

Раздел IV. Вычислительные и информационно-управляющие системы

УДК 621.31:533.65.013.622

DOI 10.18522/2311-3103-2022-5-230-243

М.Ю. Медведев, В.А. Костюков, М.Ю. Бутенко, В.Г. Гисцов, И.Д. Евдокимов АППАРАТНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ГРУППЫ БПЛА

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 станций подзарядки БПЛА, обеспечивающих необходимую универсальность в обслуживании разных типов аппаратов. Рассматриваются наиболее эффективные варианты систем приземления, точного позиционирования, выработки энергии на станции, а также обосновывается гибридная система обеспечения подзарядки, сочетающая контактный и бесконтактный способы. Приводится обобщенная схема многоэтапного взаимодействия БПЛА со станцией подзарядки, предусматривающая возможность повторения одного из этапов в случае не полного его завершения в течение определенных интервалов времени, а также учитывающая особенности взаимодействия между агентами по доступным им каналам связи. Поставлена и решена задача оптимального распределения по энергетическому критерию БПЛА группы между пунктами назначения (ПН), совмещенными со станциями подзарядки (СП). Учитывается как крейсерский режим, так и маневрирование аппарата при взлете и посадке, когда мощность расходования энергии возрастает. Введено понятие эффективного расстояния до пункта назначения, учитывающего оценочные затраты энергии каждого БПЛА на достижение данного ПН с учетом его произвольного текущего положения и имеющейся очереди заданий на данный момент. Для исследования разработанных подходов и алгоритмов целераспределения и планирования движения БПЛА группы создано и апробировано программное обеспечение на базе среды Unity. Гибкость последнего позволяет моделировать различные алгоритмы информационных взаимодействий элементов внутри группы БПЛА, группы СП, а также перекрестных взаимодействий между БПЛА и СП. В частности, Программное обеспечение позволяет определять в каждый дискретный момент степень заряда каждого БПЛА, очереди ПН для каждого БПЛА, его историю пополнения заряда на станциях.

БПЛА; станция зарядки; гибридная система подзарядки; энергетическая эффективность функционирования; алгоритм целераспределения; оптимизация; Unity.

M.Y. Medvedev, V.A. Kostyukov, M.Y. Butenko, V.G. Gistsov, I.D. Evdokimov THE CONCEPT OF CREATING A PROMISING SYSTEM FOR RECHARGING AN AUTONOMOUS GROUP OF 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 UAV charging stations that provide the necessary versatility in servicing different types of vehicles. The most effective variants of landing systems, precise positioning, power generation at the station are considered, and a hybrid charging system combining contact and contactless

methods is also justified. A generalized scheme of multi-stage interaction of the UAV with the charging station is given, which provides for the possibility of repeating one of the stages if it is not fully completed within certain time intervals, and also takes into account the peculiarities of interaction between agents through the communication channels available to them. The problem of optimal distribution according to the energy criterion of the group's UAVs between destinations (PN) combined with charging stations (SP) has been set and solved. Both the cruising mode and the maneuvering of the vehicle during takeoff and landing, when the power consumption increases, are taken into account. The concept of the effective distance to the destination is introduced, taking into account the estimated energy costs of each UAV to reach this destination, taking into account its arbitrary current position and the available queue of tasks at the moment. To study the developed approaches and algorithms for targeting and planning the movement of the group's UAVs, software based on the Unity environment was 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 charging stations, as well as cross-interactions between UAVs and charging stations. In particular, the software allows you to determine at each discrete moment the degree of charge of each UAV, the queues of destinations for each UAV, its history of recharge at stations.

UAV; charging station; hybrid charging system; energy efficiency of functioning; target allocation algorithm; optimization; Unity.

Введение. В связи с ростом объемов использования групп автономно функционирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных природных и инфраструктурных условиях решение проблемы оптимизации функционирования таких групп по критерию минимума затрачиваемой ими энергии является актуальной научно-производственной задачей. Одним из важных аспектов решения этой проблемы является разработка облика перспективной станции подзарядки, способной в автономном режиме восполнять энергетические потери элементов указанных групп. При этом необходимо учитывать технические характеристики БПЛА группы, а также требование минимальности отношения «цена/ качество». Кроме того, разработка перспективной 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, или специальной реечной системой доводки БПЛА до области подзарядки [5, 6].

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.

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 крите-

рию, такого взаимодействия, учитывающего особенности реализуемой группой БпЛА миссии, ограничения каналов связи, а также, возможно, опыт такой реализации в прошлом.

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 нецелесообразно использовать ветроэнергетические установки (ВЭУ) совместно с солнечными панелями.

