

## Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-175-189

**В.А. Костюков, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, Е.Ю. Косенко**

### **ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ПОДЗАРЯДКИ ГРУППЫ БЛА\***

*В настоящее время началось активное использование групп роботов для решения целого ряда задач гражданского и военного назначений. В этой связи возникают проблемы, связанные с групповым управлением, организацией надежных каналов связи и обеспечением эффективного функционирования группы при ограниченных энергетических ресурсах. При решении задачи об оптимизации энергопотребления возникает проблема повышения эффективности взаимодействия элементов группы со стационарными станциями подзарядки. Эта проблема может быть решена только при рассмотрении объединенной системы, в которую входят роботы и станции подзарядки. Централизованное управление такой системой оправдано в случае небольшого числа ее элементов. Однако с ростом числа элементов группы повышается сложность управления, поэтому более приоритетным решением становится сочетание централизованного и децентрализованного методов управления. В комплекс проблем децентрализованного управления такой группой входит задача организации оптимального взаимодействия её элементов с целью достижения цели своего функционирования. При организации энергетического обмена между роботами и станциями подзарядки решение этой задачи играет ключевую роль в оптимизации энергопотребления. В данной статье работе разрабатывается концепция взаимодействия подвижных и стационарных объектов, подразумевающая возможность выбора каждым агентом взаимодействия соответствующего компаньона. Такой выбор производится с учетом текущего состояния системы и оценки истории результатов взаимодействия. Разработанная концепция детализируется для системы, включающей БЛА и станции их подзарядки. Предлагается алгоритм децентрализованного выбора пар взаимодействующих элементов «БЛА– станция подзарядки» на основе двух показателей – энергетической эффективности процесса заряда, и времени, затрачиваемого БЛА на достижение целевой точки. Оба показателя учитываются при выборе весовых коэффициентов, назначаемых каждой станции подзарядки в качестве степеней её эффективности. Также данные показатели входят в оптимизируемый критерий качества. Разработана процедура оптимизации, результатом которой является номер станции подзарядки, наиболее подходящей данному мобильному объекту для взаимодействия.*

*Децентрализованное управление; нейросетевые системы контроля; беспилотные летательные аппараты; энергопотребление; станции подзарядки; ветроэнергетические установки.*

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-1900001 П, реализуемого в Южном федеральном университете.

V.A. Kostjukov, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, E.Yu. Kosenko

### THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP

*Currently, the active use of groups of robots has begun to solve a number of tasks for civil and military purposes. In this regard, problems arise associated with group management, the organization of reliable communication channels and ensuring the effective functioning of the group with limited energy resources. When solving the problem of optimizing energy consumption, the problem of increasing the efficiency of interaction of the elements of the group with stationary charging stations arises. This problem can only be solved by considering an integrated system, which includes robots and charging stations. Centralized management of such a system is justified in the case of a small number of its elements. However, with an increase in the number of elements in a group, the complexity of management increases, so a combination of centralized and decentralized management methods becomes a higher priority solution. The complex of problems of decentralized management of such a group includes the task of organizing the optimal interaction of its elements in order to achieve the goal of its functioning. When organizing energy exchange between robots and charging stations, solving this problem plays a key role in optimizing energy consumption. In this article, the concept of the interaction of mobile and stationary objects is developed, which implies the possibility of each agent choosing an appropriate companion for interaction. This choice is made taking into account the current state of the system and the assessment of the history of interaction results. The developed concept is detailed for a system that includes UAVs and their recharging stations. An algorithm is proposed for the decentralized selection of pairs of interacting elements "UAV - charging station" based on two indicators - the energy efficiency of the charging process, and the time spent by the UAV to reach the target point. Both indicators are taken into account when choosing the weights assigned to each charging station as its degrees of efficiency. Also, these indicators are included in the optimized quality criterion. An optimization procedure has been developed, the result of which is the number of the charging station that is most suitable for a given mobile object for interaction.*

*Decentralized control; neural network control systems; unmanned aerial vehicles; power consumption; charging stations; wind power plants.*

**Введение.** Известны работы, в которых рассматриваются вопросы взаимодействия БЛА со станциями, в том числе наделенными функцией подзарядки, с информационной или энергетической точкой зрения.

