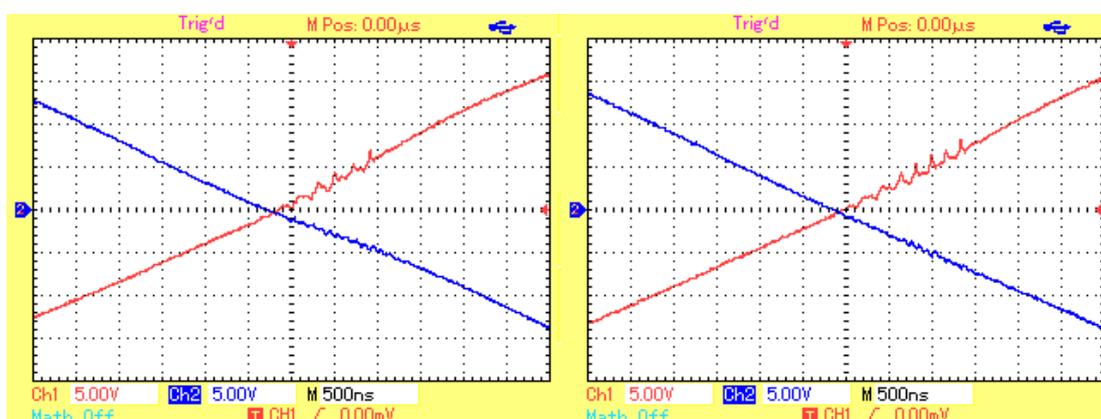
а

б

Рисунок 12. Форма напряжения на передающей и приемной катушках при заряде аккумуляторной батареи. а – при непосредственной близости катушек, б – при расстоянии 20 мм между катушками.

Из кривых на рисунке 12 можно увидеть, что при работе системы с нагрузкой, синусоидальная форма напряжений сохраняется, но присутствуют искажения формы кривых. При увеличении расстояния между катушками до 20 мм наблюдается изменение фазового сдвига между напряжениями, при этом искажения в форме кривых практически исчезают.

Увеличение масштаба кривых на осциллограммах позволило выявить незначительные искажения в форме напряжения на передающей катушке, представленные на рисунке 13.



а

б

Рисунок 13. Переходный процесс при открытии транзисторов автогенератора. а – без нагрузки, б – при токе нагрузки 0.5 А.

Переходный процесс при открытии транзисторных ключей автогенератора имеет колебательный характер, а увеличение тока нагрузки системы ведет к увеличению длительности и амплитуды колебаний. Наличие данного переходного процесса увеличивает потери на транзисторах, что может негативно сказываться на общей эффективности системы при большой передаваемой мощности. Уменьшить амплитуду и время переходного процесса возможно уменьшением значения сопротивления затворных резисторов R3 и R4.

Преимуществами разработанной двунаправленной БСПЭ является интегрированная система управления режимом передачи энергии и силовая часть системы, не требующая специализированной системы управления так как выполнена в виде резонансного автогенератора. Применение резонансного автогенератора и идентичных контуров в приемной и передающей частях позволяет системе работать всегда в резонансном режиме и не требует подстройки рабочей частоты, независимо от расстояния и смещений между катушками, что позволяет повысить эффективность и передаваемую мощность системы. Данная особенность позволяет использовать систему при низкой точности совмещения приемной и передающей катушек, что актуально при использовании в автономной робототехнике. Одним из свойств представленной структуры и схемотехнического решения является возможность получать напряжение на выходе системы, работающей в режиме приема энергии равным и выше напряжения источника питания системы работающей в режиме передачи энергии. Следовательно систему возможно использовать для перераспределения энергетических ресурсов между автономными агентами робототехнических систем, источниками питания которых являются аккумуляторные батареи с одинаковым и разным рабочим напряжением.

Беспроводные системы передачи энергии (БСПЭ), основанные на принципе передачи энергии между магнитосвязанными контурами имеют ряд эксплуатационных ограничений. В отличие от проводных систем питания эффективность работы и передаваемая мощность в значительной мере зависят от расстояния передачи энергии. Также при больших расстояниях или смещениях между приемной и передающей частями системы увеличивается интенсивность полей рассеяния, которые создают помехи и негативно влияют на работу электроники, расположенной рядом с БСПЭ. В соответствии с п.1, запланированных ранее задач по проекту на 2020 год был проведен анализ ограничений БСПЭ для обеспечения перераспределения энергетических ресурсов внутри роя роботов.

Допустимое расстояние и осевое смещение между приемной и передающей частями стационарной БСПЭ [Zhang, J., Song, G., Li, Y., Qiao, G., & Li, Z. (2013). Battery swapping and wireless charging for a home robot system with remote human assistance. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 59(4), 747–755. doi:10.1109/tce.2013.6689685], при которых эффективность работы наиболее высока, выявляется авторами эмпирически. Система представляет собой станцию для беспроводного заряда аккумуляторов, помещаемых в нее манипулятором. Передающая часть расположена в стационарно установленной зарядной станции, а приемная – в корпусе аккумулятора. При нулевом смещении и расстоянии между приемной и передающей катушками максимальный зарядный ток составляет 725 мА при средней эффективности процесса заряда 46.4%. При увеличении расстояния и осевого смещения до 5 мм зарядный ток уменьшается в 2.233 раза, время заряда аккумулятора увеличивается в 1.5 раза.

Исследование влияния осевого смещения на эффективность работы системы беспроводной передачи энергии с двумя передающими катушками и одной приемной представлено в [Talal F. Skaik and Basel O. AlWadiya. "Design of wireless power transfer system with triplet coil configuration based on magnetic resonance", *IU-JEEE Vol. 17(1)*, pp. 3169-3174, 2017]. Магнитная связь между катушками исследуется с помощью моделирования. Данная конфигурация практически реализована с использованием соленоидных катушек и протестирована для проверки результатов моделирования. Передающая и приемная катушки системы представляют собой идентичные соленоидные катушки, изготовленные из медных проводов диаметром 2.75 мм. Провода намотаны на деревянные цилиндры. Ширина намотки – 160 мм, радиус катушки – 350 мм, количество витков – 5.5. При моделировании расстояние между передающей и приемной катушками составляло 1 метр, эффективность передачи энергии – 61.01%. Экспериментальные результаты показывают падение эффективности в 1.94 раз при увеличении угла смещения приемной катушки до 35°.

Авторы [Zhong, W., Xu, D., & Hui, R. S. Y. (2020). A Method to Create More Degrees of Freedom for Designing WPT Systems—Coil Splitting. In *Wireless Power Transfer* (pp. 63-73). Springer, Singapore.] проводят эксперименты по исследованию эффективности БСПЭ, изменяя размеры передающей катушки путем увеличения её ширины в 7 раз с шагом 7 mm. Система состоит из трех катушек с проводом типа литцендрат с 24 жилами диаметром 0.08 mm. Особенностью данной системы является разделение передающей катушки на две, расположенные в одной плоскости. Использование промежуточной катушки позволяет повысить эффективную индуктивность передающей катушки на резонансной частоте и увеличить коэффициент связи. Приемная катушка состоит из двух слоев с 9 витками на каждом. Внутренний диаметр катушки – 21.7, наружный – 27.02 mm. Длина намотки катушки составляет 5.32 mm. Расстояние между приемной и передающей катушками – 30 mm. В качестве экранирования системы используется ферритовая пластина толщиной 1 мм. При минимальной ширине передающей катушки эффективность работы системы составила 14.43%, при максимальной – увеличилась в 5.21 раз.

Изменение параметров одной из катушек БСПЭ для достижения наибольшей эффективности работы системы применяется авторами [Yuan, Q., Chen, Q., Li, L., & Sawaya, K. (2010). Numerical analysis on transmission efficiency of evanescent resonant coupling wireless power transfer system. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 58(5), 1751-1758.]. Представленная БСПЭ состоит из большой прямоугольной петли, малой квадратной петли и дополнительной квадратной спиральной катушки. Предполагается, что система применяется в помещении высотой 2 м и шириной 6 м. Большая петля имеет размеры  $2 \times 6$  m и является передающей частью системы. Дополнительная катушка и малая петля в совокупности представляют собой приемную часть БСПЭ. Катушка имеет форму квадрата со стороной 0.3 m, состоит из 4.5 витков, расстояние между которыми 0.02 m и используется для увеличения индуктивности малой петли. Зазор между дополнительной

катушкой и малой квадратной петлей – 0.01 m. Зазор между квадратной петлей и спиральной катушкой и ее параметры регулируются для достижения требуемой резонансной частоты. Авторами выявлено влияние следующих факторов на эффективность передачи энергии и резонансную частоту: нагрузка, подключенная к приемной части системы, наличие посторонних объектов в поле действия системы, таких как токопроводящие материалы или тело человека. Численные результаты показывают, что эффективность передачи энергии 50% может быть достигнута, когда предложенная система используется для зарядки только одного устройства с оптимизированной нагрузкой. Обнаружено, что эффективность передачи достигает своего максимального значения, на частоте 19.22 MHz. При отклонении частоты от 19.22 MHz эффективность снижается в 17 раз. Результаты также показывают, что эффективность передачи энергии снижается в 11 раз, когда нерезонансный объект (тело человека) находится в непосредственной близости от приемного элемента. Однако это снижение эффективности может быть значительно уменьшено, если относительное расстояние между принимающим элементом и телом человека превышает 0.5 m.