Большую роль здесь могут сыграть вертикально-осевые ВЭУ, не требующие устройства ориентации по ветру и менее шумные, по сравнению с горизонтально-осевыми установками [12]. В работах [13, 14] показаны энергетические эффективности модифицированного ротора ВЭУ типа Дарье и установки планетарного типа, соответственно; в статье [12] обосновано применение вертикально-осевого ротора специального типа со статическими направляющими аэродинамическими структурами.

В случае сниженных требований по степени создаваемого акустического и инфракрасного шумов возможно применение горизонтально-осевых ВЭУ [15, 16], которые имеют больший коэффициент использования энергии ветра по сравнению с вертикально-осевыми установками, но в узком диапазоне скоростей [13, 14].

В работе [17] рассматривается диалоговая модель взаимодействия станции подзарядки с БпЛА группы, позволяющая обеспечить безопасную и надежную покупку БпЛА энергии у станции. В работе [18] решается задача максимизации времени функционирования каждого БпЛА группы на основе решения соответствующей задачи коммивояжера. В статье [19] 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 интеграции нескольких видов подзарядки БпЛА для обеспечения необходимой универсальности в обслуживании разных типов аппаратов, а также предлагается постановка и решение при некоторых ограничениях задачи оптимального распределения БпЛА группы между пунктами назначения, совмещенными со станциями подзарядки, по энергетическому критерию.

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. К первым относятся: а) зарядка без извлечения АКБ; б) замена разряженных АКБ на заряженные.

Преимуществом контактной зарядки является высокий КПД. При этом механическая часть контактной системы зарядки по способу а) значительно более проста по сравнению с соответствующей частью по способу б): в первом случае требуется только подвижная клемма с одной степенью свободы, которая должна пристыковываться к соответствующим разъемам АКБ [4], а по второму способу требуется две специальные подсистемы: манипуляционная с минимум двумя степенями свободы и конвейерная подсистема отвода разряженных АКБ и подвода заряженных [8]. Однако время нахождения БпЛА на станции для подзарядки АКБ по первому способу больше, чем по второму (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих способов автоматической зарядки

Основные характеристики способа	Контактный способ подзарядки		Бесконтактная зарядка
	зарядка без извлечения АКБ	замена разряженных АКБ на заряженные	
Тип модуля для механических перемещений подвижных частей	Подвижная клемма	Манипулятор	Актuator
Число подвижных элементов	2 и более	3 и более	1
КПД, %	около 100	около 100	70 и ниже
Наличие мощного вычислительного модуля	нет	да	нет
Возможность заряда АКБ при неточном позиционировании	нет	нет	да
Время ожидания БПЛА на примере моделей модель 1: <i>DJI mavic mini</i> модель 2: <i>DJI matrice 300</i>	Большое 90-150 мин – модели 1, 60-120 мин – модели 2	Малое до 1 мин – для модели 1, 1-2 мин – для модели 2	Большое 180-600 мин – для модели 1, 180-600 – для модели 2
Наличие приёмника-передатчика для обмена информацией	нет	нет	да

Для контактной подзарядки важное значение играет синхронизация действий устройства подключения штекера к АКБ для способа а), или манипуляций с разряженной и ранее заряженной АКБ для способа б), – с ответным устройством на борту БПЛА. Такая синхронизация может быть осуществлена с помощью приёмопередатчиков, установленных на наземной станции и борту БПЛА.

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 [20]. 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.

В табл. 1 произведено сравнение основных характеристик автоматизированных способов зарядки АКБ мультикоптеров.

Для оценки ожидаемых интервалов времени подзарядки по трем способам рассмотрены две модели БПЛА: *DJI mavic mini* и *DJI matrice 300*, для которых были взяты соответствующие данные производителя. Из приведенных данных видно превышение времени подзарядки по контактному штекерному и бесконтактному способам на два порядка, по сравнению со способом замены АКБ.

В настоящей статье предлагается гибридный способ подзарядки БПЛА, подразумевающий использование контактного способа заряда АКБ для БПЛА с требованием минимального времени обслуживания, и бесконтактного способа для тех классов аппаратов, для которых по регламенту допустимо значительно большее время обслуживания на станции.

