

**В.А. Костюков, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ СТАНЦИЙ  
ПОДЗАРЯДКИ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ГРУППЫ БПЛА  
МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА\***

*В связи с ускоренным ростом объемов использования групп автономно функционирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных средах решение проблемы оптимизации функционирования групп таких аппаратов по критерию минимума затрачиваемой энергии является актуальной научной задачей. В настоящей статье развивается новый подход обеспечения энергосбережения группы беспилотных летательных аппаратов (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. Необходимо определить такие число и непосредственно указанное подмножество станций обслуживания, снабженных такими модулями, которые бы доставляли оптимум некоторого функционала качества, характеризующего функционирование группы БПЛА. В статье предлагается в качестве такого функционала отношение числа БПЛА, успешно отработавших выданные им задания по развозу грузов, к числу станций с модулями подзарядки. 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 значения. Разработана упрощенная модель станции обслуживания с модулем подзарядки (МП), подразумевающим замену разряженных аккумуляторных батарей. Учтен режим ожидания БПЛА в очереди. Для исследования разработанных алгоритмов планирования движения и выбора оптимального распределения модулей подзарядки по станциям обслуживания создано и апробировано программное обеспечение на базе среды Unity. Гибкость последнего позволяет моделировать различные алгоритмы информационных взаимодействий элементов внутри группы БПЛА, группы МП, а также перекрестных взаимодействий между БПЛА и МП.*

*БПЛА; модуль подзарядки; энергетическая эффективность функционирования; критерий качества выполнения миссии; оптимизация; Unity.*

**V.A. Kostyukov, M.Y. Butenko, V.G. Gistsov, I.D. Evdokimov**

**INVESTIGATION OF A DISTRIBUTED SYSTEM OF CHARGING STATIONS  
FOR THE POWER SUPPLY OF A GROUP OF MULTICOPTER-TYPE UAVS**

*Due to the accelerated growth in the use of groups of autonomously functioning unmanned aerial vehicles (UAVs) in various environments, solving the problem of optimizing the functioning of groups of such vehicles according to the criterion of the minimum energy consumed is an urgent scientific task. In this article, a new approach is being developed to ensure energy saving of a group of unmanned aerial vehicles (UAVs) by using a distributed system of UAV charging modules that provide the necessary versatility in servicing different types of vehicles. It is assumed that the charging modules are installed at a subset of service stations, between which multicopter-type UAVs ply, carrying out a cargo delivery mission. It is necessary to determine such a number and a*

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00337 «Разработка вероятностных методов оптимизации траекторий группы подвижных робототехнических комплексов в априори неопределенной среде», <https://rscf.ru/project/22-29-00337/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

*directly specified subset of service stations equipped with such modules that would deliver the optimum of some quality functional characterizing the functioning of a group of UAVs. The article suggests as such a functional the ratio of the number of UAVs that have successfully fulfilled the tasks assigned to them for the delivery of goods to the number of stations with charging modules. The model of UAV movement between destinations assumes taking into account not only the cruising mode, but also the maneuvering of the device during takeoff and landing; the dependence of the energy consumption rate on the current kinematic values of the device is also taken into account. It is envisaged that the device will fall if it consumes energy below the maximum threshold value. A simplified model of a service station with a charging module (CM) has been developed, implying the replacement of discharged batteries. The waiting mode of the UAV in the queue is taken into account. To study the developed algorithms for motion planning and choosing the optimal distribution of charging modules across service stations, software based on the Unity environment has been created and tested. The flexibility of the latter allows modeling various algorithms of information interactions of elements within a group of UAVs, a group of CM, as well as cross-interactions between UAVs and CM.*

*UAV; charging module; energy efficiency of functioning; mission quality criterion; optimization; Unity.*

**Введение.** В связи с ростом объемов использования групп автономных беспилотных летательных аппаратов (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 устанавливаться независимо от этих станций. На верхнем уровне такой системой модулей подзарядки может управлять оператор. Для разработки технических характеристик таких модулей, а также для 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 быть увязана с выборами оптимальных способов и соответствующих конструкций 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 проведено соответствующего сравнительного анализа. В патенте [8] рассматривается возможный способ замены разряженных аккумуляторных батарей, а в работах [9, 10] – способы подзарядки 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 выполнении 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, в том числе по энергетическому критерию, такого взаимодействия, 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 БПЛА энергии у станции. 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 беспилотных летательных аппаратов (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 предлагается в качестве такого функционала 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 в случае расходования 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.

