

Распределенная система станций подзарядки для энергообеспечения группы БпЛА мультикоптерного типа^{*}

В.А. КОСТЮКОВ^a, М.Ю. БУТЕНКО^b, В.Г. ГИСЦОВ^c, И.Д. ЕВДОКИМОВ^d

347900, РФ, г. Таганрог, ул. Социалистическая, 154, АО НКБ робототехники и систем управления

^a wkost-einheit@yandex.ru ^b maximusad1996@gmail.com

^c vladgistsov@mail.ru ^d igor.ezio2000@yandex.ru

В настоящее время наблюдается рост использования групп автономных беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) для выполнения различных миссий. В связи с этим возникает проблема оптимизации энергетического обеспечения такой группы. Данная проблема сопряжена с двумя основными задачами. Во-первых, энергоснабжение группы должно позволять ей выполнять миссию с заданным качеством и процентом успешности. Во-вторых, должно способствовать экономии энергоресурсов, затрачиваемых для снабжения такой группы.

В настоящей статье развивается новый подход обеспечения энергосбережения группы БпЛА за счет использования распределенной системы модулей станций подзарядки, с перестраиваемой структурой, обеспечивающей необходимую универсальность в обслуживании разных типов аппаратов. Предполагается, что модули подзарядки установлены на подмножестве станций обслуживания, между которыми курсируют БпЛА мультикоптерного типа. Необходимо выработать и обосновать функционал качества выполнения миссии группой, провести исследование функционирования группы БпЛА для различных количеств модулей подзарядки и их распределений по множеству всех станций, оценить соответствующие значения указанного функционала качества и далее решить оптимизационные задачи по нахождению распределений, доставляющих максимум функционалу для каждого числа модулей.

В статье предлагается в качестве такого функционала отношение общего числа БпЛА, успешно отработавших выданные им задания по развозу грузов в течение определенного числа однотипных миссий, к полному числу вылетов всех БпЛА в течение этих миссий.

Модель движения БпЛА между пунктами назначения предполагает учет не только крейсерского режима, но и маневрирования аппарата при взлете и посадке; также учитывается зависимость скорости расходования энергии от текущих кинематических величин аппарата. Предусмотрено падение аппарата в случае расходования им энергии ниже предельного порогового

^{*} Статья получена 06 декабря 2023 г.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00370 «Исследование путей и методов оптимизации систем управления неоднородных робототехнических комплексов по критерию энергоэффективности», <https://rscf.ru/project/22-29-00370/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

значения. Разработана упрощенная модель станции обслуживания с модулем подзарядки, подразумевающим замену разряженных аккумуляторных батарей. Учен режим ожидания БпЛА в очереди.

Для подбора и оптимизации подходящей структуры и состава распределенной системы модулей подзарядки для выполнения типовых миссий группой БпЛА с заданным критерием качества создано и апробировано программное обеспечение на базе среды Unity. Адаптивность последнего позволяет исследовать различные распределения станций подзарядки для разных исходных технических условий функционирования группы БпЛА.

Ключевые слова: БпЛА, модуль подзарядки, автоматизация, энергетическая эффективность функционирования, критерий качества выполнения миссии, оптимизация, Unity

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом объемов использования групп автономных БпЛА в различных природных и инфраструктурных условиях решение проблемы оптимизации функционирования таких групп по ряду критериев является актуальной научной задачей. Среди таких критериев одним из наиболее важных является стоимость обслуживания такой группы с учетом необходимости обеспечения периодической подзарядки каждого ее элемента. Очевидно, что направление развития в сторону автономности указанного обслуживания является востребованным для целого ряда практических приложений, особенно в тех случаях, когда число БпЛА группы значительно, а выполняемая ею миссия периодически повторяется на регулярной основе.

Одним из важных аспектов решения этой проблемы является разработка комплексной, распределенной системы подзарядки БпЛА. Эта система на нижнем уровне включает модули подзарядки, которые могут быть установлены на станции обслуживания БпЛА, а также могут устанавливаться независимо от этих станций. На верхнем уровне такой системой модулей подзарядки может управлять оператор. Для разработки технических характеристик таких модулей и определения оптимальных их числа и пространственного распределения по области покрытия группой БпЛА необходимо учитывать характер выполняемой миссии, технические характеристики БпЛА группы, а также требование минимальности отношения «цена / качество» для всей системы «группа БпЛА + станции обслуживания + модули подзарядки» в целом.

Разработка перспективной станции подзарядки (СП) должна соответствовать выбору оптимальных способов и конструкции устройств для приземления БпЛА данного типа, а также для его позиционирования в определенной области стыковочной площадки с заданной точностью для последующей подзарядки. Для повышения точности автоматического приземления БпЛА мультикоптерного типа на платформу последняя может быть снабжена специальными опознавательными знаками-маркерами. В этом случае БпЛА должен быть снабжен специальным программно-аппаратным обеспечением для ориентации по указанным маркерам в условиях разной видимости [1, 2].

Система ориентирования по маркерам может быть дополнена специальными углублениями на стыковочной площадке по числу опор аппарата [3, 4], куда последние соскальзывают. Однако в этом случае возможны застревания

стоек аппарата в областях этих углублений в случае их засорения или увеличения силы трения поверхности углублений о соприкасающиеся части стоек аппарата. Поэтому более перспективным является, с нашей точки зрения, специальная реечная система доводки БпЛА до области подзарядки [5, 6], поскольку она подразумевает механическое воздействие на стойки аппарата и преодоление возможных противодействующих сил мощностью соответствующего привода.

В патенте [7] рассматриваются основные способы контактной подзарядки БпЛА и соответствующие облики СП, однако не проведен соответствующий сравнительный анализ. В патенте [8] рассматривается возможный способ замены разряженных аккумуляторных батарей, а в работах [9, 10] – способы подзарядки аккумуляторной батареи (АКБ) на борту с помощью специальных проводящих устройств. В работе [11] рассматривается возможная реализация системы бесконтактной подзарядки на основе микрополосковых структур.

Заметим, что в условиях большой по численности группы БпЛА и ограничений на время выполнения миссии подзарядка элементов группы должна занимать как можно меньшее время, что возможно в большинстве случаев только при восполнении энергии способом замены разряженных аккумуляторных батарей.

С другой стороны, решение указанной проблемы энергосбережения должно подразумевать уровень планирования и реализации взаимодействия в целом между группой БпЛА и группой СП, а также между элементами внутри каждой из этих групп, затрагивать вопросы оптимального взаимодействия, в том числе по энергетическому критерию, учитывающего особенности реализуемой группой БпЛА миссии, ограничения каналов связи, а также, возможно, опыт такой реализации в прошлом [12].