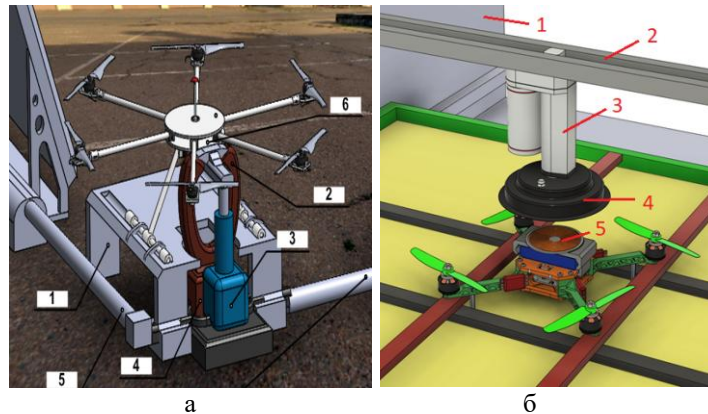


Рис. 1. Модели предлагаемых контактной (слева) и бесконтактной (справа) подсистем подзарядки АКБ БПЛА на станции

Для контактного способа подзарядки предлагается использовать следующую обобщенную подсистему (см. рис. 1,а). После фиксации корпуса БПЛА на стыковочной площадке 1, происходит выдвижение манипуляционного агрегата 3, который может осуществлять два типа операций: для случая замены АКБ – изъятие батареи из аккумуляторного отсека и последующую установку на освободившееся место уже заряженной на станции батареи; для случая подзарядки АКБ на борту аппарата – просто стыковка АКБ с зарядным устройством станции.

Аккумуляторный отсек БПЛА может быть снабжен, во-первых, устройством фиксации батареи в полетном режиме, во-вторых, – устройством открытия-закрытия заслонки, расположенной в этом отсеке со стороны подхода манипуляционного агрегата. Незадолго до приземления БПЛА, между бортом и блоком управления станции устанавливается радиосвязь (или другой вид связи, например, с помощью лазера) с целью синхронизации работы заслонки, фиксатора и манипуляционного агрегата. Сразу после позиционирования БПЛА на стыковочной площадке сначала происходит открытие заслонки, затем, через несколько секунд, манипулятор начинает действия по замене батарей. Для этого он стыкуется также с агрегатом снятия-подачи батарей – специальным конвейером (2), соединенным с устройством непосредственной зарядки АКБ (4). Последний получает энергию по каналам 5 от источников энергии станции. Этот конвейер подает заряженные и отводит разряженные батареи, которые снимаются манипуляционным агрегатом с аккумуляторного отсека (6) БПЛА.

Предлагаемая для бесконтактного способа подзарядки приближенная сборочная модель приведена на рис. 1,б. Устройство включает балку 2, жестко закрепленную на корпусе 1 площадки стыковки; по балке перемещается линейный актуатор 3, позволяющий перемещать вертикально приемопередатчик электромагнитной системы бесконтактной подзарядки 4. Запас хода последнего должен обеспечивать полное соприкосновение и прижатие к ответной приемной части 5 БПЛА, представляющей собой катушку индуктивности специальной формы, электрически связанную через специальный коммутатор с АКБ. По завершении зарядки бортовая система управления БПЛА автоматически отключает АКБ от приемника. После некоторого промежутка времени также отключается и передатчик станции, который синхронизирован с бортовым приемником с помощью специального bluetooth-канала.

Обобщенный алгоритм взаимодействия БПЛА и станции. Процесс взаимодействия состоит из трех этапов: приземления, позиционирования и непосредственно подзарядки. На каждом из этапов происходит вначале синхронизация действий БПЛА и станции: на первом этапе может быть использован радиоканал или луч лазера (канал 1 на рис. 2), а на последних двух целесообразно задействовать bluetooth-канал (канал 2).