В статье [1] рассматриваются перспективные коммуникационные сети, позволяющие реализовать характерные режимы функционирования групп БЛА. Подчеркивается, что распространенные конфигурации информационных сетей, применимые для наземных подвижных объектов, не работают в общем случае для групп БЛА. В частности, особые требования к маршрутизации сетей БЛА выходят за рамки потребностей существующих систем MANETS и VANETS.

В работе [2] рассматривается диалоговая модель взаимодействия станции подзарядки с БЛА группы, позволяющая обеспечить безопасную и надежную покупку БЛА энергии у станции.

В работе [3], решается задача максимизации времени функционирования каждого БЛА группы на основе решения соответствующей задачи коммивояжера.

Рассматриваемые в статьях [1–3] модели взаимодействия БЛА группы со станциями подзарядки исходят из неограниченного запаса энергии на каждой станции. Это является существенным ограничением таких моделей, ограничивающих рассмотрение станций подзарядки на основе возобновляемых источников энергии.

Известны работы, в которых решаются оптимизационные проблемы энергопотребления группы БЛА, выполняющей совместную задачу с участием оператора, осуществляющего прием-отправку целевой информации [4].

Существует значительный практический задел в области организации и обслуживания движения группы БЛА при выполнении ими различных миссий [5–7]. Однако, этот задел основывается на централизованных методах координации действий БЛА в группе.

Так в патенте [7] рассмотрен централизованный метод управления группой подвижных автономных объектов разной природы для реализации задачи перевозки грузов, с возможностью подзарядки и ремонт на станциях обслуживания.

Как показал анализ, большая часть работ рассматривает взаимодействие мобильных объектов группы со станциями при одном или нескольких ограничениях: 1) станции подключены к централизованной энергосети, что позволяет не ограничивать количество энергии; 2) выбор компаньона для взаимодействия осуществляются только одной стороне, либо на станциях, либо на мобильном объекте; 3) алгоритмы такого выбора не учитывают предыдущий опыт взаимодействия данного объекта с другими объектами противоположного класса в прошлом.

В связи с этим в данной статье разрабатывается концепция взаимодействия стационарных и мобильных объектов обобщенной технической системы на базе децентрализованных адаптивных принципов управления с эффектом памяти. Данная концепция конкретизируется на примере энергетической системы, осуществляющей пополнение энергии мобильных объектов.

При наличии энергетического обмена между элементами робототехнической системы, необходимо выделять как минимум два состояния для каждого объекта системы. Первое состояние – взаимодействие объекта с другим объектом, а второе – функционирование без взаимодействия. Примером являются энергетические гетерогенные системы, в которых можно выделить подмножества источников и приемников энергии [8].

В случае динамической топологии связей в робототехнической системе закон её перестроения может быть централизованным или децентрализованным. Второй подход более перспективен для систем с большим числом элементов, централизованная координация которых возможна при пространственно-временных ограничениях [9, 10].

Возможность одновременного взаимодействия более двух разнородных объектов системы определяется её спецификой. Например, система электроснабжения предприятия может иметь один или несколько источников энергии [11].

Известны подходы, где для анализа обменных процессов в сложных системах используются различные методы декомпозиции, сводящиеся к некоторым разбиениям множеств исходной системы на подмножества с установлением связей между последними [12–14]. При этом частью первоначальных связей между элементами пренебрегают как слабыми с тем или иным порогом.

Широко рассматриваются методы декомпозиции, позволяющие выделить быстрые и медленные процессы в динамических системах [15–19]. Наиболее применимы методы декомпозиции, основанные на выделении медленных и отбрасывании быстрых процессов, определяющих динамику системы [15–17]. Упрощенная модель, получаемая при отбрасывании быстрых составляющих, описывает медленные процессы, в системе [17]. Применение данного подхода к декомпозиции обусловлено возможностью выделить движения разного темпа протекания. Разная частота выделенных процессов может порождаться внутренними особенностями системы или вводится искусственно путем включения в систему звеньев с большими коэффициентами усиления, разрывными характеристиками и т.д. [17].