Наконец, вопрос энергетического обеспечения самой СП должен решаться исходя из природных условий функционирования СП, группы БпЛА, особенностей ее миссии, по сути – на основании степени доступности централизованного энергоснабжения. Если последнее применять дорого, неэффективно или невозможно, то целесообразно использовать ветроэнергетические установки (ВЭУ) совместно с солнечными панелями [12].

В работе [13] рассматривается диалоговая модель взаимодействия станции подзарядки с БпЛА группы, позволяющая обеспечить безопасную и надежную покупку энергии у станции для БпЛА. В работе [14] решается задача максимизации времени функционирования каждого БпЛА группы на основе решения соответствующей задачи коммивояжера. В статье [15] рассматривается модель взаимодействия между БпЛА и СП, учитывающая предысторию процесса этого взаимодействия и возможность использования возобновляемых источников энергии на станциях подзарядки.

Рассмотренные работы затрагивают разные аспекты проблемы обеспечения энергосбережения группы БпЛА и показывают практическую важность и актуальность такой разработки.

В настоящей статье развивается новый подход обеспечения энергосбережения группы БпЛА за счет использования распределенной системы модулей подзарядки БпЛА, обеспечивающих необходимую универсальность в обслуживании разных типов аппаратов. Предполагается, что модули подзарядки

установлены на подмножестве станций обслуживания, между которыми курсируют БпЛА мультикоптерного типа, выполняя миссию по развозу грузов. Требуется определить такие число и непосредственно указанное подмножество станций обслуживания, снабженных такими модулями, которые бы доставляли оптимум некоторого функционала качества, характеризующего функционирование группы БпЛА. В качестве такого функционала предлагается отношение числа БпЛА, успешно отработавших выданные им задания по развозу грузов, к числу станций с модулями подзарядки.

Используемая модель движения БпЛА между пунктами назначения предполагает учет не только крейсерского режима, но и маневрирования аппарата при взлете и посадке; также учитывается зависимость скорости расходования энергии от текущих кинематических величин аппарата. Предусмотрено падение аппарата при расходовании им энергии ниже предельного порогового значения. Разработана упрощенная модель станции обслуживания с модулем подзарядки, подразумевающим замену разряженных аккумуляторных батарей. Учтен режим ожидания БпЛА в очереди.

Для исследования созданной концепции разработано программное обеспечение на базе среды Unity.

1. РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЗАРЯДА АКБ БПЛА

Существуют контактные и бесконтактные способы зарядки. Существующие контактные способы зарядки аккумуляторной батареи БпЛА основаны на использовании относительно сложного механизма [7, 8, 10]. В отличие от них зарядка по беспроводной технологии более проста. Способ передачи энергии в этом случае основан на явлении электромагнитной индукции, его эффективность сильно зависит от коэффициента связи взаимодействующих индуктивных катушек и их добротностей [16]. Основными недостатками бесконтактного способа являются: а) низкий КПД (в максимуме не более 70 % у существующих разработок, при неточном позиционировании БпЛА он резко падает); б) проблема электромагнитной совместимости с электронным бортовым оборудованием.

Преимуществом контактной зарядки является высокий КПД. Более того, наиболее перспективным является контактный способ восполнения энергии с помощью замены аккумуляторных батарей. Однако здесь возникает задача оптимизации механизмов доводки БпЛА съема / инсталляции АКБ с борта аппарата. Сложность заключается в том, чтобы обеспечить нужное число степеней свободы и получить достаточную точность позиционирования за счет как можно меньшего числа приводов и актуаторов.

Для решения указанной проблемы предлагается использовать на борту специальный осесимметричный бокс с АКБ, которая в нем жестко закреплена. В этом случае не требуется точное угловое позиционирование аппарата в плоскости контактной площадки и возможно использовать только один актуатор, осуществляющий вертикальное перемещение вдоль оси симметрии указанного бокса. На рис. 1 представлена предлагаемая конструкция для замены АКБ.