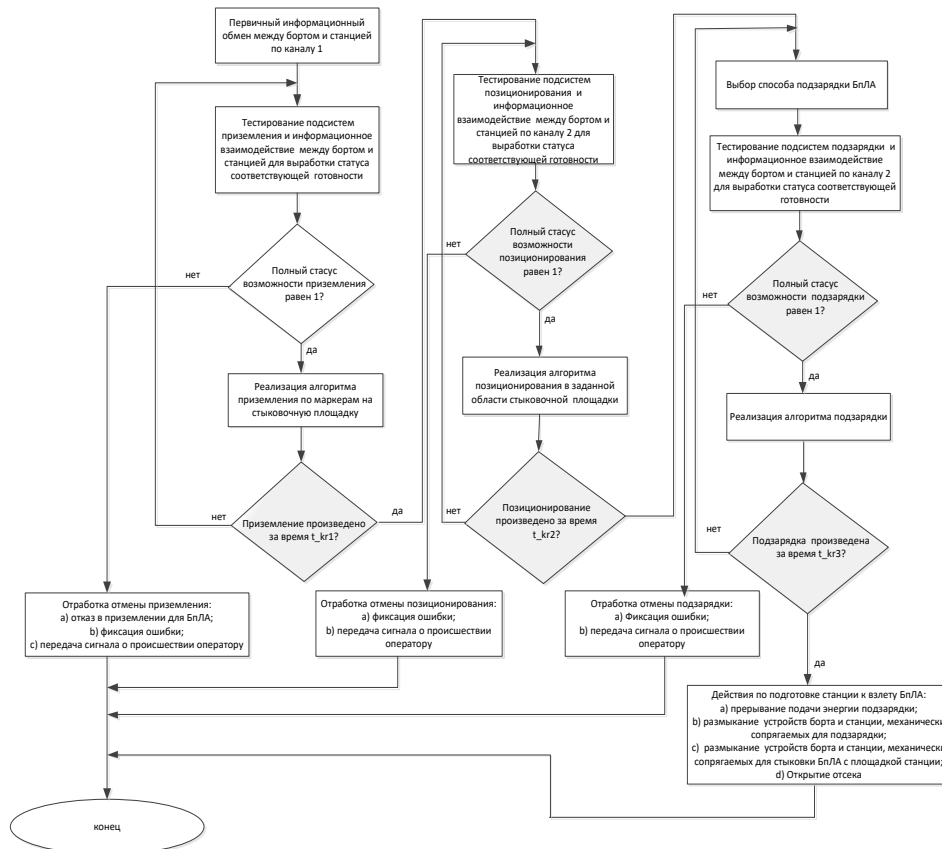


Рис. 2. Блок-схема обобщенного алгоритма взаимодействия БПЛА и станции подзарядки

Блок схема обобщенного алгоритма взаимодействия БПЛА и станции в процессе подзарядки приведена на рис. 2. Агенты тестируют свои собственные подсистемы, осуществляющие текущий этап, и передают полученную информацию друг другу. На каждую попытку реализации этапа отводится определенное время ($t_{кр1}$, $t_{кр2}$, $t_{кр3}$ – для первого, второго и третьего этапов), по истечении которого, если этап не был завершен успешно, производится новая попытка его осуществления. Если тестирование показало невозможность осуществления этапа, тогда происходит аварийное его прерывание, фиксация соответствующей ошибки с сообщением сведений о ней оператору.

Особенности алгоритмического обеспечения системы управления группой БПЛА, курсирующих между пунктами назначения с возможностью подзарядки. Дана однородная группа БПЛА заданного класса в количестве K штук, которая курсирует между N стационарными пунктами назначения $S_i, i=1, \dots, N$. Каждый

БПЛА забирает некоторый груз на одной из станций и отвозит на другую. Для определенности БПЛА группы будем считать работающими на электрических двигателях с накоплением энергии в аккумуляторах. Каждый из пунктов назначения снабжен системой подзарядки БПЛА. Каждый БПЛА может иметь максимальную энергию заряда $E_{0\max}$. Стационарные пункты расположены друг относительно друга таким образом, чтобы любой БПЛА, находящийся в произвольном пункте назначения S_{i1} , мог достигнуть любого другого пункта с номером S_{i2} , $i_2 \neq i_1$ без необходимости приземляться для подзарядки. Если каждый БПЛА в режиме полета с оптимальной крейсерской скоростью v_{kr} расходует энергию заряда с мощностью P_{kr} , то тогда наибольшее расстояние между пунктами назначений должно быть ограничено сверху значением $l_{\sup} = k_E \frac{E_{0\max}}{P_{kr}} v_{kr}$, где коэффициент

$k_E = k_{E1} + k_{E2} < 1$ учитывает два фактора. Во-первых, в реальности за счет фаз ускоренного движения при взлете, посадке средняя мощность расходования энергии будет несколько больше, чем величина P_{kr} для крейсерского режима, что учитывается фактором $k_{E1} < 1$. Второй фактор $k_{E2} < 1$ состоит в том, что реальная траектория движения аппарата не является прямым отрезком, соединяющим два пункта назначения.

Оператор, находящийся на некотором наземном пункте, периодически, в дискретные моменты времени t_q , $q = 1, 2, \dots, U$, выдает задания на перевозку грузов из одних пунктов назначения в другие, что формируется в виде пакета:

$$\left[(j_1^{q,1} j_2^{q,1}), (j_1^{q,2} j_2^{q,2}), \dots, (j_1^{q,M_q} j_2^{q,M_q}) \right] \# \quad (1)$$

где, например, пара $(j_1^{q,1} j_2^{q,1})$ – обозначение элементарного задания по перевозке груза из пункта с номером $j_1^{q,1}$ в пункт назначения с номером $j_2^{q,1}$ и т.д.; M_q – число назначенных в момент t_q элементарных заданий. Затем оператором либо самой группой БПЛА решается задача распределения БПЛА группы между введенными парами пакета (1). При этом задействуются в общем случае все БПЛА, в том числе и те, которые на момент t_q находятся в процессе выполнения задания.