Для достижения высокой максимальной эффективности беспроводной передачи энергии с использованием печатных спиральных катушек и петель, в работе [Jolani, F., Yu, Y., & Chen, Z. (2014). A Planar Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer System Using Printed Spiral Coils. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 1648–1651. doi:10.1109/lawp.2014.2349481] анализируется добротность отдельного резонансного контура, и влияние входного сопротивления системы. Система представляет собой две квадратные печатные платы со сторонами 10 cm, с расположенными на них проводниками (катушками и вспомогательными проводниками - петлями). Катушки находятся с одной стороны печатной платы, а петли – с другой. Авторы проводят моделирование катушек с различными конфигурациями для выявления лучшей: с вспомогательными проводниками и без них. Также, как и в рассмотренных выше работах

изменяется расстояние между витками катушек, толщина витков и их количество. Расстояние между приемной и передающей частями системы – 10 см. С использованием дополнительных петель добротность спиральных катушек может быть улучшена. Посредством моделирования и эксперимента было обнаружено, что катушки с двумя витками и с дополнительными проводниками имеют эффективность передачи энергии – 81,87% и 81,68% что в 1.056 и 1.057 раз больше, чем у катушек без дополнительных проводников.

Авторами [Pellitteri, F., Boscaino, V., Di Tommaso, A. O., Miceli, R., and Carponi, G. (2014, March). Experimental test on a Contactless Power Transfer system. In 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), pp. 1-6. IEEE (2016).] рассматривается БСПЭ для передачи энергии электровелосипедам. В качестве проводника приемной и передающей катушек используется медный провод с сечением 3 mm<sup>2</sup>. Внешний диаметр катушек составляет 15 см. Получены зависимости эффективности работы системы от количества витков катушек, расстояния между приемной и передающей частями системы и эффективности связи от рабочей частоты. Для уменьшения веса, размера и стоимости готового устройства выбрано оптимальное число витков для плоских катушек – 9. Выявлено, что высокая эффективность связи между катушками сохраняется при частотах 110-130 кГц. При условии, что воздушный зазор между катушками не превышает 3 см, БСПЭ имеет передаваемую мощность 96 W и эффективность 79%.

Высокую эффективность работы БСПЭ при изменении расстояния между частями системы предложено сохранить [Duong, T. P., & Lee, J.-W. (2011). Experimental Results of High-Efficiency Resonant Coupling Wireless Power Transfer Using a Variable Coupling Method. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 21(8), 442–444. doi:10.1109/lmwc.2011.2160163] путем введения в структуру системы дополнительных согласующих резонансных контуров и установки оптимального расстояния между ними.

Согласованность в системе достигается путем изменения коэффициента связи между приемной частью системы и в двумя промежуточными резонансными контурами. Промежуточные резонансные контуры имеют 6 витков с шагом 1 см и внутренний диаметр 50 см. Их собственная резонансная частота – 6.7 МГц. Приемная и передающая катушки имеют один виток диаметром 40 см. Все катушки изготовлены из медного провода диаметром 3 мм и коаксиально выровнены. Проведен эксперимент, в котором расстояние между промежуточными резонансными контурами изменялось от 15 до 100 см с шагом 5 см. При расстоянии менее 30 см между контурами наблюдается снижение эффективности работы в среднем в 27 раз, что связано с расщеплением частоты (резонансная частота отклоняется от 6.7 МГц). Для работы с максимальной эффективностью, частота должна быть в диапазоне 5.92-7.63 МГц. В таком случае, эффективность работы достигает 90% и быстро падает при увеличении расстояния между промежуточными резонансными контурами. При расстоянии между приемной и передающей частями системы в 60 см эффективность падает в 1.94 раза, при 100 см в 3.07. При расстоянии 15 см эффективность увеличивается в 1.02 раз и составляет 92.5%.

При большом воздушном зазоре между приемной и передающей частями БСПЭ [Moon, S., Kim, B. C., Cho, S. Y., Ahn, C. H., & Moon, G. W. (2014). Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 5861-5870.], – 200 мм коэффициент связи между катушками низок, что отрицательно влияет на эффективность работы системы. Для компенсации коэффициента связи в системе используется дополнительная промежуточная катушка, позволяющая увеличить самоиндукцию и индуктивность передающей катушки БСПЭ. Высокий коэффициент связи увеличивает эффективность работы системы и вызывает явление бифуркации, которое создает три частоты с нулевым фазовым углом так, что одна резонансная частота расположена рядом с другой частотой. Внешний диаметр приемной и

передающей катушек системы передачи энергии 800 и 600 mm соответственно. Экспериментально полученная максимальная эффективность передачи составила 95.57% при работе системы на частоте 100 kHz и передаваемой мощности 6.6 kW. При уменьшении мощности до 1.1 kW эффективность передачи энергии падает приблизительно на 1%.

Введение дополнительного резонансного контура для предотвращения снижения эффективности работы при зазорах между частями БСПЭ 300-600 mm применяется авторами [Sun, Y., & Zhao-Hong Ye. (2016). Power transfer efficiency analysis of U-WPT system. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC). doi:10.1109/apemc.2016.7522890]. Предложена структура системы U-WPT, состоящая из передающего, приемного и промежуточного резонансных контуров. Рассмотрено влияние количества витков и расположения промежуточного резонансного контура на эффективность передачи энергии. Авторами проведен эксперимент, во время которого расстояние между передающей катушкой и приемной катушкой составило 600 mm, между передающей и промежуточной катушками составило 300 mm. Коэффициент связи приемной и передающей катушек – 0.0045. Была разработана имитационная модель в программном комплексе SIMULINK с числом витков у катушек от 1 до 48, с шагом 6. Результаты моделирования показывают, что наибольшая эффективность достигается с 30 витками и составляет 75.82%. Реальная максимальная эффективность при таких условиях составляет 74.83%. Авторы работы выполнили анализ влияния положения промежуточной катушки с 30 витками на эффективность передачи энергии. Так же была разработана имитационная модель в SIMULINK с изменяющимися расстояниями между передающей, приемной и промежуточной катушками от 0 до 600 mm, с шагом 100 mm. Положение промежуточного резонансного контура напрямую влияет на эффективность передачи энергии. При расстоянии между катушками в 100 mm и 500 mm реальная эффективность работы системы снижается в 18 и 12 раз соответственно.

Авторы работы [Zhen Ning Low, Chinga, R. A., Tseng, R., & Jenshan Lin. (2009). Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(5), 1801–1812. doi:10.1109/tie.2008.2010110] исследуют зависимости эффективности передачи энергии при осевом смещении между приемной и передающей катушками. В работе предложено выполнять приемную катушку меньших размеров, чем передающая. Такое решение приводит к уменьшению коэффициента связи (менее 0.5) и небольшому снижению эффективности передачи энергии. Эмпирически установлено, что коэффициент связи между катушками не должен быть ниже 0.25 для уменьшения нагревания катушек и значительного снижения эффективности передачи энергии. Авторы предлагают выполнять намотку приемной катушки без зазоров, а передающую с зазорами между витками для обеспечения равномерного распределения поля и достижения 5% отклонения принимаемой мощности при осевом смещении. При проведении эксперимента приемная катушка была в ~1.6 раз меньше передающей и состояла из 5 плотно намотанных витков, а передающая – из 10. Расстояние между катушками составляло 10 mm. При использовании принудительного охлаждения эффективность передачи составила 77% при передаваемой мощности 295 W, при естественном охлаждении максимальная передаваемая мощность и эффективность передачи энергии падают до 74% и 69 W соответственно.

Исходя из проведенного анализа научных работ в направлениях разработки систем БСПЭ, получения их характеристик, и исследования рабочих ограничений возможно сделать вывод, что основные ограничения при применении данных систем, связаны с взаимным расположением приемной и передающей частей системы. Расстояние, угловое и осевое смещение между приемной и передающей частями системы влияют на эффективность, передаваемую мощность и уровень электромагнитных помех, создаваемых БСПЭ. При увеличении воздушного зазора коэффициент связи частей системы уменьшается и требуется регулировка частоты работы. Для сохранения

требуемого коэффициента связи применяются приемные катушки с меньшим диаметром с более плотной намоткой и передающие катушки большего диаметра с зазорами между витками, что обеспечивает равномерное распределение магнитного поля и снижает влияние осевого смещения. Эффективность работы БСПЭ при изменении воздушного зазора может снижаться в 18 и более раз.

При угловом смещении приемной катушки относительно передающей с 0 до 35° в одном из рассмотренных прототипов [Talal F. Skaik and Basel O. AlWadiya. "Design of wireless power transfer system with triplet coil configuration based on magnetic resonance", IU-JEEE Vol. 17(1), pp. 3169-3174, 2017], эффективность передачи энергии падает в 15.21 раз. В системах с тремя катушками имеются ограничения расположения промежуточного контура, количества витков приемной и передающей катушек, геометрических размеров передающей катушки, частоты работы и наличия в непосредственной близости нерезонансных объектов. Так один из рассмотренных прототипов достигает эффективности передачи энергии 50% при частоте 19.22 МГц при условии, что нерезонансный объект не может находиться ближе, чем 0.5 м от устройства. Если такой объект находится на более близком расстоянии снижение эффективности передачи энергии может достигать 11 раз.

Из рассмотренных в данном анализе исследовательских работ возможно выделить некоторые взаимосвязи между эффективностью работы системы, передаваемой мощностью и геометрическим расположением приемной и передающих катушек. Эксплуатация БСПЭ в составе мобильных автономных робототехнических систем (АРС) требует анализа эксплуатационных ограничений БСПЭ и их систематизации для последующей разработки алгоритмов движения и позиционирования. Для систематизации эксплуатационных ограничений БСПЭ связанных с относительным расположением приемной и передающей частей системы проведено

исследование на реальном прототипе системы изготовленным на основе схемотехнических решений, представленных в [Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A., Saveliev A. Structure and Circuit Solution of a Bidirectional Wireless Power Transmission System in Applied Robotics/// «Radioengineering»], [Krestovnikov K., Cherskikh E., Zimuldinov E., Bykov A. Development of the structure and circuit solution of a bidirectional wireless energy transmission system for swarm robots //SJEE]. Согласно предложенной в [Krestovnikov K., Cherskikh E., Zimuldinov E., Bykov A. Approach to choosing of optimal number of turns in planar spiral coils for systems of wireless energy transfer //EiE] методике выбора оптимального количества витков контурных катушек, для прототипа были изготовлены резонансные контуры с плоскими спиралевидными катушками с 15 витками и внешним диаметром 62 мм. Для получения зависимостей эффективности и передаваемой мощности от расстояния и смещения между приемной и передающей катушками были проведены два вида экспериментов.