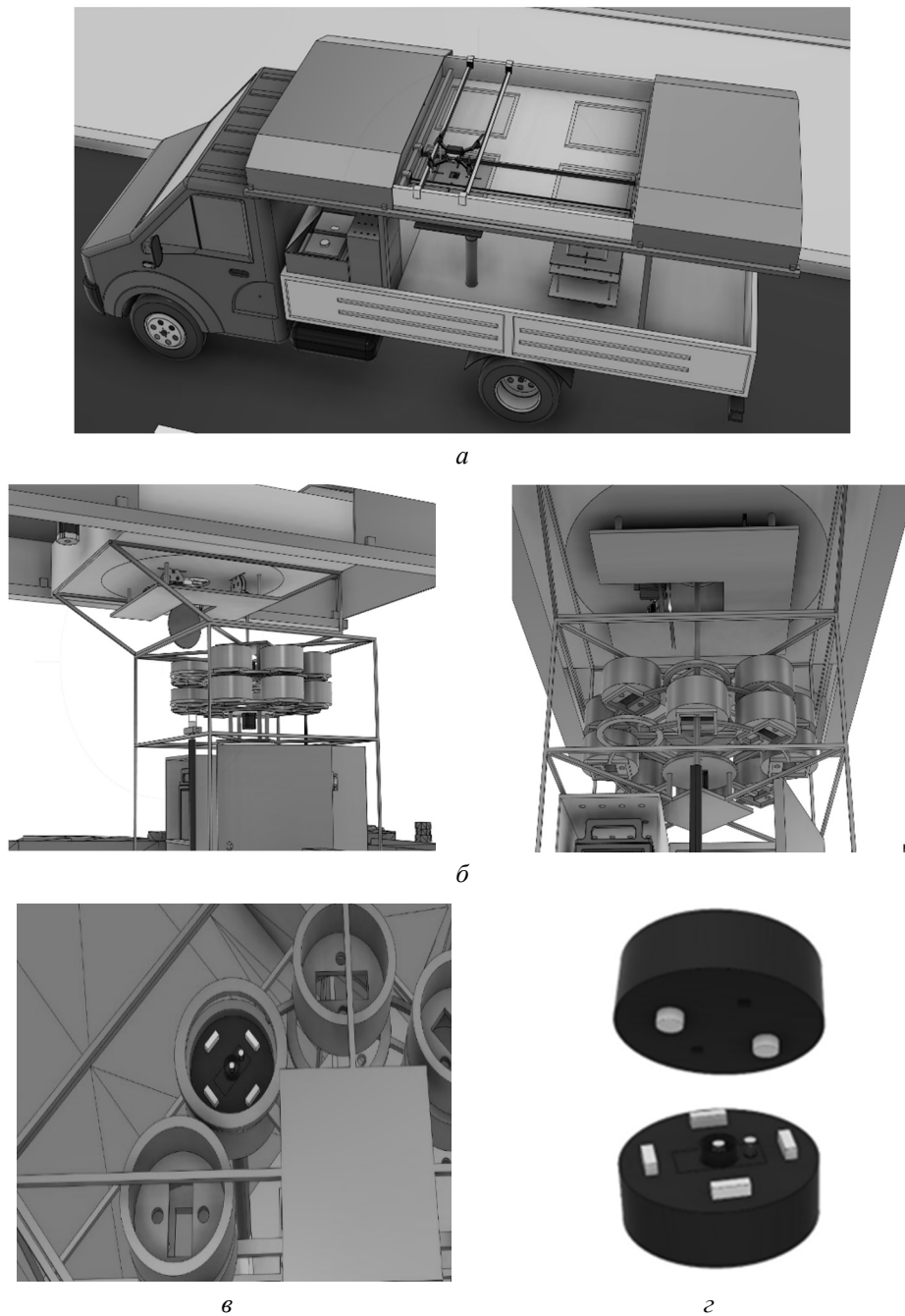


Рис. 1. Конструкция предлагаемого модуля контактной подзарядки с помощью замены АКБ:

a – вариант мобильной установки модуля подзарядки; *б* – общие виды системы замены АКБ в двух ракурсах; *в* – общий вид барабанной системы, используемой для хранения разряженных и заряженных АКБ; *г* – упрощенная модель цилиндрического бокса с АКБ

Fig. 1. The design of the proposed contact charging module by replacing the battery:

a – the option of mobile installation of the charging module; *б* – general views of the battery replacement system from two angles; *в* – general view of the drum system used to store discharged and charged batteries; *з* – simplified model of a cylindrical box with a battery

На рис. 1, *а* представлена трехмерная модель модуля подзарядки на мобильной платформе. Заметим, что такая платформа удобна в том числе для быстрого перемещения указанных модулей в новые положения временного стационарного базирования. Здесь видна площадка приземления с реечным способом позиционирования и доводки приземлившегося БпЛА.

На рис. 1, *б* представлены общие виды системы замены АКБ, расположенной под площадкой приземления. Эта система включает в себя барабанную подсистему, используемую для хранения разряженных и заряженных АКБ (рис. 1, *в*), и подсистему съема / подачи АКБ с помощью вертикально расположенного актуатора. Барабан содержит расположенные по кольцу специальные цилиндрические держатели, имеющие прорези в нижней части для возможности захватывания подвижной частью привода бокса с АКБ (рис. 1, *г*) и последующего его перемещения из барабана на борт в специальный отсек либо наоборот.

Обобщенное взаимодействие системы управления модуля подзарядки и бортовой системы БпЛА на всех его этапах происходит так, как описано в [12].

2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАНЦИЙ ПОДЗАРЯДКИ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППЫ БПЛА МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА

Дана однородная группа БпЛА заданного класса в количестве N штук, которая курсирует между K стационарными пунктами назначения S_k , $k = 1, 2, \dots, K$, стационарное пространственное распределение которых в пределах области функционирования задается набором:

$$S = [S_1(x_1, y_1); S_2(x_2, y_2), \dots, S_2(x_k, y_k), \dots, S_K(x_K, y_K)], \quad (1)$$

где x_k, y_k – координаты k -го пункта назначения.

Каждый БпЛА забирает некоторый груз на одной из станций и перемещает его на другую.

Оператор, находящийся на некотором наземном пункте, который может быть совмещен с одним из пунктов назначения из набора (1), периодически, в дискретные моменты времени t_u , $u = 1, 2, \dots, U$, $U \in \mathbb{N}$, выдает каждому БпЛА задания на перемещение грузов из одного пункта назначения в другой. В каждый момент t_u формируется следующий пакет номеров этих целевых пунктов для каждого i -го БпЛА:

$$[j_1(i, u), j_2(i, u), \dots, j_q(i, u), \dots, j_{Q(i, u)}(i, u)], \quad (2)$$

где $j_q(i, u)$ – номер соответствующего пункта назначения, k -го по порядку посещения в данном наборе элементарных заданий, выданном в момент t_u для i -го БпЛА; число всех таких заданий Q зависит от номеров i и u . При этом задействуются в общем случае все БпЛА, в том числе и те, которые на момент t_u находятся в процессе выполнения задания.

В начальный момент времени t_1 оператор выдает задания еще не задействованным БПЛА, которые находятся в некоторых пунктах назначения.

Для определенности будем считать БПЛА работающими на электрических двигателях с накоплением энергии в аккумуляторах. Каждый БПЛА может иметь максимальную энергию заряда $E_{0\max}$. Скорость расходования этой энергии зависит от ряда кинематических величин аппарата, прежде всего от его линейных скоростей и ускорений; последние меняются от времени по-разному, в зависимости от режима движения БПЛА (взлет, посадка, висение, крейсерский полет, резкий набор высоты).

Будем считать, что зависимость мощности расходования БПЛА мультикоптерного типа от его текущих кинематических величин описывается формулой

$$\nu E(t) = K_c + |V_x(t)| K_{vxz} + |V_z(t)| K_{vzx} + h K_h + |A_{xzy}(t)| K_{Ac}, \quad (3)$$

где K_c – постоянная расхода – мощность, используемая бортовыми вычислителями; $V_x(t)$ – вектор скорости по оси x в локальной системе координат в рассматриваемый момент времени t ; $V_z(t)$ – вектор скорости по оси z в локальной системе координат в момент времени t ; K_{vxz} – коэффициент влияния на потерю заряда скоростей по осям x, z ; h – высота полета БПЛА; K_h – коэффициент влияния высоты полета на потерю заряда; $A_{xzy}(t)$ – вектор ускорения в момент времени t ; K_{Ac} – коэффициент влияния на потерю заряда от ускорения.

Максимальный заряд энергии на борту каждого аппарата определяет максимальное время автономного функционирования аппарата, включающее время его нахождения в воздухе в режиме крейсерского полета, а также полное время совершения всех циклов приземлений / посадок. В общем случае для выполнения миссии группой БПЛА необходимо располагать в пунктах назначения зарядные устройства для восполнения расходуемой ими энергии.