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

Рассмотрим алгоритм взаимодействия между БПЛА и станциями подзарядки. БПЛА в процессе функционирования постоянно оценивает оставшуюся энергию для возможности достижения целевого пункта назначения, соответствующего текущему элементарному заданию. Если оцениваемой энергии недостаточно для достижения целевой точки, тогда принимается решение о поиске ближайшей станции подзарядки, находящейся на ближайшем ПН.

В процессе выбора подходящей станции подзарядки каждый БПЛА может использовать алгоритм, рассмотренный в работе [19]. Он подразумевает учет двух факторов: а) текущие пространственное положение БПЛА относительно каждой станции подзарядки и характеристики самих станций подзарядки, заявляемые последними; б) предысторию процесса взаимодействия БПЛА с каждой станцией, что выражается соответствующими взвешенными коэффициентами.

Если возникает ситуация, что два и более БПЛА выбрали одну и ту же станцию подзарядки, тогда конфликт разрешается с помощью очередности поступления сигнала от БПЛА до станции подзарядки: более ранний сигнал дает право более быстрого доступа к СП. Таким образом, возможно формирование очередей на подзарядку на СП, и возникновение времени ожидания, что является неизбежным для данного алгоритма и является платой за его простоту.

Основная задача функционирования группы БПЛА заключается в том, чтобы за ограниченное время выполнить все задания. С учетом требования достаточной автономности функционирования группы БПЛА решение этой задачи сводится к оптимизации функционирования группы по энергетическому критерию.

Транспортные связи между пунктами назначения, соответствующие элементарным заданиям, можно выразить в виде графа, вершины которого обозначают пункты назначения, а ребра – соответствующие назначенные задания на данный момент времени, показаны сплошными линиями (рис. 3). При этом новые элементарные задания пришедшего пакета есть (см. (2)):

$$[(S_1S_2), (S_8S_2), (S_2S_5), (S_3S_4), (S_3S_6), (S_7S_3), (S_8S_1), (S_6S_1)] \# \quad (2)$$

На этом же рисунке для некоторой миссии указаны также: текущие положения БПЛА на момент t_q прихода нового задания (показаны сплошными кружками).

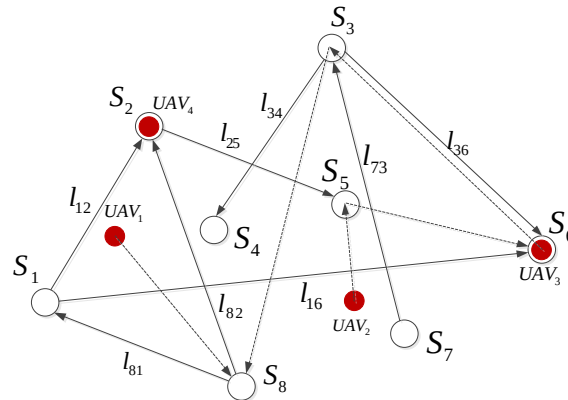


Рис. 3. Графовое представление совокупности положений ПН, БПЛА, элементарных заданий в очереди, а также текущих заданий сразу после прихода нового пакета в момент t_q

В результате решения задачи распределения элементарных заданий нового пакета между элементами группы БПЛА, последние получают новые задания. Каждое новое задание становится актуальным для данного БПЛА, если он на момент прихода нового задания был свободным. Если же БПЛА уже выполняет некоторое задание, то ему новое может быть поставлено в очередь. Для примера пунктирными линиями показаны траектории БПЛА, назначенные им алгоритмом целераспределения и которые они должны пройти с учетом уже имеющихся в их очередях заданий. Так, БПЛА-1 должен достичь пункта назначения S_8 ; БПЛА-2 – S_5 и затем S_6 ; БПЛА-3 находится на станции S_6 , должен достичь S_3 , а затем S_8 ; БПЛА-4 находится в S_2 и все текущие задания у него выполнены.

Рассмотрим оптимизационную задачу минимизации суммарной энергии, затрачиваемой всеми БПЛА на выполнение задачи достижения целевых пунктов назначения.

Оптимизационная задача распределения БПЛА группы между назначенными элементарными заданиями по энергетическому критерию. Рассмотрим задачу распределения БПЛА в количестве N штук (точки $\{X_i\}, i=1, 2, \dots, N$), между пунктами назначения (ПН) в количестве $M=N$ штук (точки $\{Y_j\}, j=1, 2, \dots, M$) по критерию минимума полной затрачиваемой ими энергии. Введем в рассмотрение целочисленную функцию $\xi(q, i, m), m=1, \dots, M_{q,i}$, перечисляющую номера всех тех ПН, которые поставлены в очередь i -му БПЛА на q -м шаге обновления (в момент t_q) в количестве $M_{q,i}$ штук.