В общем случае в системе децентрализованного управления для каждой потенциальной пары взаимодействующих элементов есть возможность осуществления взаимодействия по некоторому целевому критерию. Определение целесооб-

разности взаимодействия производится системами управления самих элементов, входящих в пару. При этом учитывается предысторию предыдущих выборов компаньонов для взаимодействия, которые были сделаны каждым из элементов пары. Ниже мы рассматриваем систему управления взаимодействием элементов, отвечающую этим свойствам.

**Постановка задачи.** Рассматривается процесс функционирования обобщенной двусвязной технической системы, представляющей собой распределенную сеть, которая включает статическую и динамическую подсети. Статическая подсеть включает в себя неподвижные станции, выполняющие функции сопровождения движения и/или обслуживания автономных мобильных объектов, входящих в динамическую подсеть.

Ключевым процессом функционирования распределенной сети является взаимодействие между её элементами для достижения поставленной цели. Целью функционирования могут быть перемещение пассажиров и грузов между пунктами, мониторинг местности, картографирование и прочее. Взаимодействие между элементами распределенной сети может включать: информационный обмен, погрузку-выгрузку комплектующих, энергетический обмен.

Важным частным случаем распределенной сети является энергетическая сеть, которая выполняет дополнительные функции обслуживания мобильных объектов.

Распределенная сеть может быть автономной или координироваться оператором. Режим подключения оператора к распределенной сети для её координации и управления может быть произвольным.

Для эффективной работы распределенной сети не зависимо от наличия оператора в контуре управления она должна осуществлять функции децентрализованного управления.

Каждый из элементов распределенной сети снабжен блоком управления, служащим для анализа текущей ситуации, принятия решения о дальнейших действиях, запоминания результатов своего функционирования, и приемо-передающим устройством для оперативного обмена информацией с другими агентами системы. В данный блок управления входит модуль оценивания и адаптивного принятия элемента распределенной системы. Этот модуль принимает решения о дальнейшем поведении соответствующего элемента, анализирует текущие состояния всех остальных элементов распределенной сети, а также использует доступную информацию об их предыдущих состояниях и результатах взаимодействия данного элемента с другими.

Таким образом, рассматривается децентрализованная техническая система управления, которая оперирует с элементами двух разных типов и использует память о предыдущих состояниях системы.

В процессе движения мобильный объект может воспользоваться услугами одной из станций, расположенных на означенной территории. При выборе станции каждым отдельным мобильным объектом учитывается приобретенный ранее опыт. Кроме того, отдельные мобильные объекты периодически обмениваются таким накопленным опытом.

Введем понятие относительной эффективности  $Obj_{\bar{C}l,q}$  объекта класса  $\bar{C}l$  для другого объекта  $Obj_{Cl,p}$  класса  $Cl$  в текущей ситуации  $s$ . Эта эффективность учитывается в процессе принятия решения о взаимодействии с некоторым объектом противоположного класса при достижении поставленной цели.

Введем в рассмотрение функционал  $\Phi_{Cl\bar{C}l}(p, q, s)$ , количественно выражающий введенное понятие относительной эффективности  $q$ -го объекта класса  $\bar{C}l$  для  $p$ -го объекта класса  $Cl$  при их взаимодействии в отношении заданной базовой задачи. Этот функционал должен учитывать текущую ситуацию, накладывающую

пространственно-временные и энергетические ограничения на возможность взаимодействия  $Obj_{Cl,p}$  и  $Obj_{\bar{Cl},q}$ , и накопленный опыт взаимодействия  $Obj_{Cl,p}$  с объектами класса  $\bar{Cl}$ . Также возможен обмен накопленным опытом.