Рассмотрим обобщенный алгоритм выбора аппаратом подходящей станции подзарядки. При возникновении необходимости пополнить запас энергии БПЛА начинает искать наиболее подходящую для этого станцию. Вначале он находит / получает информацию о расстояниях до всех станций от его текущего положения, а также о статусах станций в отношении возможности подзарядки (свободны / заняты для подзарядки на момент связи). После этого станции упорядочиваются по возрастанию расстояния до них. Для каждой станции в таком переборе проверяются условия: может ли БПЛА долететь до нее без подзарядки, и свободна ли станция. Если первое условие не выполнено, то станция не рассматривается далее. Если как первое, так и второе условие выполнено, то БПЛА делает запрос на эту станцию и резервирует место для подзарядки. Если же второе условие не выполнено, то для анализа выбирается другая станция, и т. д. Если после перебора всех станций, которые доступны для досягаемости данным БПЛА, ни одна из них не оказалась свободной, тогда БПЛА выбирает ближайшую

станцию, летит к ней, приземляется и далее находится в режиме ожидания места для подзарядки.

Принимаем упрощенное допущение, что все станции обслуживания, в том числе содержащие модули подзарядки, могут принять и обслужить любое количество БПЛА без учета их подзарядки. То есть имеется в виду погрузка / выгрузка грузов, перемещаемых БПЛА.

Однако станции обслуживания с модулями подзарядки должны выполнять еще три дополнительные функции одновременно.

Во-первых, быть готовыми получить запрос от БПЛА и зарезервировать место для подзарядки; во-вторых, находиться в режиме подзарядки тех БПЛА, которые приземлились, когда были свободные места для подзарядки, и, в-третьих, предоставлять места для нахождения и ожидания своей очереди тем БПЛА, для которых в момент их приземления на станцию свободных стоек для подзарядки не оказалось. Таким образом, в каждой станции нужно отслеживать и контролировать очередь подзарядки. Предполагается, что число мест для подзарядки ограничено и равно l , а длина очереди может быть произвольной.

Примем, что среди всех K станций есть M штук, образующих подмножество $S_c \subset S$, таких что в их составе есть модули подзарядки. Набор таких станций будем описывать вектором соответствующих номеров:

$$n_c = [j_{c,1}, j_{c,2}, \dots, j_{c,M}], \quad (4)$$

где $j_{c,i}$ – это номер станции из подмножества S_c , где $i = 1, \dots, M$.

Количество M станций с функцией подзарядки, а также то или иное распределение этих станций на множестве всех станций обслуживания является важным фактором, влияющим на эффективность подзарядки как каждого аппарата, так и всей группы в целом.

Для возможности выполнения миссии группой БПЛА стационарные пункты назначения и их подмножество $S_c = S(n_c)$ расположены таким образом, чтобы любой БПЛА мог выполнить задание типа (2), выбранное из множества всех заданий, которые могут быть выданы ему оператором. При этом предполагается, что каждый БПЛА по мере необходимости восполняет энергию на одной из станций подмножества S_c .

В неблагоприятных случаях распределение станций S и его подмножество S_c могут не позволить реализовать некоторые задания для БПЛА в силу достаточного удаления станций подмножества S_c от некоторых пунктов назначения.

Примерная оценка среднего числа модулей подзарядки M^* может быть дана, если известны средние интервалы нахождения каждого БПЛА в воздухе Δt_1 и подзарядки его на станции Δt_2 . Далее, в произвольный момент времени t для каждого i -го БПЛА рассмотрим дискретную случайную величину η_i , $i = 1, \dots, N$, принимающую значение 0, если БПЛА находится в воздухе, и 1 – если он подзарядается на станции. Ее математическое ожидание такое [17]:

$$M(\eta_i) \approx 1 \frac{\Delta t_2}{(\Delta t_1 + \Delta t_2)} + 0 \frac{\Delta t_1}{(\Delta t_1 + \Delta t_2)} = \frac{\Delta t_2}{(\Delta t_1 + \Delta t_2)}. \quad (5)$$

Как правило, указанные N случайных величин можно принять независимыми. Тогда если в любой момент один модуль подзарядки может обслуживать только один аппарат и очереди на этих модулях недопустимы, то на основании (5) можно получить верхнюю границу $M_{\max}^*$ оценки достаточного числа M как математического ожидания суммы указанных случайных величин:

$$M_{\max}^* = M \left(\sum_{i=1}^N \eta_i \right) = \sum_{i=1}^N M(\eta_i) = N \frac{\Delta t_2}{(\Delta t_1 + \Delta t_2)}. \quad (6)$$

Если допустить очереди на станциях обслуживания, снабженных модулями подзарядки, то оценка M^* станет меньше величины $M_{\max}^*$ в (6).

Для оценки степени выполнения всех заданий миссии и достижения ее цели целесообразно ввести понятие целевого функционала F миссии. Каждый i -й БПЛА группы будем характеризовать величиной $\hat{f}_i$, равной отношению булевой величины f_i , показывающей выполнение задания данным аппаратом (флагом выполнения) ко времени T_i . В начале каждого моделирования для заданного M генерируется C_K^M положений модулей зарядки среди локальных областей расположения базовых станций; далее для фиксированного распределения положений модулей зарядки выполняется P моделирований для различных заданий типа (2) для каждого БПЛА.

Для фиксированных M и некоторого распределения из множества C_K^M рассматриваем следующую величину:

$$F_j(M) = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P \left(\frac{f_{ijp}}{T_i} \right) \right]}{(PN)}, \quad (7)$$

где f_{ijp} – флаг выполнения p -го задания по перемещению грузов i -м БПЛА при j -м распределении M модулей заряда по всем N станциям.

Задача заключается в нахождении для каждого M оптимального распределения с некоторым номером j_{opt} M модулей зарядки по местоположениям станций:

$$j_{opt} = \arg j \max F_j(M). \quad (8)$$

Функционал $F_j(M)$ зависит от наборов заданий типа (2) для каждого БПЛА на каждом опыте при данном M , технических параметров БПЛА группы, множества S и подмножества S_c .

Для нахождения оптимального распределения требуется произвести комплексное исследование функционирования группы БпЛА в процессе выполнения ими указанной миссии с помощью специального разработанного программного обеспечения типа симулятора.

3. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННОГО СИМУЛЯТОРА

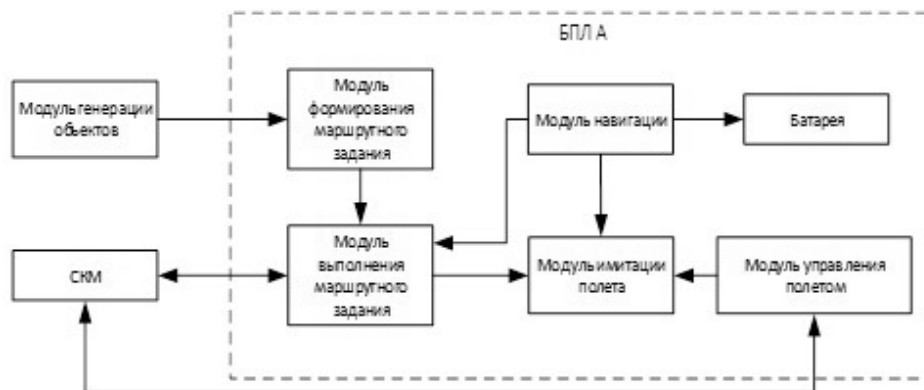
Симулятор разрабатывался с помощью игрового движка Unity 2022.2.19f1 и языка программирования C#. Unity позволяет визуализировать исследования, описывать необходимую для исследований кинематику / динамику, задавать необходимую логику моделирования, что позволяет разрабатывать симуляторы и регулировать необходимые параметры исследования.

На рис. 2, а представлена схема симулятора и взаимодействия элементов моделирования. Система контроля моделирования (СКМ) предназначена для хранения и передачи информации между моделируемыми объектами. Объекты не имеют прямого доступа к информации, хранящейся в СКМ, а получают ее с помощью запроса, обращаясь в модуль коммуникации. Также в СКМ есть модуль сбора статистики, который опрашивает состояния моделируемых объектов и записывает информацию в файл. Модуль генерации объектов создает базовые станции и БпЛА в заранее определенных позициях и записывает созданные объекты в списки базовых станций и БпЛА.

На рис. 2, б представлена структурная схема модели БпЛА. Модуль генерации объектов последовательностью случайных чисел формирует путь, состоящий из точек облета базовых станций, согласно (2). Модуль формирования маршрутного задания принимает этот массив облета и поочередно формирует целевую точку, запрашивая у базовой станции свободную позицию; при достижении некоторым БпЛА станции его модуль формирования маршрутного задания переключается на следующую целевую позицию до тех пор, пока БпЛА не пролетит все заданные оператором станции. Модуль выполнения маршрутного задания (планировщик) строит траекторию от текущей позиции до целевой. Модуль навигации имитирует глобальные навигационные системы, возвращая текущее положение и ориентацию в пространстве, а также локальные инерциальные системы, выдающие скорости и ускорения. Модуль управления аппаратом (регулятор) запрашивает траекторию, текущее положение БпЛА и на основании этих данных формирует управляющие воздействия для пролета по траектории. Модуль «Батарея», обрабатывая получаемые с блока навигации данные о скорости, ускорении, высоте, рассчитывает потери энергии по формуле (3). Модуль управления полетом с точки зрения объектно ориентированной структуры программы является ссылкой на сам БпЛА, которая позволяет обращаться ко всем модулям БпЛА. Также модуль управления полетом является главным модулем БпЛА, который хранит в себе следующую информацию: максимально разрешенную скорость передвижения, номер БпЛА, состояние / статус выполнения / невыполнения миссии, состояние полного разряда БпЛА, состояние режима полета / отключения двигателей. При достижении заряда БпЛА уровня менее 25 % все модули отключаются и имитируется его падение вниз.



а



б

Рис. 2. Характерные схемы симулятора:

а – схема симулятора и взаимодействия элементов моделирования; б – структурная схема модели БПЛА

Fig. 2. Characteristic diagrams of the simulator:

а – the diagram of the simulator and the interaction of the simulation elements; б – block diagram of the UAV model

На рис. 3, а представлены точечные позиции для создания базовых станций на карте; первоначальные положения БПЛА совпадают с этими точками. Также модуль генерации объектов формирует для БПЛА маршрутные задания.

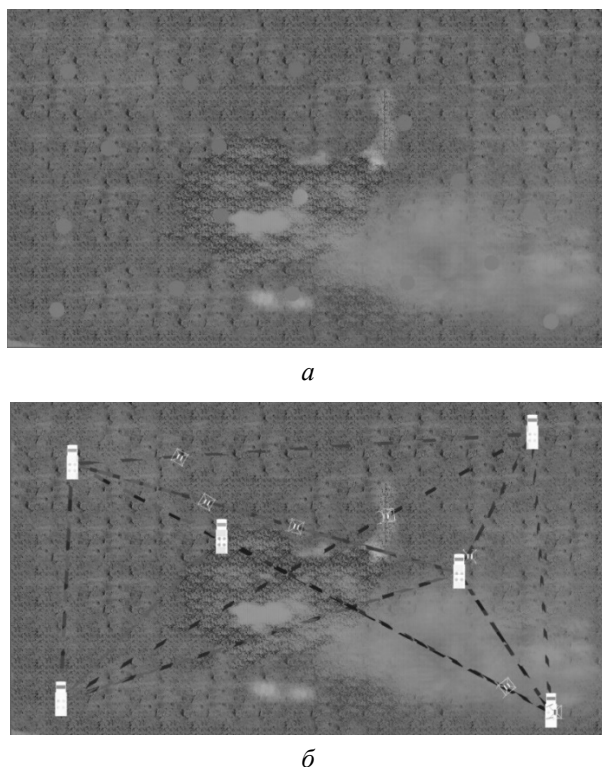


Рис. 3. К определению характерных виртуальных мест появления базовых станций и оценке характерных расстояний между ними:

a – позиции возможных появлений станций с модулями подзарядки на карте; *б* – визуализация текущих маршрутов перемещения аппаратов

Fig. 3. Determining the characteristic virtual locations of the base stations and estimating the characteristic distances between them:

a – positions of possible stations with charging modules on the map; *b* – visualization of current vehicle movement routes

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В этом разделе описываются результаты моделирования, проведенного для исследования влияния количества зарядных станций и их распределения по всем станциям обслуживания на качество выполнения задания. Пространственное положение всех базовых станций было фиксировано и соответствовало локальным областям на рис. 3, *a*, выделенным кругами. Для каждой миссии и каждого БПЛА генерировалось случайное маршрутное задание, состоящее из пяти обходных позиций. Максимальная скорость БЛПА была установлена равной 10 км/ч. В одном месте расположения станции обслуживания могут появиться несколько БПЛА. Организовывается перебор значений M , для каждого из этих значений перебираются различные распределения (4) модулей подзарядки по местам расположения станций. Для каждого такого распределения производится P моделирований для различных заданий типа (2) для каждого БПЛА, всего для каждого числа зарядных станций M проводилась

серия из PC_K^M моделирований. Для каждой серии рассчитывался критерий (7), с тем чтобы получать соответствующие оптимальные распределения по (8). Было положено $P = 10$, $N = 10$, $K = 6$.