**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, контактная штекерная подзарядка может быть адаптирована под обслуживание разных типов аппаратов [17]. Однако наиболее перспективным является контактный способ восполнения энергии с помощью замены аккумуляторных батарей, как наиболее быстрый.

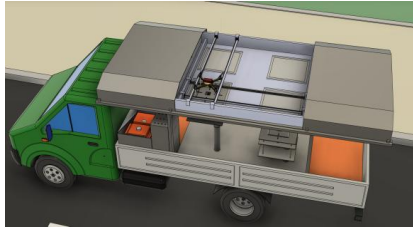
Так известен патент [18], где предлагается аналогичная система замены АКБ, однако не произведено комплексирование с подсистемой посадки/ точного позиционирования, а также не рассмотрен вопрос подачи энергии на устройство заряда разряженных батарей.

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.

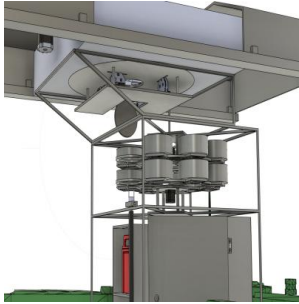
Для решения указанной проблемы предлагается использовать на борту специальный осесимметричный бокс с АКБ, которая в нем жестко закреплена. В этом случае не требуется точное угловое позиционирование аппарата в плоскости контактной площадки и возможно использовать только один актуатор, осуществляющий вертикальное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

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.

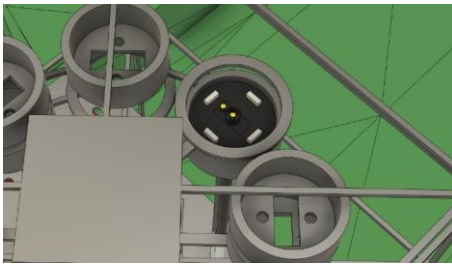
На рис. 1,б представлены общие виды системы замены АКБ, расположенной под площадкой приземления. Эта система включает в себя барабанную подсистему, используемую для хранения разряженных и заряженных АКБ (см. рис. 1,в), и подсистему съема/подачи АКБ с помощью вертикально расположенного актуатора. Барабан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



а) 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

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

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

**Исследование распределения станций подзарядки для оптимизации энергообеспечения группы БПЛА мультикоптерного типа.** Дана однородная группа БПЛА заданного класса в количестве  $N$  штук, которая курсирует между  $K$  стационарными пунктами назначения  $S_i, i = 1, \dots, K$ , стационарное пространственное распределение которых в пределах области функционирования задается набором:

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

Каждый БПЛА забирает некоторый груз на одной из станций и отвозит на другую.

Оператор, находящийся на некотором наземном пункте, который может быть совмещен с одним из пунктов назначения, периодически, в дискретные моменты времени  $t_u$ ,  $u=1,2,\dots$ ,  $U$  выдает каждому БПЛА задания на перевозку грузов из одних пунктов назначения в другие, что формируется в виде следующего пакета номеров этих целевых пунктов:

$$[j_1(i, q), j_2(i, q), \dots, j_{J(i,q)}(i, q)], \quad (2)$$

где  $J(i, q)$  – число назначенных в момент  $t_u$  элементарных заданий для  $i$ -го БПЛА. 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 БПЛА группы будем считать работающими на электрических двигателях с накоплением энергии в аккумуляторах. Каждый БПЛА может иметь максимальную энергию заряда  $E_{0max}$ . 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 скорости расходования БПЛА мультикоптерного типа от его текущих кинематических величин описывается формулой:

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

где  $K_c$  – постоянная расхода, мощность, используемая бортовыми вычислителями;  $V_x(t)$  – скорость по оси  $x$  в локальной системе координат в рассматриваемый момент времени  $t$ ;  $V_z(t)$  – скорость 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 по всем осям 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).

Станции упорядочиваются в порядке возрастания расстояния до них и перебираются. 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 выполнены, то БПЛА делает запрос на эту станцию и резервирует место для подзарядки. Если же второе условие не выполнено, то выбирается для анализа 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, когда освободится место для подзарядки.