В первом виде экспериментов был получен ряд зависимостей передаваемой мощности и эффективности системы для 6 фиксированных расстояний передачи энергии в диапазоне от непосредственной близости катушек друг к другу до 25 мм. Выбор верхнего значения диапазона обусловлен значительным падением ЭДС в приемной катушке и отсутствием работоспособности системы при расстояниях, превышающих данное. При проведении эксперимента передающая часть питалась от стабилизированного источника с напряжением 8,43 В. На выходе приемной части системы выходным DC-DC повышающим преобразователем напряжение было установлено на уровне 8,43 В на холостом ходу. Нагрузкой являлся электронный управляемый балласт со стабилизацией тока. График зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний -  $L$  передачи энергии представлен на рисунке 14.

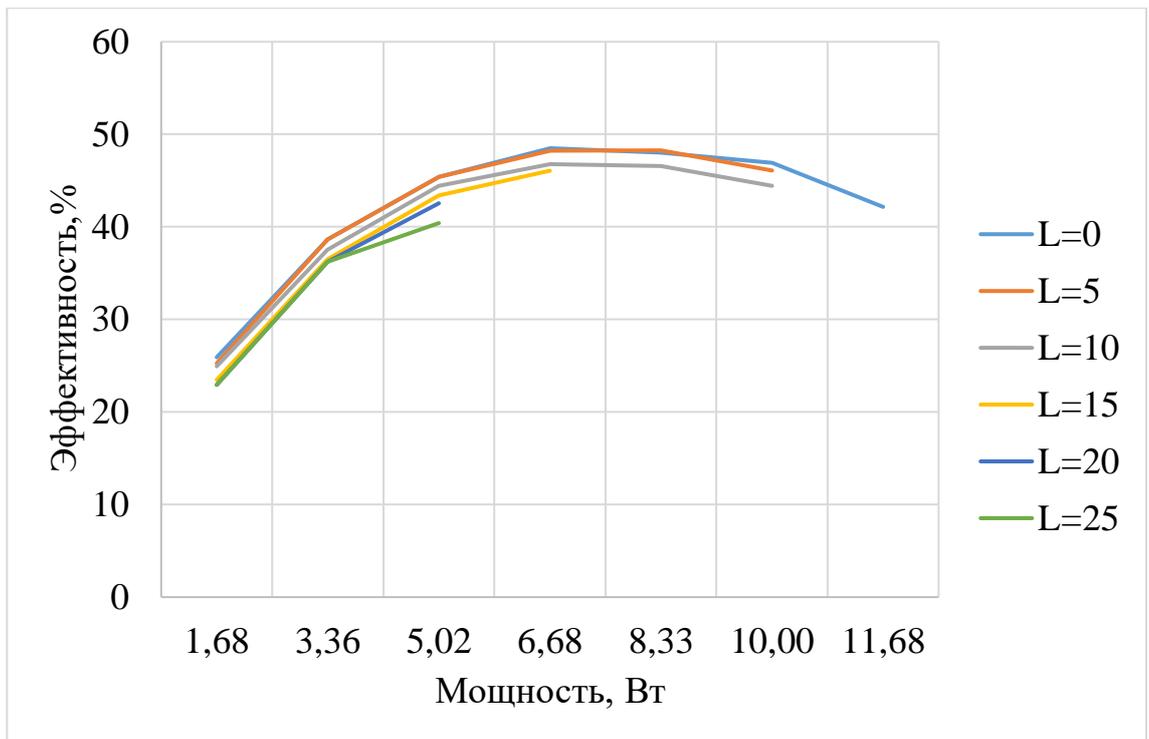


Рисунок 14. Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных расстояний между катушками

Кривые на рисунке 14 имеют близкую форму, при  $L=0$  и  $L=5$  мм практически совпадают. Увеличение расстояния между приемной и передающей катушками ведет к снижению максимальной мощности нагрузки. При изменении расстояния между катушками до 25 мм максимальная передаваемая мощность снижается в  $\sim 2,8$  раз по сравнению с минимальным расстоянием между катушками.

Второй ряд экспериментов предполагал получение зависимостей передаваемой мощности и эффективности системы при тех же условиях что и в первом эксперименте. Расстояние между катушками было минимальным ( $L=0$ ) при этом изменялось осевое смещение между катушками -  $H$ . Зависимости были получены для 5 осевых смещений и представлены на рисунке 15.

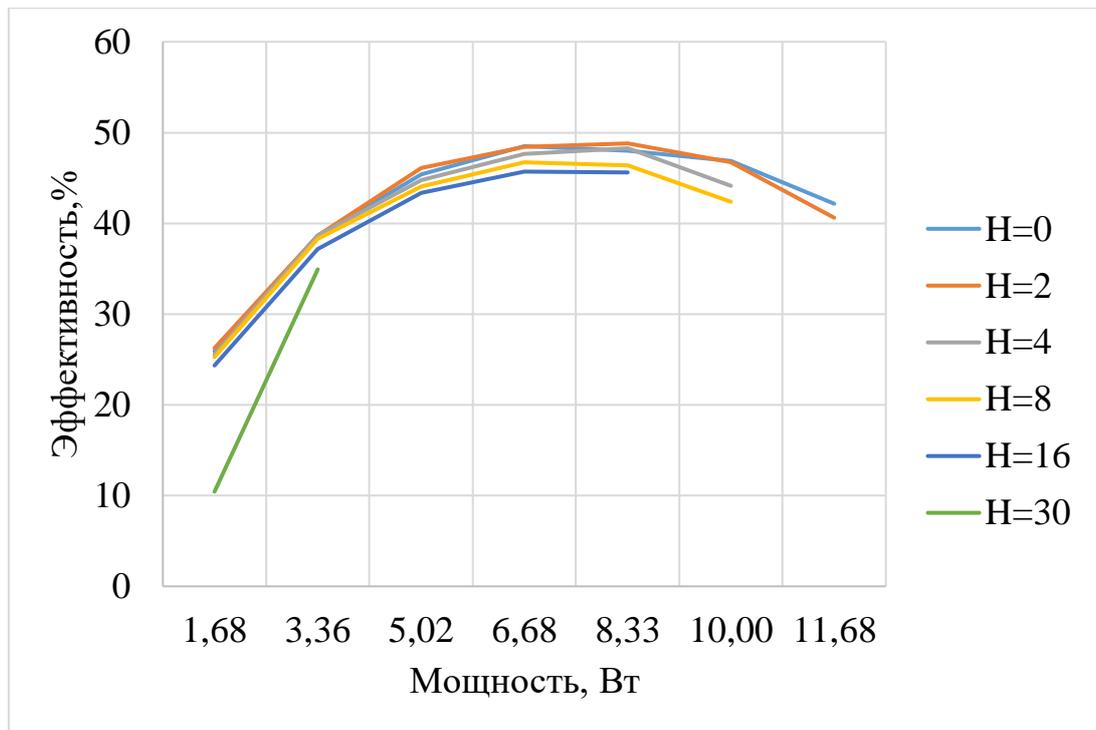


Рисунок 15. Зависимости эффективности работы системы от мощности нагрузки для различных смещений между катушками

При сравнении графиков на рисунках 14 и 15 можно сделать вывод, что осевые смещения между катушками влияют на передаваемую мощность и эффективность системы в меньшей степени чем расстояние между катушками. При осевом смещении между катушками равным приблизительно половине диаметра катушек максимальная передаваемая мощность падает в  $\sim 3.5$  раза.

Полученные из экспериментов данные в их первоначальном виде не дают возможности вычислять эффективность системы в зависимости от расстояния или смещений между катушками и передаваемой мощности для БСПЭ с другим размером контурных катушек. Для вывода уравнений зависимостей эффективности работы системы и передаваемой мощности от расстояния и смещений между катушками для БСПЭ необходимо выразить полученные результаты в относительных величинах и свести в таблицы.

Перевод экспериментальных данных в относительные единицы проведен следующим образом. Мощность нагрузки  $P_n$  соответствующая

некоторому значению эффективности  $\eta_n$  на расстоянии  $L_n$  или со смещением  $H_n$  переводится в относительное значение  $P_{rel(n)}$ :

$$P_{rel(n)} = \frac{P_n}{P_{max}}, \quad (18)$$

где  $P_{max}$  – максимальная мощность нагрузки БСПЭ.

Относительная эффективность  $\eta_{rel(n)}$  соответствующая  $P_{rel(n)}$  рассчитывается:

$$\eta_{rel(n)} = \frac{\eta_n}{\eta_{max}}, \quad (19)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальная эффективность БСПЭ.

Влияние параметров смещения и расстояния между катушками на рабочие параметры БСПЭ связано с размерами контурных катушек, таким образом необходимо также выразить эти параметры в относительных единицах. Для расстояния между катушками выражение имеет вид:

$$L_{rel(n)} = \frac{L_n}{D}, \quad (20)$$

где  $D$  – диаметр контурной катушки.

Формула будет иметь аналогичный вид для осевого смещения между катушками:

$$H_{rel(n)} = \frac{H_n}{D} \quad (21)$$

Результаты, полученные в выше проведенных экспериментах, по передаче энергии при изменяющемся расстоянии между катушками выраженные в относительных единицах сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость эффективности и передаваемой мощности от расстояния передачи энергии в относительных единицах

$L_{rel} = 0$		$L_{rel} = 0,08$		$L_{rel} = 0,16$		$L_{rel} = 0,24$		$L_{rel} = 0,32$		$L_{rel} = 0,40$	
$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$
0,14	0,53	0,14	0,52	0,14	0,51	0,14	0,48	0,14	0,47	0,14	0,47
0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,77	0,29	0,75	0,29	0,75	0,29	0,75

0,43	0,94	0,43	0,94	0,43	0,92	0,43	0,90	0,43	0,88	0,43	0,70
0,57	1,00	0,57	0,99	0,57	0,96	0,57	0,95				
0,71	0,99	0,71	1,00	0,71	0,96						
0,86	0,97	0,86	0,95	0,86	0,80						
1,00	0,87										

Приведенные в таблице данные с помощью пакета программ для решения задач вычислений были аппроксимированы степенным полиномом третьего порядка. К полученному уравнению поверхности добавлены ограничения на область допустимых значений переменных и получена следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} z = 0.1498 + 0.04462x + 3.14y - 2.147x^2 + 0.3625xy - 3.566y^2 + 3.982x^3 \\ \quad - 0.02121x^2y - 0.5439xy^2 + 1.15y^3 \\ y \leq 0.3906x^2 - 1.738x + 1.016 \\ x, y, z \in [0: 1] \end{array} \right. , (22)$$

где  $x = L_{rel}$ ,  $y = P_{rel}$ ,  $z = \eta_{rel}$ .