Если для i -го БПЛА поставить в очередь некоторый пункт назначения Y_j , соответствующий начальной точке одного из элементарных заданий присланного пакета структуры (1), тогда оценка затраченной аппаратом энергии на достижение ПН Y_j может быть представлена в следующем виде:

$$E_{i,j} = \frac{|Y_{\xi(q,i,1)} - X_i|}{v_{kr}} P_{kr} + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} \left[\frac{|Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}|}{v_{kr}} P_{kr} \right] + \frac{|Y_j - Y_{\xi_{next}}|}{v_{kr}} P_{kr} + \left(\frac{P_{kr}}{k_{E1,0}} \Delta t_{tl} \right) M_{q,i} \quad (3)$$

где $\xi_{next} = \xi(u, i, M_{q,i})$. Здесь первое слагаемое соответствует затратам энергии i -го БПЛА на достижение ранее назначенного ПН $Y_{\xi(q,i,1)}$, стоящего первым в очереди без учета маневров посадки и взлета; второе соответствует затратам на движение БПЛА между всеми остальными целевыми точками в его очереди без учета этих маневров, третье – затратам на движение из последней точки в очереди $Y_{\xi_{next}}$ до гипотетической точки отправления Y_j некоторого нового элементарного задания, опять без учета маневров. Наконец, четвертое слагаемое в (3) соответствует учету указанных маневров для всех ПН в очереди, причем $k_{E1,0}$ – есть средний коэффициент увеличения мощности при таких маневрированиях, Δt_{tl} – суммарное время посадки и взлета без учета времени возможной подзарядки БПЛА. Параметры $\Delta t_{tl}, k_{E1,0}$ для простоты считаются одними и теми же для всех БПЛА группы.

Тогда оптимизационная задача формулируется так:

$$s_E = \sum_{i=1}^N E_{i,\eta(i)} \rightarrow \min, \quad \eta_{opt} = \underset{\{\eta\}}{argmin} s_E \quad (4)$$

где $\eta(i)$ – функция распределения номеров $i=1, 2, \dots, N$ БПЛА по номерам станций $j=1, 2, \dots, N$.

Заметим, что энергия $E_{i,j}$ в (3) пропорциональна следующему функционалу:

$$\rho_e(X_i, Y_j, q) = \frac{v_{kr}}{P_{kr}} E_{i,j} = |Y_{\xi(q,i,1)} - X_i| + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} |Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}| + \left(\frac{M_{q,i}}{k_{E1,0}} \right) v_{kr} \Delta t_{tl} + |Y_j - Y_{\xi_{next}}| \quad (5)$$

Введенный функционал $\rho_e(X_i, Y_j, q)$ назовем эффективным расстоянием до пункта назначения Y_j с учетом текущего положения БПЛА и всех заданий в его очереди на q -м шаге обмена информацией. Сумму первых трех слагаемых в (5) назовем начальным расстоянием ρ_{e0} для i -го БПЛА на q -м шаге обмена информацией:

$$\rho_{e0}(X_i, q) = |Y_{\xi(q,i,1)} - X_i| + \sum_{k=1}^{M_{q,i}-1} |Y_{\xi(q,i,k)} - Y_{\xi(q,i,k+1)}| + \left(\frac{M_{q,i}}{k_{E1,0}}\right) v_{kr} \Delta t_{tl} \# \quad (6)$$

где $\xi_{next} = \xi(q, i, M_{q,i})$. Тогда (4) может быть переписано в виде:

$$s_E = \sum_{i=1}^N [\rho_{e0}(X_i, q) + |Y_{\eta(i)} - Y_{\xi_{next}}(q, i)|] \rightarrow \min \# \quad (7)$$

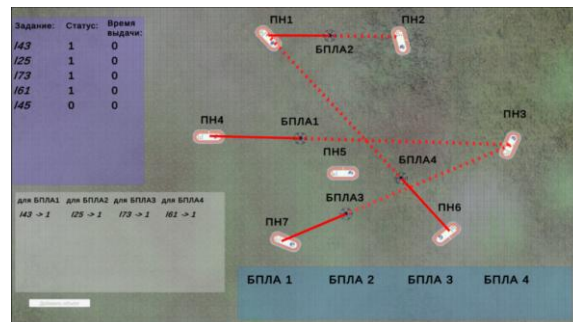
Данная задача для $N \leq 10$ может быть решена методом непосредственного перебора соответствующих вариантов перестановок $N!$.