На рис. 4, *a–г* представлены диаграммы распределения значений функционала (7) для каждого конкретного распределения из множества C_K^M таких распределений для четырех значений M : 2, 3, 4, 5. На этих же рисунках представлены соответствующие найденные оптимальные распределения (соответствующие наборы выделены кругами) M модулей подзарядки по всем станциям для каждого M , кроме $M = 5$: для этого случая все распределения были эквивалентны по функционалу (7), о чем свидетельствует равномерность диаграммы на рис. 4, *г*. Для $M = 2$ наибольшая достигнутая успешность выполнения миссии составляет для наилучшего распределения 25 %, для $M = 3$ – 43 %, для $M = 4$ – 66 % и для $M = 5$ – 100 %.

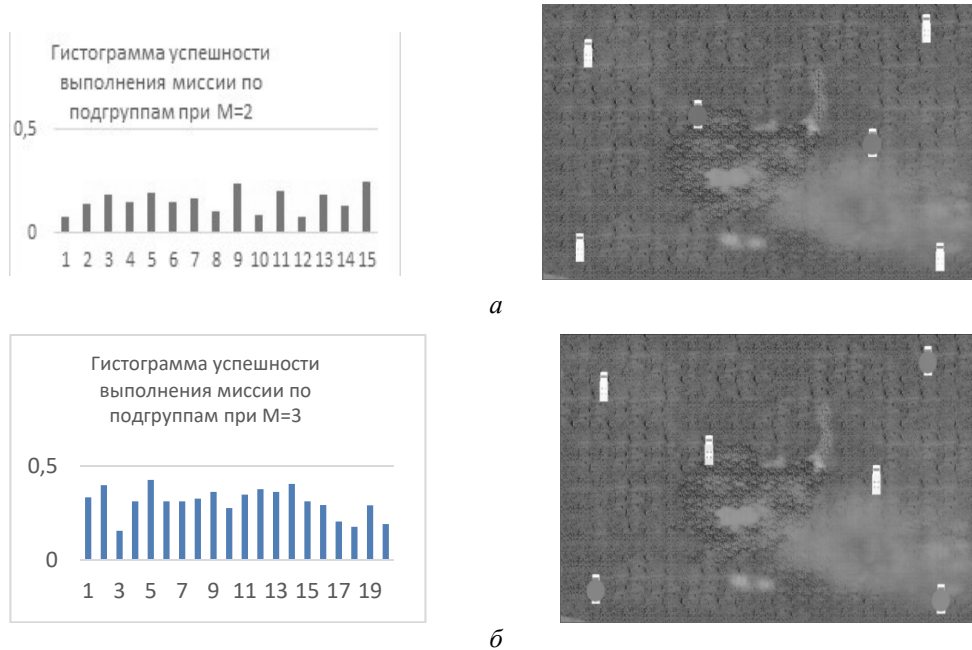


Рис. 4. К нахождению оптимальных распределений M модулей подзарядки по $K = 6$ станциям для разных M :

a – гистограмма успешности выполнения миссий для различных распределений двух модулей подзарядки ($M = 2$) по $K = 6$ станциям (слева) и соответствующая наилучшая подгруппа (справа); *б* – гистограмма успешности выполнения миссий для различных распределений двух модулей подзарядки ($M = 3$) по $K = 6$ станциям (слева) и соответствующая наилучшая подгруппа (справа); *в* – гистограмма успешности выполнения миссий для различных распределений двух модулей подзарядки ($M = 4$) по $K = 6$ станциям (слева) и соответствующая наилучшая подгруппа (справа); *г* – гистограмма успешности выполнения миссий для различных распределений пяти модулей подзарядки ($M = 5$) по $K = 6$ станциям

Fig. 4. On finding optimal distributions of M charging modules over $K = 6$ stations for different M :

a – a histogram of mission success for different distributions of two charging modules ($M = 2$) across $K = 6$ stations (left) and the corresponding best subgroup (right); *б* – a histogram of mission success for different distributions of two charging modules ($M = 3$) across $K = 6$ stations (left) and the corresponding best subgroup (right); *в* – a histogram of mission success for different distributions of two charging modules ($M = 4$) across $K = 6$ stations (left) and the corresponding best subgroup (right); *г* – a histogram of mission success for different distributions of five charging modules ($M = 5$) across $K = 6$ stations

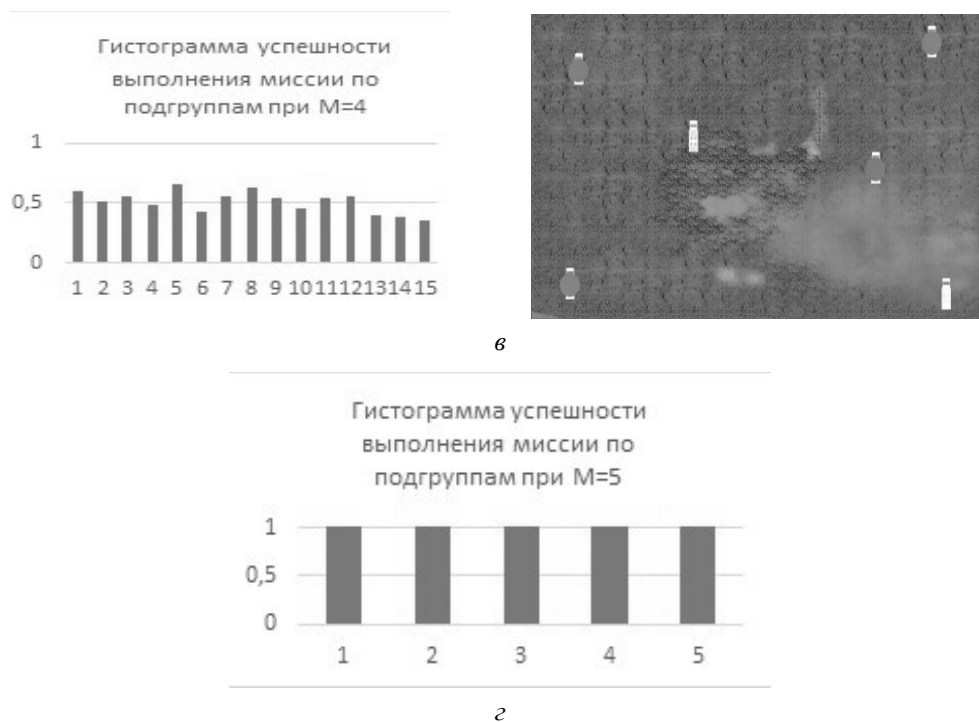


Рис. 4. Окончание

Для достижения цели обеспечения пролета через более чем две станции был применен метод подбора коэффициентов K_{vxz} и K_h : путем последовательного увеличения или уменьшения данных коэффициентов было достигнуто состояние, когда растраты заряда на батареи стали достаточными для преодоления достаточно большого расстояния между двумя станциями (см. крайние точки по прямой или по диагонали на рис. 3, б). В результате значения коэффициентов в (3) составили: $K_c = 0,0003$ Дж/с; $K_{vxz} = 0,005$ Дж/м; $K_h = 0,005$ Дж/м·с; $K_{Ac} = 0,00018$ Дж·с/м.