Визуальное представление поверхности построенной на основе системы уравнений (22) изображено на рисунке 16.

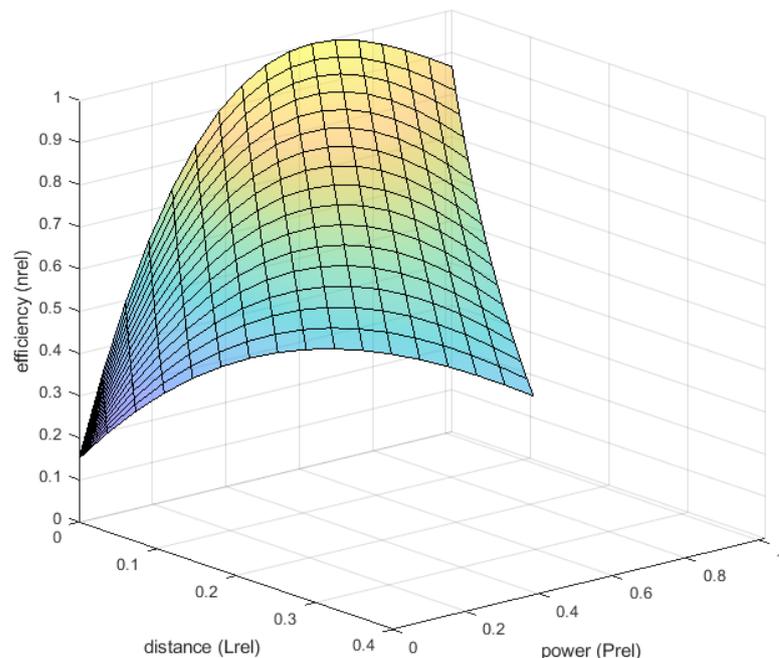


Рисунок 16. Зависимость эффективности работы системы от мощности нагрузки и расстояния между катушками

В соответствии с формулами (18), (19) и (21) исходные данные экспериментов при передаче энергии со смещением между катушками переведены в относительные единицы и представлены в табличном виде:

Таблица 4. Зависимость эффективности и передаваемой мощности от осевого смещения между катушками в относительных единицах

$H_{rel} = 0$		$H_{rel} = 0,03$		$H_{rel} = 0,06$		$H_{rel} = 0,13$		$H_{rel} = 0,26$		$H_{rel} = 0,48$	
$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$	$P_{rel}$	$\eta_{rel}$
0,14	0,53	0,14	0,54	0,14	0,53	0,14	0,52	0,14	0,50	0,14	0,22
0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,80	0,29	0,79	0,29	0,77	0,29	0,72
0,43	0,94	0,43	0,95	0,43	0,92	0,43	0,91	0,43	0,89		
0,57	1,00	0,57	1,00	0,57	0,98	0,57	0,96	0,57	0,94		
0,71	0,99	0,71	1,01	0,71	1,00	0,71	0,96	0,71	0,94		
0,86	0,97	0,86	0,96	0,86	0,91	0,86	0,87				
1,00	0,87	1,00	0,84								

Аналогично случаю для расстояния между катушками, проведена полиномиальная аппроксимация поверхности, полученной на основе данных при осевом смещении катушек. В результате полученный полином второго порядка дополнен ограничениями на область допустимых значений переменных и выведена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} z = 0.2402 - 0.1936x + 2.322y - 0.4821x^2 + 0.1042xy - 1.774y^2 \\ y \leq -1.342x^2 - 0.7919x + 1.03 \\ x, y, z \in [0; 1] \end{cases}, \quad (23)$$

где  $x = H_{rel}$ ,  $y = P_{rel}$ ,  $z = \eta_{rel}$ .

Визуальное представление поверхности построенной на основе системы уравнений (23) изображено на рисунке 17.

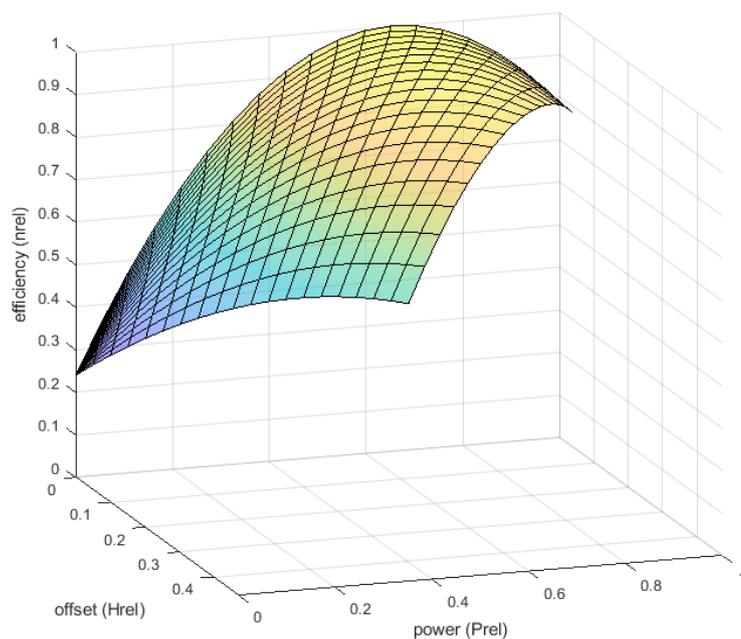


Рисунок 17 - Зависимость эффективности работы системы от мощности нагрузки и смещения между катушками

Сравнение поверхностей, полученных на основе приведенных в относительных единицах данных экспериментов, наглядно показывает большую зависимость эффективности и передаваемой мощности от расстояния передачи энергии чем от осевого смещения между катушками.

Выведенные системы уравнений позволяют вычислять эффективность передачи энергии в зависимости от мощности нагрузки и расстояния или смещения между катушками для систем беспроводной передачи энергии основанных на индуктивно связанных резонансных контурах. Использование алгоритмов, основанных на представленных системах уравнений при применении БСПЭ в составе АРС позволит выявить различного рода помехи при передаче энергии. Если расчетное значение эффективности системы ниже реально измеренной, то можно косвенно сделать вывод либо об ошибках в позиционировании АРС, либо о наличии посторонних предметов между приемной и передающей катушками. Так же возможно проводить предварительную оценку целесообразности передачи энергии между роботами или зарядной станцией и роботом при заданном взаимном

положении и принимать решение производить передачу энергии или продолжить позиционирование.

Актуальность задачи учета энергоресурсов в рое роботов основывается на принципе того, что энергоёмкость единичной робототехнической системы (РТС) — это конечный ресурс, который необходимо периодически восполнять [Обеспечение эффективного использования энергоресурсов в группе мобильных роботов<sup>1</sup> Богданов Д.Р., Даринцев О.В. Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа 2017, 96-99]. Учёт параметров энергетического запаса единичного агента, роя роботов и его распределение между объектами роя позволяет разработать эффективный алгоритм коллективного поведения при выполнении конкретной практической задачи за счёт достаточного ресурса энергии. Подходы к управлению группой роботов, обеспечивающие распределение энергии между агентами группы, могут обеспечить достижение поставленной цели при малом энергетическом запасе одного агента или при автономной работе в экстремальных условиях.

Требование по повышению автономности мобильных РТС накладывает существенные ограничения на их массогабаритные, динамические и базовые функциональные характеристики. Свойственные современным мобильным РТС высокие энергетические затраты и малая ёмкость бортовых источников питания считаются основной причиной, сдерживающей их массовое применение при явной эффективности. Одним из вариантов повышения автономности при групповом применении мобильных роботов может стать оптимальное распределение задач, поставленных перед группой, выполняемое с учетом начального заряда батареи, энергопотребления каждого робота и энергетической стоимости выполнения отдельных заданий. Синтез быстрых и эффективных алгоритмов распределения задач в гетерогенных группах роботов является сложной комбинаторной проблемой, тем не менее известны примеры достаточно эффективного решения близких по постановке задач с использованием эволюционных подходов на основе генетических алгоритмов [Даринцев, О.В. Система планирования движения группы мобильных

микророботов на основе генетических алгоритмов / О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 3. – С. 163–173]. В работе [О.В. Даринцев, А.Б. Мигранов, СИНТЕЗ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В КОЛЛЕКТИВЕ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ОБЩНОСТИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ XII МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ТОМ 2 2019 г 133-135 стр] рассматривается алгоритм оптимального распределения задач в гетерогенной группе мобильных роботов, основными критериями которого являются общий расход энергии коллектива и величины удельных затрат на выполнение отдельных задач. Предлагаемый алгоритм позволяет также эффективно решить многокритериальную оптимизационную задачу с учетом временных затрат (время, затраченное роботом на движение от исходного положения до места выполнения задачи) и интегрального критерия эффективности роботов, учитывающего энергетику и функциональную насыщенность каждого агента коллектива. В [СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ МИКРОРОБОТОВ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДАРИНЦЕВ О.В., МИГРАНОВ А.Б.] рассматривается генетический алгоритм для планирования оптимальных маршрутов для группы роботов в среде с препятствиями, обеспечивающий решение поставленной задачи в соответствии с наиболее часто задаваемыми критериями: минимальная длина маршрута, минимизация времени движения и т.д. Высокое быстродействие предлагаемого алгоритма позволяет находить решение в режиме реального времени, используя ресурсы только бортовых вычислительных устройств роботов. Также, в работе [Energy-Based Particle Swarm Optimization: Collective Energy Homeostasis in Social Autonomous Robots Xin Zhou ; David Kinny 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)] представлен алгоритм распределения задач в группе роботов, в целях выравнивания энергетической нагрузки. Неравномерное распределение энергии в рое роботов, выполняющих миссию, может помешать завершению миссии группы