Программный комплекс моделирования движений БПЛА группы между пунктами назначения с возможностью пополнения энергии на станциях подзарядки. Для моделирования движений БПЛА группы между пунктами назначения с возможностью пополнения энергии на станциях подзарядки реализован программный модуль в среде Unity. Модуль позволяет создавать подгруппы: пунктов назначения (ПН), станций подзарядки (СП), а также подгруппу БПЛА, элементы которой курсируют между ПН, перевозя грузы, и могут приземляться на СП для восполнения энергии. Время подзарядки было взято соответствующим способом замены АКБ – без учета маневров приземления и посадки составляющим порядка $t_{30}=30$ с. Ниже рассмотрен случай, когда каждая СП совмещена с некоторым ПН. Также в начальный момент положения БПЛА совпадают с соответствующими станциями. Модель расходования энергии каждым БПЛА соответствует ранее рассмотренной в п. 4; для всех БПЛА было положено: $\Delta t_{tl} = 60$ с, $k_{E1,0} = 0,3$, $v_{kr} = 15$ м/с.

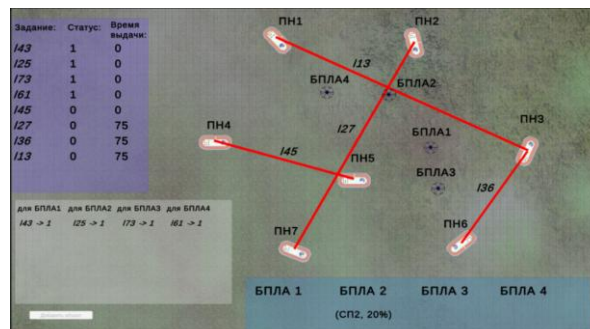
Симулятор позволяет моделировать: взаимодействие оператора с группой БПЛА, выраженное в передаче в произвольные дискретные моменты времени пакетов заданий в виде (1); целераспределение ПН между аппаратами по энергетическому критерию (7) с учетом их текущих положений и пунктов назначений, имеющих в очереди каждого из них; принятие решений каждым БПЛА о необходимости подзарядки на некоторой СП согласно методике, изложенной в [19]; планирование перемещений аппаратов с учетом назначенных им заданий и основных их ТТХ.

На рис. 4 показаны положения БПЛА относительно стационарных пунктов назначения в момент времени $t_1=25$ мин после получения первого пакета заданий в момент $t_0=0$. Сплошными линиями показаны уже пройденные участки траекторий, спланированных для аппаратов после решения задачи о назначениях по критерию (7); пунктирными – оставшиеся участки траекторий до достижения ближайшего для каждого БПЛА ПН. Также выводится информация о статусе элементарных заданий: значение 0 означает выработано и назначено, но соответствующий БПЛА пока не приступил к выполнению; значение 1 – один из аппаратов получил назначение и приступил к выполнению этого задания; 2 – данное задание выполнено.

Далее, в момент времени $t_2=75$ мин приходит новый пакет заданий: $[l_{13}, l_{36}, l_{27}]$; ребра графа, соответствующие новым заданиям, выделяются сплошными линиями (рис. 5). Четыре элементарных задания имеют статус «0», поскольку от предыдущего пакета осталось одно нераспределенное задание l_{45} . К моменту t_2 все ранее назначенные задания имеют статус «в процессе выполнения». После этого решается задача соответствующего целераспределения.

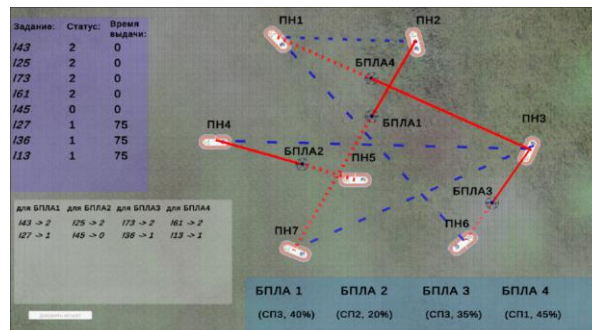
Рис. 4. Состояние выполнения миссии на момент $t_1=25$ мин

На рис. 6 показано состояние выполнения миссии на момент $t_3=100$ мин, когда БПЛА-1 один раз пополнил запасы энергии на СПЗ в размере 40% от полного заряда АКБ, БПЛА 2 – на СП2 с пополнением энергии в размере 20% от полного заряда, БПЛА 3 – на СП3 с пополнением энергией на 35%, БПЛА 4 – на СП1 с пополнением энергией на 45%.

Рис. 5. Состояние выполнения миссии на момент назначения $t_2=75$ мин второго пакета заданий

В момент t_3 элементарные задания (l_{43} , l_{25} , l_{73} , l_{61}) выполнены, (l_{13} , l_{36} , l_{27}) – в процессе выполнения, а l_{45} пока не стало выполняться.