Потенциально возможное взаимодействие объектов  $Obj_{Cl,p}$  и  $Obj_{\bar{Cl},q}$  обозначим как  $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$ .

Рассмотрим показатели, влияющие на значение функционала  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p, q, s)$ . К ним относятся разность между имеющейся на станции энергией и требуемой БЛА энергией, с учетом его движения до станции, дополнительное времени на достижение станции, зарядку и возврат на целевую траекторию, точность оценивания времени движения БЛА до станции, возможность технического обслуживания данной станцией данного БЛА, возможность принятия груза, перевозимого данным БЛА на данной станции.

Показатели должны зависеть от вектора  $X_{pq}(s)$  всех измеримых объектом  $Cl$  величин, влияющих на эффективность взаимодействия  $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$  и от вектора  $\bar{X}_{qp}(s)$  всех измеримых объектом  $\bar{Cl}$  величин, влияющих на эффективность взаимодействия  $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$ . Представим данные частные показатели в виде

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pq}(s)\bar{X}_{qp}(s)], k = 1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

где  $K$  – число учитываемых показателей.

Вычислить точные значения показателей (1) на этапе принятия решения сложно, поэтому вводятся в рассмотрение их оценки:

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{*(k)}[X_{pq}^*(s)\bar{X}_{qp}^*(s)], k = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где  $X_{pq}^*(s)$  – оценка  $p$ -м объектом класса  $Cl$  вектора  $X_{pq}(s)$ ;  $\bar{X}_{qp}^*(s)$  – оценка  $q$ -м объектом класса  $\bar{Cl}$  вектора  $\bar{X}_{qp}(s)$ .

Будем считать, что частичный функционал  $\Phi^{(k)}$  и его оценка  $\Phi^{*(k)}$  монотонно растут с увеличением эффективности влияния  $k$ -го фактора на результат решения базовой задачи при прочих равных условиях.

Вектора оценок  $X_{pq}^*(s)$  и  $\bar{X}_{qp}^*(s)$  формируются в вычислительных блоках соответствующих объектов двух классов в результате прогнозирования процесса и результата взаимодействия  $R_{Cl\bar{Cl}}(p, q)$ .

**Концепция взаимодействия разнородных элементов группы.** Рассмотрим алгоритм нахождения функционала  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p, q, s)$ , представленный на рис. 1.

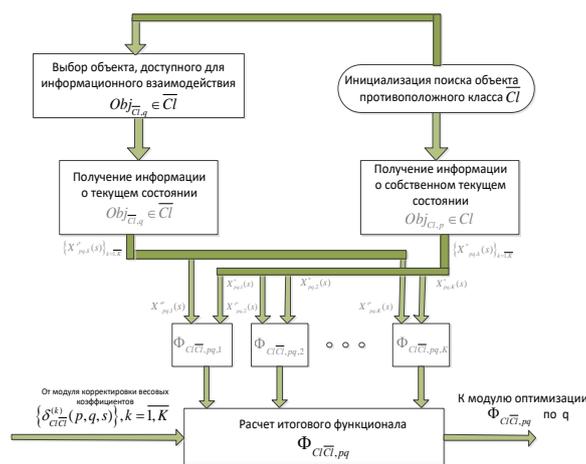


Рис. 1. Схема расчета целевого функционала для пары-кандидата на взаимодействие  $(p, q)$  в объекте класса  $Cl$

Введем для каждой пары объектов  $Obj_{Cl_1,p}$  и  $Obj_{Cl_2,q}$  введено понятие области информационной видимости объекта  $Obj_{Cl_2,q}$  объектом  $Obj_{Cl_1,p}$  – такой окрестности вокруг  $Obj_{Cl_1,p}$ , в которой этот объект может принимать информационные сигналы от объекта  $Obj_{Cl_2,q}$ . При этом  $Cl_1$  и  $Cl_2$  могут принадлежать одному или разным классам. Будем считать такую область видимости шаром с некоторым радиусом  $r_{Cl_1Cl_2}(p,q)$ .