или снизить ее устойчивость к динамическим изменениям среды, которые происходят во время выполнения миссии. Цель эффективного управления использованием энергии в рое известна как гомеостаз коллективной энергии (collective energy homeostasis). В то время как многие работы были в основном сосредоточены на достижении этой цели с помощью методов прямого энергообмена (например, с использованием механизмов зарядки аккумуляторов), в данной статье представлен новый биоинспирированный (bio-inspired) подход к поддержанию коллективного энергетического гомеостаза в роях роботов. Этот подход расширяет методы оптимизации роя частиц (PSO) для выбора задач и планирования движения для отдельных роботов, делая их чувствительными к энергетическому состоянию робота. Общий эффект этого алгоритма PSO на основе энергии (EPSO) заключается в смещении энергии задачи по отношению к роботам в рою, которые имеют более высокий уровень энергии, то есть выравнивание энергетической нагрузки. Это можно рассматривать как форму косвенного обмена энергией путем перераспределения задач. Экспериментальные результаты показывают, что алгоритм EPSO позволяет рою роботов поддерживать коллективный энергетический гомеостаз более эффективно, чем другие подходы, уменьшая дисперсию энергии между единичными роботами на 49% и увеличивая количество миссий, которые может выполнить рой при фиксированной начальной энергии.

Помимо распределения задач между агентами группы, существует задача планирования траекторий для РТС с избеганием столкновений с препятствиями. Для планирования траекторий группы РС нередко используют алгоритмы, основанные на нейросетевых моделях [Howard Li ; Simon X. Yang Neural-Network-Based Path Planning for a Multirobot System With Moving Obstacles // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) ( Volume: 39 , Issue: 4 , July 2009) [S.X. Yang, M. Meng Neural network approaches to dynamic collision-free trajectory generation//IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 31 (2001), pp. 302-318]. В частности,

предложенный в работе [ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ПОСТРОЕННАЯ НА СЕТИ ХОПФИЛДА Юдинцев Б.С., Даринцев О.В.] алгоритм планирования на базе нейронной сети Хопфилда (метод «нейронных карт») имеет следующие преимущества: высокая производительность, которая характеризуется быстрой обработкой рабочего пространства за счет особенностей топологии и активационной динамики нейронной сети; гибкость применения, которая обеспечивается четким разделением всего процесса решения задачи позиционирования на два основных этапа: представление рабочего пространства (формирование нейронной карты) и расчет пути, что позволяет синтезировать на базе данного метода алгоритм управления группой мобильных роботов. Однако, в рамках работы не было приведено результатов использования данного подхода в контексте минимизации траекторий движения РС или минимизации общего времени перемещения в целевые позиции всех участников роя. Классическими методами планирования траекторий являются методы, в которых пространство конфигураций представлено в виде графа, а планирование пути происходит путём поиска пути на графе [Meng Wang, Liu J.N.K. Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends // Robotics and Autonomous Systems. 2008]. На основе такого метода были разработаны популярные алгоритмы поиска на графе, такие как A\*, D\*, Theta, алгоритм Дейкстры и Jump Point Search [Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. № 01. С. 15–58]. Из всех методов планирования пути, данные методы являются наиболее оптимальным с точки зрения вычислительной сложности и оптимальности получаемых траекторий по выбранному критерию. А предложенные выше алгоритмы поиска пути на графе поддаются модификациям для решения поставленной задачи с ограничивающими условиями.

Алгоритм управления группой АРС должен соответствовать следующим требованиям:

1. масштабируемость (т.е. эффективно работать при любом количестве агентов в рое);
2. децентрализованность;
3. учёт расхода энергии на перемещение роботов, т.е. построенные траектории перемещения должны быть оптимальными по энергозатратам и времени;
4. высокое быстродействие (способность принимать решения) в средах со статическими и динамическими препятствиями;
5. учёт ограничений, накладываемых на процесс передачи энергии;
6. включение модулей распределения целей и задач, построения траекторий, сглаживание траекторий, обход препятствий, перестроение траектории при наличии динамического препятствия.

Опишем поставленную задачу: имеется гомогенный рой роботов. Каждый агент роя оснащён БСПЭ. Обозначим через  $T$  – множество целевых точек,  $S$  – множество стартовых точек,  $N$  – множество агентов в рое,  $e_{task}$  – энергия для выполнения задачи в целевой точке,  $e_{transfer}$  – количество энергии, которое передаёт один агент другому,  $e_l$  – количество энергии, затрачиваемое на единичное перемещение агента,  $e_{max}$  – максимальный энергетический потенциал одного агента роя,  $t_l$  – время затрачиваемое на единичное перемещение.

Примем следующие условия:

1.  $\eta$  – эффективность передачи энергии одинакова для всех агентов роя
2. Агент роя представлен в виде точки
3. Агент начинает движение к цели только тогда, когда текущий энергетический потенциал  $e_p = e_{max}$  (На начальный момент времени  $t = 0$  текущий энергетический потенциал агента  $e_p = e_{max}$ )

Требуется найти число агентов в рое, необходимое для выполнения задач во всех целевых точках  $T$ , при этом время, затрачиваемое на выполнение этих

задач  $\tau_{\text{общ}}$  с учётом времени на перемещение к целевым точкам и пополнения энергии (выполнение миссии) стремится к минимальному (Оптимизация параметра времени)

Для решения поставленной задачи обозначим  $n_i$  как функциональный агент роя, соответственно множеством агентов роя считается:  $n_i \in N = \{n_1 \dots n_m\}$ , где  $N$  – множество агентов роя, к которому принадлежит  $n_i$ . Обозначим через  $s_i$  стартовую позицию, где находится агент роя в начальный момент времени, соответственно множеством таких позиций:  $s_i \in S = \{s_1 \dots s_m\}$ , где  $S$  – множество стартовых позиций, к которому принадлежит стартовая позиция  $s_i$ . Обозначим через  $t_j$  целевую позицию, где находится выполняемая задача (task), соответственно множеством таких позиций:  $t_j \in T = \{t_1 \dots t_a\}$ , где  $T$  – множество целевых позиций, к которому принадлежит целевая позиция  $t_j$ .

При помощи алгоритма поиска кратчайшего пути, а именно Theta\* [Kenny Daniel Theta\*: Any-Angle Path Planning on Grids, Journal of Artificial Intelligence Research 39 (2010)], находится путь  $n_i$  агента роя от  $s_i$  до  $t_j$ . Найденный путь представлен в виде массива координат точек, через которые он проходит:  $P_i = [x_1 y_1 \dots x_b y_b]$ , при этом расстояние между соседними точками одинаково и принимается за единичное перемещение -  $l_i$ , на которое агент расходует количество энергии  $e_l$  и время  $t_l$ . В таком случае полная длина пути  $L_i$  агента  $n_i$  равна сумме единичных перемещений, количество энергии затрачиваемое на весь путь  $e_L = e_l \cdot L_i$ , а время необходимое на весь путь :

$$T_{Li} = \frac{e_L}{t_l} . \quad (24)$$

Общее время выполнения миссии  $n_i$  агента в точке  $t_j$  можно представить, как сумму времени, необходимого на путь агента  $n_i$  до точки  $t_j$ , времени на выполнение задачи  $t_{\text{task}}$  и времени, затрачиваемое на передачу энергии  $t_e$ , которое включает время ожидания:

$$\tau_{\text{общ}} = T_{Li} + t_{\text{task}} + t_e . \quad (25)$$

Соответственно общая энергия для  $n_i$  агента, необходимая для выполнения миссии складывается из энергии для выполнения задачи в точке  $t_j$  -  $e_{task}$  и энергии на перемещение этого агента  $e_L$ :

$$e_{\tau} = e_{task} + e_L. \quad (26)$$

Пусть  $e_{pi}$  - текущий энергетический потенциал агента  $n_i$  на момент старта будет равен максимальному энергетическому потенциалу агента -  $e_{maxi}$ . Тогда если  $e_{pi} \geq e_{\tau}$ , то миссию возможно завершить используя только одного агента роя. Если  $e_{pi} < e_{\tau}$ , то агент  $n_i$  не может выполнить миссию один, так как ему необходимо пополнить свой запас энергии для успешного завершения миссии.

- Если  $e_{pi} = e_L$ , то промежуточная точка пополнения энергии для агента  $n_i$  является целевой точкой  $t_i$ . Промежуточной точкой пополнения энергии агента  $n_i$  другими агентами является такая точка, где запас текущего энергетического потенциала агента  $n_i$  полностью исчерпан и равняется 0.
- Если  $e_{pi} < e_L$ , то создаётся множество промежуточных точек.

Множество промежуточных точек пополнения запаса энергии агента  $n_i$  можно представить в виде :  $R = \{r_1 \dots r_k\}$ , где  $r_i$  – точка, в которой запас текущего энергетического потенциала агента  $n_i$  полностью исчерпан. Соответственно, в точке  $r_i$  происходит пополнение запаса энергии агента  $n_i$  так, что его энергетический потенциал становится равным  $e_{maxi}$ .

В таком случае, энергия агентов, передающаяся агенту  $n_i$  в точке  $r_i$  равняется  $e_{task}'$ . Другими словами: множество целевых точек для агентов, пополняющих запас энергии,  $T' = \{t'_1 \dots t'_j\}$  является множеством точек пополнения энергетического запаса  $R = \{r_1 \dots r_k\}$  для агента  $n_i$ .