Таким образом, созданный программный комплекс может быть эффективно использован для разработки и оптимизации по энергетическому критерию алгоритмов планирования движений БПЛА при перемещениях между пунктами назначения с учетом станций подзарядки.

Рис. 6. Состояние выполнения миссии на момент $t_3=100$ мин

Заключение. В настоящей статье развивается новый подход интеграции нескольких видов подзарядки БПЛА для обеспечения необходимой универсальности в обслуживании разных типов аппаратов, приведена соответствующая обобщенная блок-схема алгоритма трехэтапного взаимодействия, учитывающая фазы приземления, позиционирования и подзарядки БПЛА на станции.

Предлагается постановка и решение новой задачи оптимального распределения БПЛА группы между пунктами назначения по критерию минимальности энергетических затрат группой БПЛА при выполнении ею миссии с учетом как крейсерского режима, так и маневрирования при взлете и посадке.

Для исследования созданной концепции разработано программное обеспечение на базе среды Unity, приведены результаты соответствующего моделирования, подтверждающие эффективность программы для апробации различных алгоритмов взаимодействия БПЛА группы с пунктами назначения и станциями подзарядки.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант «Исследование путей и методов оптимизации систем управления неоднородных робототехнических комплексов по критерию энергоэффективности», № 22-29-00370.

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.
4. Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич. Посадочная платформа для беспилотного летательного аппарата / Патент № RU 2710887 C1, 2020 г.
5. Габдуллин Айдар Ринатович, Галимов Муса Музагитович, Климчик Александр Сергеевич. Посадочная платформа для БПЛА вертикального взлета и посадки / патент RU 2722249 C1, 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 SYSTEMS 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. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pavlenko D.D., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 10. – С.599-608. – DOI: 10.17587/mau.21.599-608.

13. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 325-333.
14. Михненко Л.В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа // Научный вестник МГТУ. – 2008. – № 125. – С. 22-24.
15. Ying P., Chen Y.K., Xu Y.G., Tian Y. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine // *Applied Energy*. – Vol. 146. – P. 74-83.
16. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system // *Renewable Energy*. – August 2016. – Vol. 94. – P. 547-557.
17. 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.
18. 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.
19. Костюков В.А., Пишихонов 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).
20. Нараянан Рагху (Raghu Nuraayan). Выбор катушек для беспроводных зарядных устройств // Компоненты и технологии. – 2015. – № 9.

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.
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 zaryadnoy 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., Pavlenko D.D., Mayevsky A.M., Poluyanovich N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21, No. 10, pp. 599-608. DOI: 10.17587/mau.21.599-608.
13. Gorelov D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor) [Energy characteristics of the Darye rotor (review)], *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and aeromechanics], 2010, Vol. 17, No. 3, pp. 325-333.
14. Mikhnenkov L.V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa [Wind power plant of planetary type], *Nauchnyy vestnik MGTU* [Scientific Bulletin of MSTU], 2008, No. 125, pp. 22-24.
15. Ying P., Chen Y.K., Xu Y.G., Tian Y. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine, *Applied Energy*, Vol. 146, pp. 74-83.
16. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system, *Renewable Energy*, August 2016, Vol. 94, pp. 547-557.
17. 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.
18. 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.
19. 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).
20. Narayanan Ragkhu (Raghu Nurayanan). Vybory katushek dlya besprovodnykh zaryadnykh ustroystv [Selection of coils for wireless chargers], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2015, No. 9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор О.А. Агеев.

Медведев Михаил Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371694; кафедра ЭиМ, НИИ РИПУ; д.т.н.; профессор; с.н.с.

Костюков Владимир Александрович – e-mail: vakostukov@sfedu.ru; тел.: +79054787016; кафедра ЭиМ, НИИ РИПУ; к.т.н.; доцент; м.н.с.

Бутенко Максим Юрьевич – НИИ РИПУ; e-mail: butenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; инженер.

Гисцов Владислав Геннадьевич – e-mail: giscov@sfedu.ru; тел.: +79515057398; техник.

Евдокимов Игорь Дмитриевич – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; тел.: +79182235832; техник.

Medvedev Mikhail Yurievich – Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694, the department of E&M; Research Institute of RiPU; dr. of eng. sc.; professor; senior researcher.

Kostyukov Vladimir Alexandrovich – e-mail: vakostukov@sfedu.ru; phone: +79054787016; the department of E&M, Research Institute of RiPU; cand. of eng. sc.; associate professor; junior researcher.

Butenko Maxim Yurievich – Research Institute of RiPU; e-mail: butenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; engineer.

Gistsov Vladislav Gennadievich – e-mail: giscov@sfedu.ru; phone: +79515057398; technician.

Evdokimov Igor Dmitrievich – e-mail: ievdokimov@sfedu.ru; phone: +79182235832; technician.