Из динамического диапазона амплитуд каждой диаграммы, приведенной на рис. 4, видно, что рассматриваемый симулятор позволяет оптимизировать распределение модулей подзарядки по всем станциям со значительным увеличением эффективности / успешности функционирования группы БПЛА в соответствии с критерием (7) при выполнении типовых миссий по перемещению товаров между пунктами назначения.

Полученные результаты показывают возможность использования развитой методики для оптимизации состава по наличию / отсутствию модулей подзарядки и стоимости станций обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена методика оптимизации распределения модулей подзарядки по станциям подзарядки с фиксированным пространственным распределением. Критерием этой оптимизации является максимум относительного

числа успешно выполненных заданий всеми БПЛА на множестве всех испытаний, соответствующих заданному числу M .

Разработана модель движения БПЛА между пунктами назначения с учетом зависимости скорости расходования аппаратом энергии от его текущих кинематических величин. Предусмотрено падение аппарата в случае расходования им энергии ниже предельного порогового значения. Разработана упрощенная модель станции обслуживания с модулем подзарядки, подразумевающим замену разряженных аккумуляторных батарей.

Адекватность рассмотренной методики подтверждается получаемыми результатами моделирования – численного нахождения оптимального по указанному критерию распределения модулей подзарядки по станциям обслуживания с помощью программного обеспечения среды Unity.

Также в статье предлагается и обосновывается новая конструкция модуля подзарядки, использующего способ снятия разряженных и установки заряженных АКБ в специальном боксе, отличающаяся от известных аналогичных конструкций большей простотой и меньшим временем совершения манипуляций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косова А.Е., Корилов А.М. Автоматическая посадка малых беспилотных летательных аппаратов с использованием компьютерного зрения // Доклады ТУСУР. – Т. 20, № 3. – С. 191–196. – DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-191-196.
2. Функциональная модель взаимодействия БЛА с наземной роботизированной платформой при решении сельскохозяйственных задач / К.Т. Нго, В.В. Нгуен, И.Ю. Харьков, Е.Е. Усина, О.О. Шумская // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – Вып. 6-3. – С. 41–50.
3. Galimov M., Fedorenko R., Klimchik A. UAV positioning mechanisms in landing stations: classification and engineering design review // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (13). – P. 3648. – DOI: 10.3390/s20133648.
4. Патент № 2710887 С1 Российская Федерация. Посадочная платформа для беспилотного летательного аппарата: опубл. 14.01.2020 / Габдуллин А.Р., Галимов М.М., Климчик А.С.
5. Патент № 2722249 С1 Российская Федерация. Посадочная платформа для БПЛА вертикального взлета и посадки: опубл. 28.05.2020 / Габдуллин А.Р., Галимов М.М., Климчик А.С.
6. HEISHA DNEST 2 / Heisha Technology. – URL: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (accessed: 01.02.2024).
7. Patent US 9387928B1. Multi-use UAV docking station systems and methods: date of patent Jul. 12, 2016 / N.K. Gentry, R. Hsieh, L.K. Nguyen.
8. Patent US 9139310B1. Systems and methods for UAV battery exchange: date of patent Sep. 22, 2015 / M. Wang.
9. Patent WO 2016/113766. Electrically charging system for drones: publ. date 21.07.2016 / Ippolito M.
10. Фетисов В.С., Ахмеров Ш.Р., Сизоненко Р.В. Интеллектуальная коммутация бортовых посадочных электродов БПЛА с открытыми контактными площадками зарядной платформы // Второй Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»: труды семинара. – СПб., 2015. – С. 115–122.
11. Широков И.Б., Широкова Е.И., Азаров А.А. Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 380–389.
12. Аппаратно-алгоритмическое обеспечение перспективной системы энергосбережения автономной группы БПЛА / В.А. Костюков, М.Ю. Медведев, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 230–243.
13. A distributed framework for energy trading between UAVs and charging stations for critical applications / V. Hassija, V. Chamola, D.N.G. Krishna, M. Guizani // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – Vol. 69 (5). – P. 5391–5402. – DOI: 10.1109/TVT.2020.2977036.

14. Li Li, Jie Wu, Yixiang Xu, Jun Che, Jin Liang. Energy-controlled Optimization Algorithm for Rechargeable Unmanned Aerial Vehicle Network // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2017. – Vol. 43. – P. 1337–1342.
15. Kostyukov V., Pshikhov V. System of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations // *Frontiers in Robotics and Electromechanics* / ed. by A. Ronzhin, V. Pshikhov. – Springer, 2023. – P. 235–263. – (Smart innovation, systems and technologies; vol. 329). – DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_16.
16. Нараянан Р. Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств // *Компоненты и технологии*. – 2015. – № 9. – С. 26–32.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

Костюков Владимир Александрович, кандидат технических наук; старший научный сотрудник АО НКБ «РиСУ». E-mail: wkost-einheit@yandex.ru

Бутенко Максим Юрьевич, инженер АО НКБ «РиСУ». E-mail: maximusad1996@gmail.com

Гисцов Владислав Геннадьевич, инженер АО НКБ «РиСУ». E-mail: vladgistsov@mail.ru

Евдокимов Игорь Дмитриевич, инженер АО НКБ «РиСУ». E-mail: igor.ezio2000@yandex.ru

Kostyukov Vladimir A., PhD (Eng.), senior researcher, Joint-Stock Company Robotics and Control Systems. E-mail: wkost-einheit@yandex.ru

Butenko Maxim Yu., engineer, Joint-Stock Company Robotics and Control Systems. E-mail: maximusad1996@gmail.com