Соответственно существуют ограничения такой модели: Энергия, затрачиваемая на преодоление расстояния между агентами роя строго меньше максимального энергетического потенциала одного агента.

Если текущая энергия агента больше  $e_\tau$  то возможен возврат агента на начальную позицию. В случае возврата агента  $n_i$  на начальную позицию  $s_i$ , в уравнении (26) удваивается энергия на перемещение агента  $e_L$ .

Рассмотрим все возможные ситуации пополнения энергии одного агента из группы  $N$  роботов.

Условия:

- Количество каналов передачи энергии  $k = 2$ ;
- Единичная энергия на перемещение равна единичной энергии, передающейся от одного робота другому  $e_l = e_{transfer}$ ;
- Время, затраченное на единичное перемещение, равно времени, затраченному на единичную передачу энергии  $t_l = t_e$ ;
- Полный запас энергии равен сумме 10 единичным энергиям или  $e_{max i} = 10 * e_l$ , так как значение параметра единичной энергии не меняется при решении задачи.
- Роботы для пополнения энергии начинают движение в один момент времени.

Представим, что единичная энергия представлена в виде одной ячейки, а максимальный энергетический запас агента равен 10 таким ячейкам (рисунок 18).

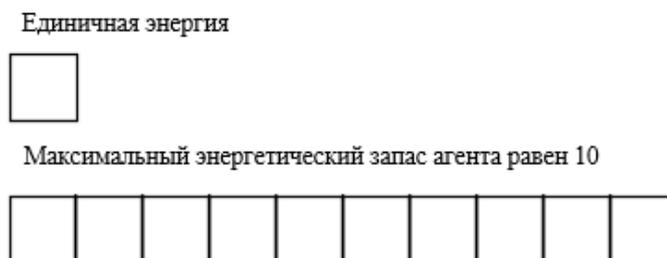


Рисунок 18 – Представление единичной и максимальной энергии агента

Таймер, отсчитывающий время пополнения энергии робота  $n_i$  до максимального уровня начинает свой отсчёт в момент времени  $t_0$ .

Роботы, выполняющие задачу пополнения запаса энергии робота  $n_i$ , начинают движение в момент времени  $t_0$ . Так как, единичная энергия на

перемещение равно единичной энергии, передающейся от одного робота другому, то, зная расстояние от робота  $n_i$  до ближайших роботов группы, можно определить необходимое количество роботов для пополнения запаса энергии робота  $n_i$ . Минимальное количество роботов для пополнения запаса энергии робота  $n_i$  равно 2. Роботы начинают движение одновременно.

Рассмотрим следующие частные случаи, при условии, что у робота  $n_i$  два канала передачи энергии ( $k = 2$ ).

**Случай 1:** Пусть робот 1 и робот 2 являются роботами пополнения запаса энергии робота  $n$  (рисунок 19,а). Допустим, что робот 1 двигался по направлению к роботу  $n$  и затратил на это  $x$  единиц энергии, а робот 2 затратил на перемещение  $y$  единиц энергии. После перемещения к роботу  $n$  сумма их остатков запасов энергии больше или равна  $e_{max}$ . Тогда их временные диаграммы будут выглядеть следующим образом (рисунок 19,б):

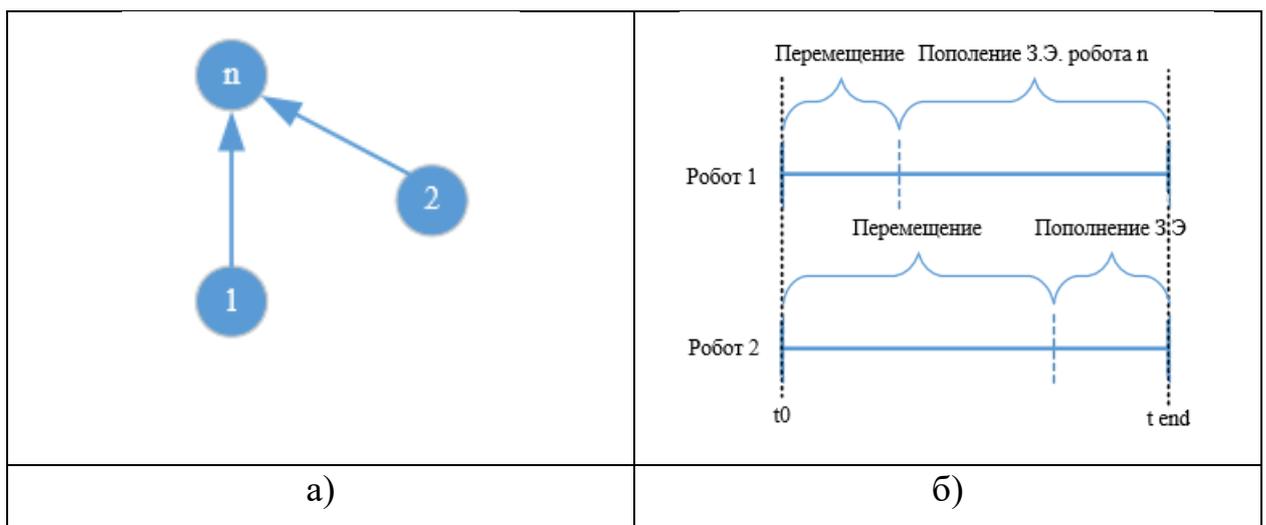


Рисунок 19. Случай 1: а) представление случая 1, б) временные диаграммы в случае 1.

В момент присоединения робота 2, задача пополнения запаса энергии робота  $n$  распределяется между роботом 1 и роботом 2 таким образом, чтобы процесс пополнения энергии окончился в единый момент  $t_{end}$ . Тогда время пополнения запаса энергии робота  $n$  будет равняться значению времени  $t_{end}$ .

**Случай 2:** Пусть робот 1, робот 2 и робот 3 являются роботами пополнения запаса энергии робота  $n$  (рисунок 20,а). Допустим, что робот 1 двигался по направлению к роботу  $n$  и затратил на это  $x$  единиц энергии, робот

2 затратил на перемещение  $y$  единиц энергии, робот 3 –  $z$  единиц. После перемещения к роботу  $n$  сумма их остатков запасов энергии больше или равна  $e_{max}$ . Тогда их временные диаграммы будут выглядеть следующим образом (рисунок 20,б):

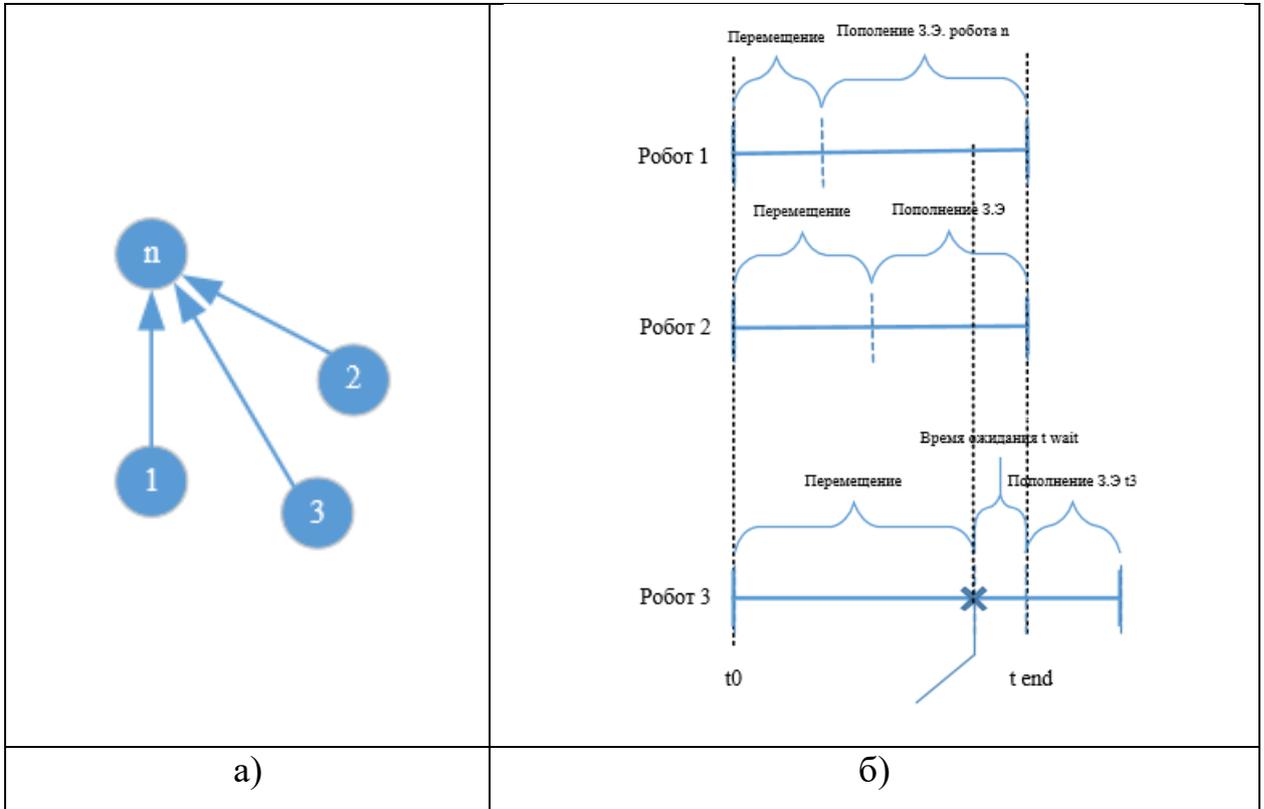


Рисунок 20. Случай 2: а) представление случая 2, б) временные диаграммы в случае 2.

В момент времени помеченный «X» робот 3 уже прибыл на место выполнения задания, но канал передачи энергии занят.