Вначале объект  $Obj_{Cl_1,p}$  определяет необходимость запланировать взаимодействие с объектом противоположного класса, а далее – инициализировать соответствующий поиск. После этого устанавливается информационный обмен между данным объектом и всеми объектами класса  $\bar{Cl}$ , находящимися в области видимости объекта  $Obj_{Cl_1,p}$ . Затем от одного выбранного объекта  $Obj_{\bar{Cl},q}$  из этой области принимается информация об оценках  $\bar{X}_{qp}^*(s)$  вектора  $\bar{X}_{qp}(s)$ , влияющего на результат возможного взаимодействия  $R_{Cl\bar{Cl}}(p,q)$ . Аналогично, сам объект  $Obj_{Cl_1,p}$  производит оценку  $X_{pq}^*(s)$  вектора  $X_{pq}(s)$ , который также влияет на результат  $R_{Cl\bar{Cl}}(p,q)$ . В каждом из векторов  $X_{pq}^*(s)$  и  $\bar{X}_{qp}^*(s)$  могут быть выделены подмножества  $X_{pq,k}^*(s)$ ,  $\bar{X}_{qp,k}^*(s)$ ,  $k=1,2,\dots,K$ , влияющие на соответствующие оценки  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$  в выражении (2).

Для реализации указанного выше выбора необходимо, чтобы функционал  $\Phi$  зависел не только от оценок  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$ , но и от предыстории процессов взаимодействия  $Obj_{Cl_1,p}$  с объектами класса  $\bar{Cl}$ :

$$\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pqopt(p,s)}(u), \bar{X}_{qopt(p,s)p}(u)], u = 1, 2, \dots, s, \quad (3)$$

При этом для каждого объекта  $Obj_{\bar{Cl},q}$  можно сформировать текущие весовые коэффициенты  $\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$ ,  $k=1,2,\dots,K$ , интегрирующие в себе информацию об эффективности влияния каждого  $k$ -го показателя на результат взаимодействия  $Obj_{Cl_1,p}$  с объектами класса  $\bar{Cl}$  на всех предыдущих этапах:

$$\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s) = F \left\{ \Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pqopt(p,u)}(u), \bar{X}_{qopt(p,u)p}(u)] \right\}, \quad (4)$$

где  $qopt(p,u)$  номер объекта противоположного класса, с которым на  $s$ -шаге взаимодействовал объект с номером  $p$  класса  $Cl$ . Здесь рассматриваются нормированные коэффициенты:

$$\sum_{q=1}^{N_{\bar{Cl}}} \delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s) = \delta_{00}^{(k)}, \quad \sum_{k=1}^K \delta_{00}^{(k)} = 1, \quad (5)$$

где неотрицательные числа  $\delta_{00}^{(k)}$  характеризуют степени относительного влияния частных показателей на общий функционал  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p,q,s)$ . Таким образом, каждое число величина  $\delta_{00}^{(k)}$  есть верхняя граница  $\{\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)\}$  веса  $k$ -го показателя для всевозможных значений номера  $q$  объекта класса  $\bar{Cl}$ . Очевидно, значения всех весов в общем случае обновляются на каждом  $u$ -шаге.

В итоге функционал  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}(p,q,s)$  есть некоторая функция от оценочных значений  $\Phi_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}[X_{pq}^*(s), \bar{X}_{qp}^*(s)]$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , а также от текущего набора весов  $\delta_{Cl\bar{Cl}}^{(k)}(p,q,s)$ , учитывающих предысторию процессов рассматриваемых взаимодействий.

Обозначим класс стационарных объектов как  $A$ , а класс динамических объектов обозначим через  $B$ .

Будем допускать также условия, когда выбор пары для взаимодействия определяется принудительно. Например, выбор может делать оператор, или ситуация, например, когда пара  $(p, q)$  принадлежит некоторой достаточно малой пространственной области, а остальные объекты находятся вне возможной зоны взаимодействия.