Gistsov Vladislav G., engineer, Joint-Stock Company Robotics and Control Systems. E-mail: vladgistsov@mail.ru

Evdokimov Igor D., engineer, Joint-Stock Company Robotics and Control Systems. E-mail: igor.ezio2000@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-53-70

A distributed system of charging stations for the power supply of a group of multicopter-type UAVs*

V.A. KOSTYUKOV^a, M.YU. BUTENKO^b, V.G. GISTSOV^c, I.D. EVDOKIMOV^d

Joint stock Company Scientific-Design Bureau of Robotics and Control Systems, 154 Socialistskaya Street Taganrog, Russian Federation, 347909

^a wkost-einheit@yandex.ru ^b maximusad1996@gmail.com

^c vladgistsov@mail.ru ^d igor.ezio2000@yandex.ru

Abstract

A steady trend towards the development of electric power systems leads to their continuous enlargement and sophistication. As a result, new ways of their control appear. In this regard, the existing models and complexes for adequacy assessment may work inadequately and ineffectively in terms of the obtained results adequacy. To assess the current state of the existing models and complexes, we reviewed and analyzed the domestic and foreign software and computer systems. In particular, we considered mathematical models of minimizing the power shortage.

* Received 06 December 2023.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Scientific Foundation No. 22-29-00370 "Research of ways and methods of optimization of control systems of heterogeneous robotic complexes according to the criterion of energy efficiency", <https://rscf.ru/project/22-29-00370> / on the basis of JSC "NCB of Robotics and Control Systems".

This work is based on the problem of modifying mathematical models of minimizing the power shortage used in adequacy assessment of the electric power systems of one of the complexes under consideration. As a modification of mathematical models, it is proposed to exclude the existing method of using the line capacities and start using correct accounting for the maximum permissible active power flow in controlled sections. The experimental part reflected in the paper concerns the testing of options for models to minimize the power shortage, as well as the proposed modifications on various systems, including those consisting of three and seven reliability zones with a variable number of controlled sections and power lines included in them.

The results of the study have shown that the proposed modifications are efficient and can be used in the future. The authors also obtained the most adequate results in terms of the physical laws of electric power system operation due to the model of minimizing the power shortage with quadratic losses which takes into account the limitations of power transmission over controlled sections.

Keywords: UAV, UAV, charging module, automation, energy efficiency of operation, mission quality criterion, optimization

REFERENCES

1. Kosova A.E., Korikov A.M. Avtomaticheskaya posadka malykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem komp'yuternogo zreniya [Using computer vision algorithms for the automatic landing of unmanned aerial vehicles]. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 191–196. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-191-196.
2. Ngo K.T., Nguyen V.V., Kharkov I.Yu., Usina E.E., Shumskaya O.O. Funktsional'naya model' vzaimodeistviya BLA s nazemnoi robotizirovannoi platformoi pri reshenii sel'skokhozyaistvennykh zadach [Functional model of interaction between an UAV and a land-based robotic platform in agricultural tasks]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Kabardin-Balkar scientific center of RAS*, 2018, iss. 6-3, pp. 41–50.
3. Galimov M., Fedorenko R., Klimchik A. UAV positioning mechanisms in landing stations: classification and engineering design review. *Sensors*, 2020, vol. 20 (13), p. 3648. DOI: 10.3390/s20133648.
4. Gabdullin A.R., Galimov M.M., Klimchik A.S. *Posadochnaya platforma dlya bespilotnogo le-tatel'nogo apparata* [Landing place for drone]. Patent RF no. 2710887 C1, 2020.
5. Gabdullin A.R., Galimov M.M., Klimchik A.S. *Posadochnaya platforma dlya BpLA vertikal'nogo vzleta i posadki* [Landing platform for UAV vertical take-off and landing]. Patent RF no. 2722249 C1, 2020.
6. Heisha Technology. *HEISHA DNEST 2*. Available at: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (accessed 01.02.2024).
7. Gentry N.K., Hsieh R., Nguyen L.K. *Multi-use UAV docking station systems and methods*. Patent US 9387928B1, 2016.
8. Wang M. *Systems and methods for UAV battery exchange*. Patent US 9139310B1, 2015.
9. Ippolito M. *Electrically charging system for drones*. Patent WO 2016/113766, 2016.
10. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R., Sizonenko R.V. [Intelligent switching of on-board landing electrodes of a UAV with open contact pads of a vertical platform]. *Vtoroi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta»* [The second All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned transport vehicles with elements of artificial intelligence"]. St. Petersburg, 2015, pp. 115–122. (In Russian).
11. Shirokov I.B., Shirokova E.I., Azarov A.A. Sistema besprovodnoi peredachi energii [System of wireless energy transfer]. *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii = Infocommunications and Radio Technologies*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 380–389.
12. Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Butenko M.Yu., Gistsov V.G., Evdokimov I.D. Apparatno-algoritmicheskoe obespechenie perspektivnoi sistemy energosberezheniya avtonomnoi gruppy BpLA [The concept of creating a promising system for recharging an autonomous group of UAVs]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2022, no. 5, pp. 230–243.
13. Hassija V., Chamola V., Krishna D.N.G., Guizani M. A distributed framework for energy trading between UAVs and charging stations for critical applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69 (5), pp. 5391–5402. DOI: 10.1109/TVT.2020.2977036.

14. Li Li, Jie Wu, Yixiang Xu, Jun Che, Jin Liang. Energy-controlled Optimization Algorithm for Rechargeable Unmanned Aerial Vehicle Network, 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017, Vol. 43, pp. 1337–1342.

15. Kostyukov V., Pshikhopov V. System of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations. *Frontiers in Robotics and Electromechanics*. Ed. by A. Ronzhin, V. Pshikhopov. Springer, 2023, pp. 235–263. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_16.

16. Narayanan R. Vybor katushek dlya besprovodnykh zaryadnykh ustroystv [Selection of coils for wireless chargers]. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2015, no. 9, pp. 26–32. (In Russian).

17. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* [Theory of probability]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.

Для цитирования:

Распределенная система станций подзарядки для энерго-обеспечения группы БПЛА мультикоптерного типа / В.А. Костюков, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 1 (93). – С. 53–70. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-53-70.

For citation:

Kostyukov V.A., Butenko M.Yu., Gistsov V.G., Evdokimov I.D. Raspredeleonnaya sistema stantsii podzaryadki dlya energoobespecheniya gruppy BpLA mul'tikopternogo tipa [A distributed system of charging stations for the power supply of a group of multicopter-type UAVs]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 1 (93), pp. 53–70. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-1-53-70.