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

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

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  $\Delta t_1$  и подзарядки его на станции  $\Delta t_2$ . Далее, в произвольный момент времени  $t$  для каждого  $i$ -го БПЛА рассмотрим дискретную случайную величину  $\eta_i, i = 1, \dots, N$ , принимающую значение 0, если БПЛА находится в воздухе, и 1 – если он подзарядается на станции. Ее математическое ожидание есть [19]:

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

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 можно получить верхнюю границу оценки достаточного числа  $M$  как математического ожидания суммы указанных случайных величин:

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

Если допустить очереди на станциях обслуживания, снабженных модулями подзарядки, то оценка  $M^*$  станет меньше  $M_{max}^*$ .

Для оценки степени выполнения всех заданий миссии и достижения ее цели целесообразно ввести понятие целевого функционала  $F$  миссии. Каждый БПЛА группы будем характеризовать булевой величиной  $f_i$ , показывающей, выполнено им задание или нет. В начале каждого моделирования для заданного  $M$  случайным образом генерируется  $M$  положений модулей зарядки среди локальных областей расположения базовых станций; для фиксированного распределения положений модулей зарядки производится  $P$  моделирований для различных заданий типа (2) для каждого БПЛА. Тогда в качестве  $F$  можно взять следующую оценку:

$$F^*(M) = \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{C_K^M} \sum_{p=1}^P f_{ijp} \right) / (PC_K^M N), \quad (7)$$

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

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

Для оптимизации указанного функционала требуется произвести комплексное исследование функционирования группы БПЛА в процессе выполнения ими указанной миссии с помощью специального разработанного программного обеспечения, структурированного в виде симулятора.

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

На рис. 2 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 с помощью запроса, обращаясь в модуль коммуникации. Так же 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. 3 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.

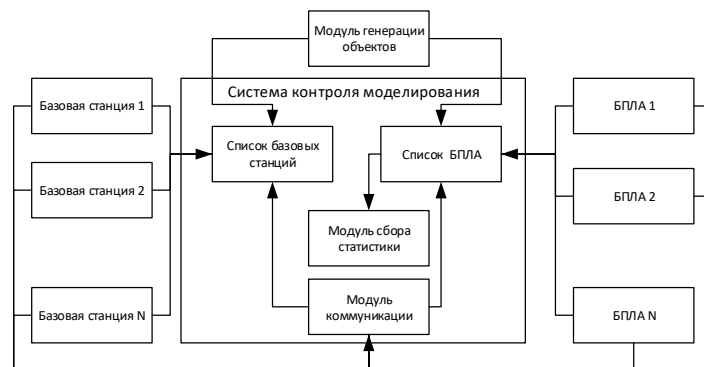


Рис. 2. Схема симулятора и взаимодействия элементов



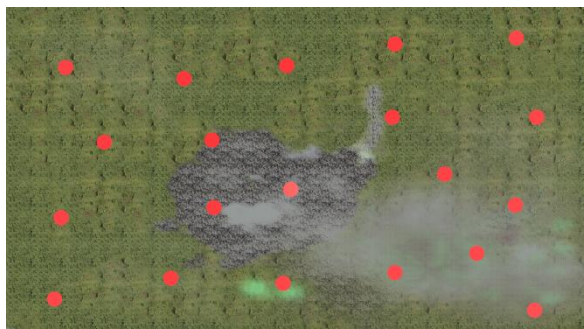


Рис. 3. Позиции возможных появлений станций с модулями подзарядки на карте

На рис. 4 представлена структурная схема модели БПЛА. Модуль генерации объектов последовательностью случайных чисел формирует путь, состоящий из точек облета базовых станций. Модуль формирования маршрутного задания принимает 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 данные с блока навигации 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 разрешенная 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.