В момент присоединения робота 2, задача пополнения запаса энергии робота  $n$  распределяется между роботом 1 и роботом 2 таким образом, чтобы процесс пополнения энергии окончился в единый момент  $t_{end}$ . Если пополнение энергии роботом 1 и роботом 2 не окончилось к моменту прибытия робота 3, то робот 3 входит в режим ожидания свободного канала передачи энергии. Тогда время пополнения запаса энергии робота  $n$  будет равняться значению времени выполнения задачи роботом 3 или  $t_{end} + t_3$ , где  $t_3$  время пополнения запаса энергии роботом 3.

**Рассмотрим частный случай:** Пусть для пополнения запаса энергии робота  $n$  необходимо 10 роботов (рисунок 21,а). Это возможно, когда все роботы достаточно далеко от робота  $n$ , поэтому каждый из этих агентов может передать не более 1 единицы энергии. После перемещения к роботу  $n$  сумма остатков запасов энергии всех агентов больше или равна  $e_{max}$ . Тогда временные диаграммы будут выглядеть следующим образом (рисунок 21, б):

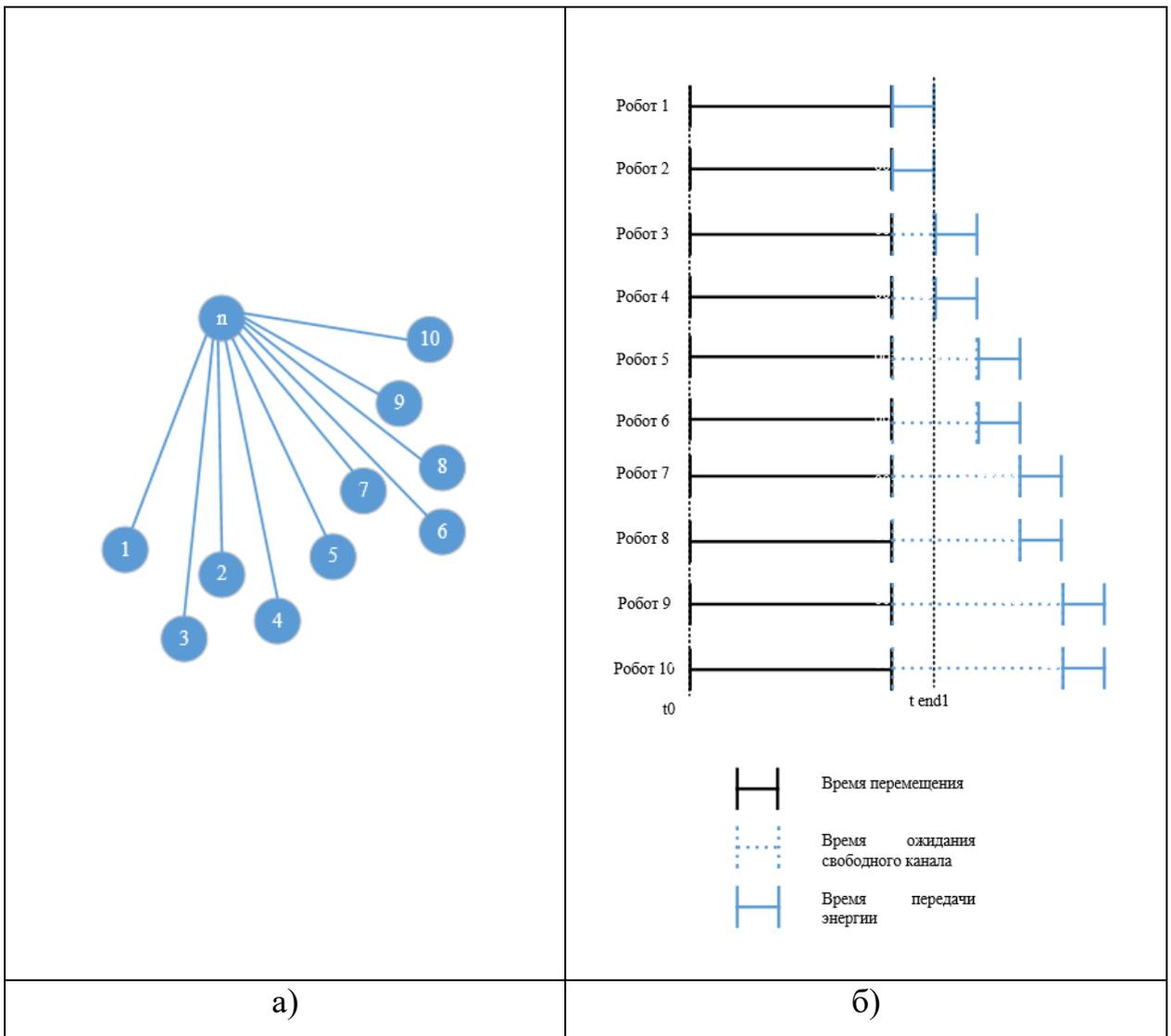


Рисунок 21. Случай 3: а) представление случая 3, б) временные диаграммы в случае 3.

В момент присоединения робота 2, задача пополнения запаса энергии робота  $n$  распределяется между роботом 1 и роботом 2 таким образом, чтобы процесс пополнения энергии окончился в единый момент  $t_{end1}$ . Если пополнение энергии роботом 1 и роботом 2 не окончилось к моменту

прибытия роботов 3 и 4, то роботы 3 и 4 входят в режим ожидания свободного канала передачи энергии. И так для каждой пары роботов. Тогда время пополнения запаса энергии робота  $n$  будет равняться значению времени выполнения задачи последней парой роботов с наибольшим ожиданием.

Основываясь на п.2, запланированных ранее задач по проекту на 2020 год был разработан обобщённый алгоритм навигации группы автономных РТС с учётом энергетических ресурсов агентов (рисунок 22).



Рисунок 22. Алгоритм навигации группы АРС

Блок схема обобщённого алгоритма навигации группы АРС содержит основные этапы решения поставленной задачи. После инициализации множества целевых позиций  $T$ , множества стартовых позиций  $S$  и множества агентов роя  $N$  следует алгоритм распределения конечных координат между

агентами роя, который является основным, так как содержащиеся в нём модули распределения конечных координат и планирования траекторий непосредственно влияют на конечное время решения задачи. Также нам известны значения энергии, необходимой для выполнения задания в целевых позициях. Энергии для выполнения задачи в одной целевой точке обозначим  $e_{task}$ . Предлагаемый алгоритм распределения целей представлен на рисунке 23. Выходными данными алгоритма распределения является массив соответствия каждому роботу роя его конечной координаты. Отметим, что конечная координата может являться целевой позицией для выполнения задания и точкой пополнения запаса энергии. Также стоит упомянуть, что конечное число роботов для выполнения всей миссии не известно, но известно, что при инициализации  $N = T$ . Необходимо найти конечное количество роботов для выполнения миссии. Задача предотвращения коллизий между роботами и между препятствиями можно решать существующими методами, такими как Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) [Van Den Berg, J., Guy, S.J., Lin, M., Manocha, D.: Reciprocal n-body collision avoidance. In: Pradaliere, C., Siegwart, R., Hirzinger, G. (eds.) Robotics Research, vol. 70, pp. 3–19. Springer, Heidelberg (2011)], гистограммы векторного поля [Borenstein, J., Koren, Y.: The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. IEEE Journal of Robotics and Automation 7(3), 278–288 (1991)], Velocity obstacles (VO) [Fiorini, P., Shiller, Z.: Motion planning in dynamic environments using Velocity Obstacles. Int. Journal of Robotics Research 17(7), 760–772 (1998)], Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) [Guy, S., Chhugani, J., Kim, C., Satish, N., Dubey, P., Lin, M., Manocha, D.: Highly parallel collision avoidance for multi-agent simulation. In: ACM Symposium on Computer Animation (2009)] или подобными. Алгоритм обхода препятствий Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) был произведен и описан в [J. van den Berg, M. Lin, and D. Manocha. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation] и [D. Cherry. Rvo collision avoidance in unity 3d]. Это подход, основанный на скорости [P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic

environment using velocity obstacles], в котором скорости каждого агента используются для прогнозирования будущего положения агента. Предполагается, что скорость агента сильно не меняется. Метод RVO отличается от предыдущих методов, основанных на скорости, тем, что алгоритм предполагает, что каждая пара агентов избегает столкновения друг с другом вместо того, чтобы рассматривать других агентов как движущиеся препятствия. Такой подход делает движение агентов более плавным. Для решения поставленной задачи воспользуемся алгоритмом RVO, так как такой алгоритм обеспечивает безколлизийное перемещение агентов группы и обход препятствий. RVO современный алгоритм, который не требует высоких вычислительных ресурсов [Martin Funkquist Simulating Group Formations Using RVO, 2016]. Чтобы избежать тупиков (deadlock), необходимо встроить алгоритм мультиагентного планирования пути (multi-agent path finding - MAPF) в систему навигации с целью построения набора локально скоординированных путей без конфликтов. Когда агент обнаруживает ситуацию, которая приводит к потенциальному тупику, он переключается в режим согласованного планирования пути и заставляет своих соседних агентов перейти в такой же режим. При переключении в режим согласования, вовлеченные агенты, создают совместный бесконфликтный план и исполняют его. После данного действия они вернуться в режим независимого выполнения задания.