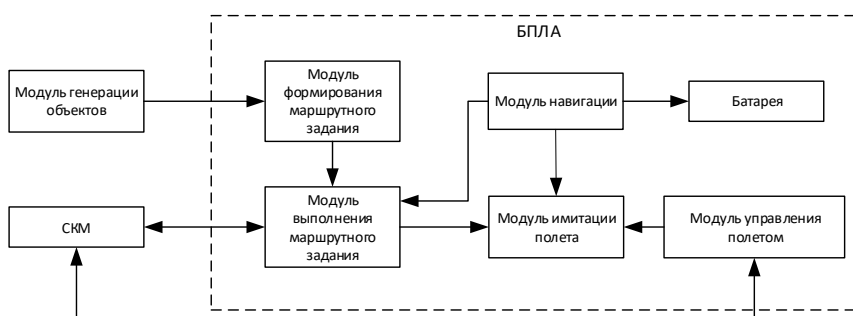


Рис. 4. Структурная схема моделируемого БПЛА

**Результаты численного исследования.** В данном разделе описывается 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, выделенных красным цветом. В начале каждого моделирования для заданного  $M$  случайным образом генерируется  $M$  положений модулей зарядки среди локальных областей расположения базовых станций; для фиксированного распределения положений модулей зарядки производится  $P$  моделирований для различных заданий типа (2) для каждого БПЛА, рассчитывается оценка критерия успешности выполнения по (7); причем положено  $P=10$ ,  $N=10$ ,  $K=6$ . В одном месте расположения станции обслуживания могут появиться несколько БПЛА. Для каждой миссии и каждого БПЛА генерировалось случайное маршрутное задание, состоящее из пяти обходных позиций. Максимальная скорость БПЛА была установлена равной в 10 км/ч. Стоит учесть, что зарядная станция на программном уровне в симуляторе создается путем включения соответствующего дополнительного режима для базовой станции. Для каждого числа зарядных станций  $M$  было проведено  $PC_K^M$  моделирований и рассчитывалось отношение, соответствующих различным распределениям модулей подзарядки по станциям обслуживания. На рисунке 5 представлена зависимость функционала  $F$  в (7), выражающего в нашем случае среднюю успешность выполнения миссий при фиксированном  $M$  модулей подзарядки, от  $M$ ; было принято  $M=1,2,\dots,K=6$ .

Из графика, приведенного на рис. 5, видно, что глобального оптимального значения оценка  $F^*$  достигает при числе модулей подзарядки, равном  $M_{opt}=5$ .

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

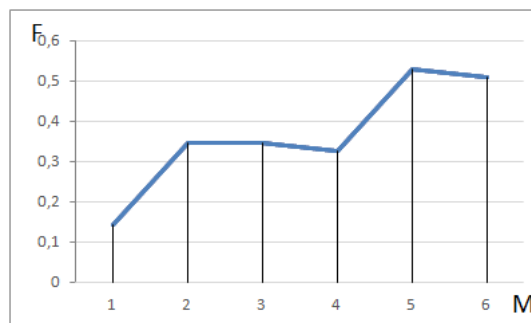


Рис. 5. График зависимости успешности выполнения задачи от количества зарядных станций

**Заключение.** В статье рассмотрен перспективный подход к 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  $M$ .

Разработаны модель движения БПЛА между пунктами назначения с учетом зависимости скорости расходования аппаратом энергии от его текущих кинематических величин, а также упрощенная модель станции обслуживания с модулем подзарядки, подразумевающим замену разряженных аккумуляторов

батарей. Предусмотрено падение аппарата в случае расходования им энергии ниже предельного порогового значения. Разработанное Программное обеспечение может быть эффективно интегрировано с алгоритмами планирования в трехмерной среде [20].