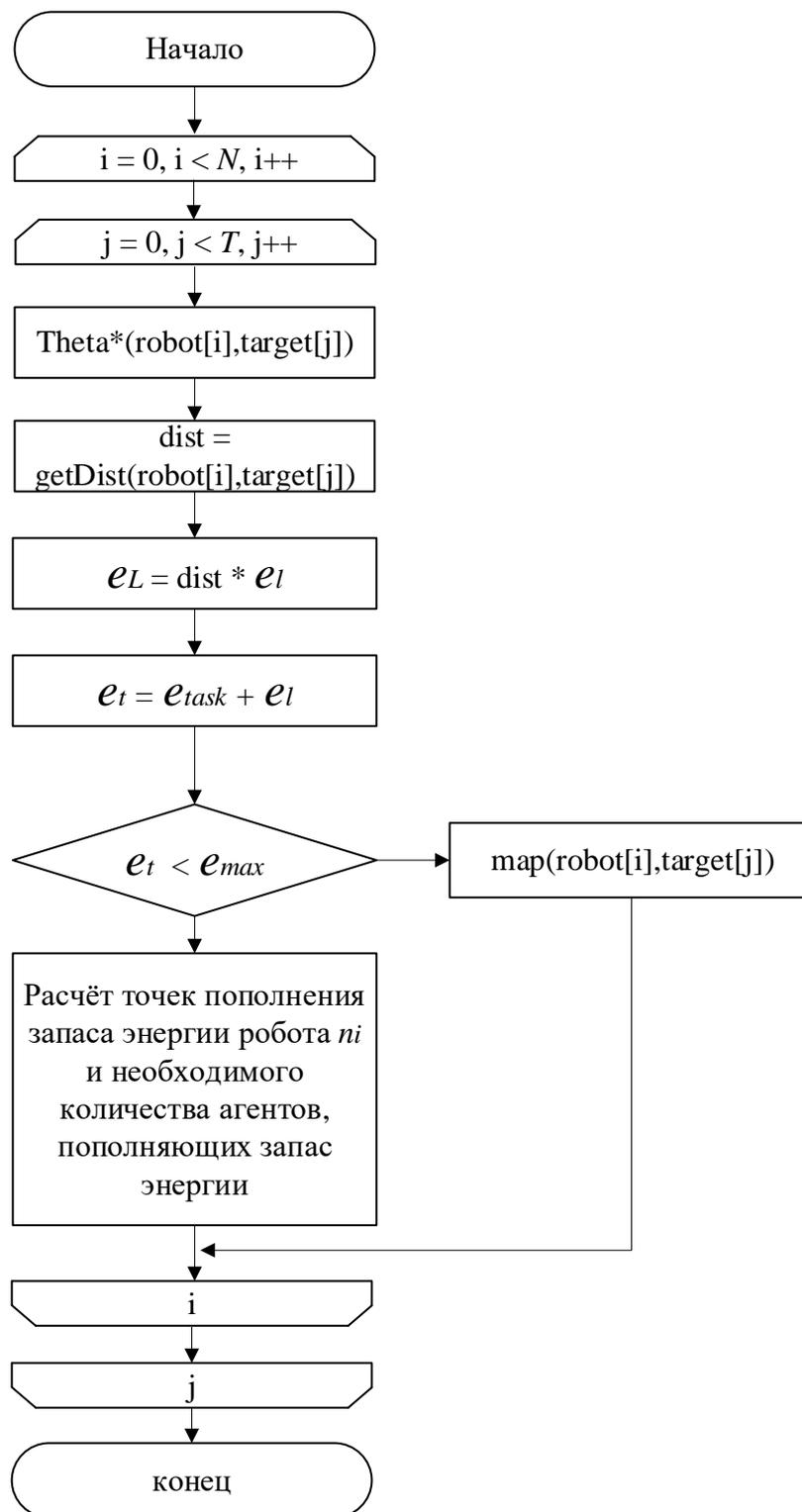


Рисунок 23. Алгоритм распределения конечных координат между группой APC

Для планирования наикратчайшего пути предлагается использовать базовый алгоритм Theta \* [Nash, A., Daniel, K., Koenig, S., & Felner, A. (2007). Theta\*: Any-angle path planning on grids. In Proceedings of the AAAI Conference

on Artificial Intelligence, pp. 1177–1183.] Он сочетает в себе идеи, лежащие в основе  $A^*$  на графах видимости, где изменения направления происходят только в углах заблокированных ячеек, и  $A^*$  на сетках, где количество ребер растёт только линейно по количеству ячеек. Пути, спланированные Theta\*, длиннее, чем истинные кратчайшие пути, найденные при помощи  $A^*$  на графах видимости, но он быстрее, чем  $A^*$  на графах видимости, что и делает его похожим на  $A^*$  на сетках. Ключевое различие между Theta\* и  $A^*$  на сетках состоит в том, что при использовании Theta\* родительская вершина может быть любой вершиной, в то время как родительская вершина при использовании  $A^*$  должен быть соседней вершиной.

Для назначения целевых позиций группе роботов воспользуемся алгоритмом распределения конечных координат между группой APC (рисунок 23), где каждому роботу назначается цель, перемещение до которой требует наименьших энергетических затрат. На вход алгоритма поступают данные о местонахождении роботов и целей. Функция  $\text{Theta}^*(\text{robot}, \text{target})$  возвращает массив координат, соответствующий спланированной траектории от стартовой позиции до целевой. Для каждого робота при помощи функции  $\text{getDist}$  рассчитывается и возвращается длина пути между  $\text{robot}$  и  $\text{target}$ . Далее рассчитывается затрачиваемое количество энергии для выполнения миссии, которая складывается из энергии для выполнения задачи в конечной точке  $e_{\text{task}}$  и энергии на перемещение этого агента  $e_L$ . После этого полученное значение сравнивается с максимальным допустимым запасом энергии агента  $e_{\text{max}}$ . Если условие выполняется, то текущая конечная координата назначается текущему роботу и это конечная координата удаляется из списка координат. Если спланированный путь потребует большее количество энергии, чем максимальное допустимое значение энергии агента, то необходимо рассчитать точки пополнения запаса энергии для агента, движущегося к цели. Подробнее алгоритм расчёта таких точек представлен на рисунке 24.

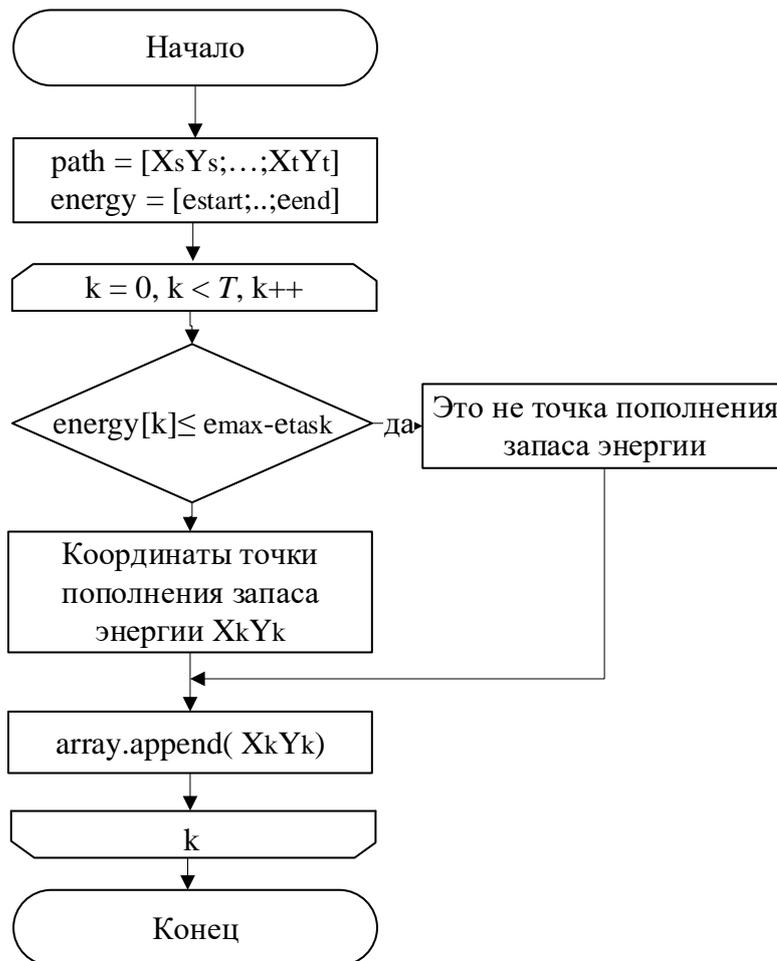


Рисунок 24. Алгоритм расчёта точек пополнения запаса энергии

На вход алгоритма поступает начальная координата робота, координата назначенной ему целевой позиции и его спланированный путь. Каждой точке, описанной координатами  $X_k Y_k$ , соответствует значение энергии, затраченное для перемещения до этой точки, так как расстояние между соседними точками одинаково и принимается за единичное перемещение -  $l_i$ , на которое агент расходует известное количество энергии  $e_i$ . В каждой точке сравнивается энергия, затраченная на перемещение до неё, с разницей между максимальным энергетическим потенциалом агента и энергетическим потенциалом, необходимым для выполнения задания в конечной точке. Выходные данные представляют собой массив, содержащий координаты точки подзарядки на пути для одного агента. Соответственно, можно узнать необходимое количество роботов, которые будут передавать энергию роботу  $n_i$  в этих точках. Координаты точек пополнения энергии являются конечными позициями роботов, передающих энергию. Планирование пути таких роботов

и распределение их конечных позиций определяется обобщённым алгоритмом навигации APC.

В 2020 году разработан прототип двунаправленной системы беспроводной передачи энергии, получены его характеристики и рабочие ограничения. Последующая обработка экспериментальных результатов позволила вывести системы уравнений, которые связывают параметры передаваемой мощности и эффективности работы системы в зависимости от расстояния или осевого смещения между катушками. Представленные системы уравнений необходимы системе управления роем роботов для определения актуальности передачи энергии между агентами при достигнутом взаимном положении агентов. Данная информация позволит эффективно распределять энергетические ресурсы в рое роботов посредством двунаправленной системы беспроводной передачи энергии. С использованием ранее разработанной математической модели [Krestovnikov, K., Cherskikh, E., & Ronzhin, A. (2020). Mathematical Model of a Swarm Robotic System with Wireless Bi-directional Energy Transfer. In *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms* (pp. 13-23). Springer, Cham.] были рассмотрены различные случаи перераспределения энергии между агентами роя при выполнении задачи. На основе математической модели, выведенных дополнительных условий и ограничений разработан обобщённый алгоритм навигации группы автономных РТС с учётом энергетических ресурсов агентов, который включает в себя алгоритм распределения конечных координат между группой APC и алгоритм расчёта точек пополнения запаса энергии.