Адекватность рассмотренного подхода 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 приводится и обосновывается новая конструкция модуля подзарядки, использующего способ снятия разряженных и инсталляции заряженных АКБ в специальном боксе, отличающаяся от известных аналогичных конструкций большей простотой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Косова А.Е., Корилов А.М.* Автоматическая посадка малых беспилотных летательных аппаратов с использованием компьютерного зрения // Доклады ТУСУР. – Вып. № 3. – Т. 20. – С. 191-196.
2. *Нго К.Т., Нгуен В.В., Харьков И.Ю., Усина Е.Е., Шумская О.О.* Функциональная модель взаимодействия БЛА с наземной роботизированной платформой при решении сельскохозяйственных задач // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – Вып. 6-3. – С. 41-50.
3. *Musa Galimov, Roman Fedorenko, and Alexander Klimchik.* UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. – [https://www.researchgate.net/publication/342538741\\_UAV\\_Positioning\\_Mechanisms\\_in\\_Landing\\_Stations\\_Classification\\_and\\_Engineering\\_Design\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/342538741_UAV_Positioning_Mechanisms_in_Landing_Stations_Classification_and_Engineering_Design_Review).
4. Патент № RU 2710887 С1. Посадочная платформа для беспилотного летательного аппарата / *Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич.* 2020 г.
5. Патент RU 2722249 С1. Посадочная платформа для БПЛА вертикального взлета и посадки / *Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич.* 2020 г.
6. HEISHA DNEST2 // Heisha Technology. 23.03.2022. – URL: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (дата обращения: 23.03.2022).
7. Патент US9387928B1. Multi-use UAV docking station systemis and methods. Jul. 12, 2016.
8. Патент US 9,139,310 B1. Systems and methods for UAV battery exchange. Sep. 22, 2015.
9. Патент WO 2016/113766. AI electrically charging system for drones. 7 January 2016 (07.01.2016).
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». – 2015. – С. 115-122.
11. *Широков И.Б., Широкова Е.И., Азаров Андрей Андреевич.* Система беспроводной передачи энергии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 380-389.
12. *Костюков В.А., Медведев М.Ю., Бутенко М.Ю., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д.* Аппаратно-алгоритмическое обеспечение перспективной системы энергосбережения автономной группы БПЛА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 230-243.
13. *Vikas Hassija, Vinay Chamola, Dara Nanda Gopala Krishna and Mohsen Guizani.* A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications. – Fellow IEEE, 2020.
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. Костюков В.А., Пиухонов В.Х. The system of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations // Сб. трудов "Frontiers in Robotics and Electromechanics". – Изд-во Springer, 2022 (принято к публикации).
16. Нараянан Рагху (Raghu Nurayanan). Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9.
17. Фетисов В.С., Новикова К.О., Овчинников А.В. Подзарядка беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом-посадкой на контактных платформах с адаптируемой шириной контактных полос // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 80-89. – ISSN 1999-5458 (print).
18. Патент RU 2018129276, 09.08.2018. Станция автоматической замены аккумуляторов для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и способ ее использования / Семенов А.Г.
19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Изд-во «Наука», 1969. – 576 с.
20. Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially known environments // In Intelligent Unmanned Ground Vehicles. – Springer, Boston, MA, USA, 1997. – P. 203-220.

#### REFERENCES

1. Kosova A.E., Korikov A.M. Avtomaticheskaya posadka mal'kh bespilotnykh letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem komp'yuternogo zreniya [Automatic landing of small unmanned aerial vehicles using computer vision], *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], Issue No. 3, Vol. 20, pp. 191-196.
2. Ngo K.T., Nguen V.V., Khar'kov I.Yu., Usina E.E., Shumskaya O.O. Funktsional'naya model' vzaimodeystviya BLA s nazemnoy robotizirovannoy platformoy pri reshenii sel'skokhozyaystvennykh zadach [A functional model of UAV interaction with a ground-based robotic platform in solving agricultural problems], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, Issue 6-3, pp. 41-50.
3. Musa Galimov, Roman Fedorenko, and Alexander Klimchik. UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/342538741\\_UAV\\_Positioning\\_Mechanisms\\_in\\_Landing\\_Stations\\_Classification\\_and\\_Engineering\\_Design\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/342538741_UAV_Positioning_Mechanisms_in_Landing_Stations_Classification_and_Engineering_Design_Review).
4. Gabdullin Aydar Rinatovich, Galimov Musa Muzagitovich, Klimchik Aleksandr Sergeevich. Posadochnaya platforma dlya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Landing platform for unmanned aerial vehicle]. Patent No. RU 2710887 C1. 2020.
5. Gabdullin Aydar Rinatovich, Galimov Musa Muzagitovich, Klimchik Aleksandr Sergeevich. Posadochnaya platforma dlya BpLA vertikal'nogo vzleta i posadki [Landing platform for vertical take-off and landing UAVs]. Patent RU 2722249 C1. 2020.
6. HEISHA DNEST2, *Heisha Technology*. 23.03.2022. Available at: <https://www.heishatech.com/solutions/dnest-hardware-for-drone-in-a-box-solution/> (accessed 23 March 2022).
7. Patent US9387928B1. Multi-use UAV docking station systems and methods. Jul. 12, 2016.
8. Patent US 9,139,310 B1. Systems and methods for UAV battery exchange. Sep. 22, 2015.
9. Patent WO 2016/113766. AI electrically charging system for drones. 7 January 2016 (07.01.2016).
10. Fetisov V.S., Akhmerov Sh.R., Sizonenko R.V. Intellektual'naya kommutatsiya bortovykh posadochnykh elektrodov BpLA s otkrytymi kontaktnymi ploshchadkami zyaryadnoy platformy [Intelligent switching of on-board landing electrodes of a UAV with open contact pads of a vertical platform], *Vtoroy Vserossiyskiy nauchno-prakticheskiy seminar «bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta»* [The second All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned transport vehicles with elements of artificial intelligence"], 2015, pp. 115-122.
11. Shirokov I.B., Shirokova E.I., Azarov Andrey Andreevich. Sistema besprovodnoy peredachi energii [Wireless energy transmission system], *Infokommunikatsionnye i radioelektronnye tekhnologii* [Infocommunication and radioelectronic technologies], 2019, Vol. 2, No. 3, pp. 380-389.
12. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Butenko M.Yu., Gistsov V.G., Evdokimov I.D. Apparato-algoritmicheskoe obespechenie perspektivnoy sistemy energosberezheniya avtonomnoy gruppy BpLA [Hardware and algorithmic support for a promising energy saving system for an autonomous group of UAVs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 5, pp. 230-243.

13. *Vikas Hassija, Vinay Chamola, Dara Nanda Gopala Krishna and Mohsen Guizani*. A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications. *Fellow IEEE*, 2020.
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.A., Pshikhopov V.Kh.* The system of decentralized control of a group of mobile robotic means interacting with charging stations, *Sb. trudov "Frontiers in Robotics and Electromechanics"* [Collection of works "Frontiers in Robotics and Electromechanics"]. Izd-vo Springer, 2022 (accepted for publication).
16. *Narayanan Ragkhu (Raghu Narayanan)*. Vybor katushek dlya besprovodnykh zaryadnykh ustroystv [Selection of coils for wireless chargers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2015, No. 9.
17. *Fetisov V.S., Novikova K.O., Ovchinnikov A.V.* Podzaryadka bespilotnykh letatel'nykh apparatov s vertikal'nym vzletom-posadkoy na kontaktnykh platformakh s adaptiruemoi shirinoy kontaktnykh polos [Recharging unmanned aircraft vehicles with vertical take-off and landing on contact platforms with adaptable contact band width], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and information complexes and systems], 2023, Vol. 19, No. 2, pp. 80-89. ISSN 1999-5458 (print).
18. *Semenov A.G.* Stantsiya avtomaticheskoy zameny akkumulyatorov dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) i sposob ee ispol'zovaniya [Automatic battery replacement station for unmanned aerial vehicles (UAVs) and method of its use]. Patent RU 2018129276, 09.08.2018.
19. *Venttsel' E.S.* Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Izd-vo «Nauka», 1969, 576 p.
20. *Stentz A.* Optimal and efficient path planning for partially known environments, *In Intelligent Unmanned Ground Vehicles*. Springer, Boston, MA, USA, 1997, pp. 203-220.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

**Костюков Владимир Александрович** – АО НКБ «РиСУ»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; к.т.н.; с.н.с.

**Бутенко Максим Юрьевич** – e-mail: butenko@sfedu.ru; инженер.

**Гисцов Владислав Геннадьевич** – e-mail: giscov@sfedu.ru; инженер-исследователь.

**Евдокимов Игорь Дмитриевич** – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; инженер-исследователь.

**Kostyukov Vladimir Alexandrovich** – Joint-Stock Company "Robotics and Control Systems"; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Butenko Maxim Yurievich** – e-mail: butenko@sfedu.ru; engineer.

**Gistsov Vladislav Gennadievich** – e-mail: giscov@sfedu.ru; research engineer.

**Evdokimov Igor Dmitrievich** – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; research engineer.

УДК 004.272.44

DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-150-162

**И.И. Левин, Д.А. Сорокин, А.В. Касаркин**

### **АРХИТЕКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЦФВМ**

*Статья посвящена проблемам развития цифровых фотонных вычислительных машин, которые наряду с квантовыми компьютерами являются одним из возможных способов преодоления кризиса производительности вычислительной техники. Реализация обработки данных в цифровых фотонных вычислительных машинах на частотах терагерцового уровня потенциально обеспечивает производительность, превосходящую на два и более*