Если условия принудительного выбора не выполнены, то возможны следующие три случая взаимодействия между объектами статической и динамической подсистем.

В первом случае объекты обоих классов могут принимать решение о выборе наиболее подходящего для взаимодействия объекта противоположного класса для достижения поставленной задачи. Во втором случае выбирать объект противоположного класса для взаимодействия могут только объекты класса  $A$ . В третьем случае выбор объекта противоположного класса для взаимодействия могут осуществлять только объекты класса  $B$ .

Алгоритм принятия решения о взаимодействии в первом случае предьявляет больше ограничений на реализацию взаимодействия  $R_{civ}(p, q)$  для произвольных  $p, q$ , по сравнению со второй и третьей стратегиями.

Алгоритм второго случая характеризуется отсутствием выбора объектами класса  $B$  наиболее подходящих для взаимодействия объектов класса  $A$ , при этом функционалы  $\Phi_{BA}(q, p, s, q)$ , а также соответствующие весовые коэффициенты и частные показатели не рассчитываются. Аналогично, алгоритм третьего случая характеризуется отсутствием выбора объектами класса  $A$  наиболее подходящих для взаимодействия объектов класса  $B$ , следовательно, здесь не рассчитываются функционалы  $\Phi_{BA}(q, p, s, q)$  и соответствующие им величины.

**Алгоритмы взаимодействий на примере системы подзарядки БЛА.** Рассмотрим пример реализации рассмотренной выше распределенной обобщенной сети, включающей статическую и динамическую подсети. Пусть каждая станция снабжена модулем автоматической подзарядки БЛА. Группа БЛА образует динамическую распределенную подсеть, с которой должна взаимодействовать статическая система. В качестве базовой задачи, которую должна реализовать распределенная система, является организация оптимального по быстродействию транспортного потока между пунктами назначения, которыми являются станции подзарядки. Будем считать, что группа БЛА однородна, а часть станций снабжена модулями подзарядки БЛА.

Каждый БЛА, как только его энергетический запас снижается менее порогового значения, может приземлиться на одной из станций, снабженных модулем подзарядки. На другие станции БЛА может приземляться, чтобы доставить либо забрать для перевозки груз. Возможен случай, когда станция назначения используется БЛА и как станция подзарядки.

Особенную актуальность рассмотренное выше децентрализованное управление приобретает для энергетических зарядных станций на базе возобновляемых источников энергии. Такие станции целесообразно устанавливать в труднодоступных местах, где затруднена или экономически неэффективна централизованная подача электроэнергии, а также в местах, где пребывание человека-оператора обслуживания станций/ мобильных объектов по тем или иным причинам должно быть исключено.

Каждый модуль автономной подзарядки содержит: 1) платформу-носитель; 2) комплексную силовую энергетическую установку, состоящую, в общем случае, из ветроэнергетической установки и фотопреобразующих элементов, совместная работа которых регулируется единым блоком управления; 3) модуль заряда/ смены аккумуляторных батарей либо модуль беспроводной подзарядки; 4) модуль анализа энергетического состояния и прогнозирования работы; 5) модуль приема-передачи для обмена информационными сигналами с отдельными БЛА группы.

Заметим, что в данном случае целесообразно использовать ветроэнергетическую вертикально осевую установку, в частности, роторного типа, в силу её компактности и достаточной энергетической эффективности в сравнении с аналогами [21, 22].

На рис. 3 представлена приближенная конструкция автономной станции подзарядки при реализации контактного принципа восполнения энергии с помощью замены разряженных на борту БЛА батарей. На рис. 4: 1 – БЛА типа мультикоптер, 2 – ветроэнергетическая установка, 3 – фотопреобразующее устройство (солнечные панели), 4 – платформа для приземления БЛА с фиксаторами, 5 – зарядный отсек БЛА, где располагается и крепится батарея, 6 – манипуляционный агрегат, 7 – агрегат снятия-подачи батарей, 8 – устройство зарядки, 9 – каналы подачи электрической энергии от комплексной силовой энергетической установки.

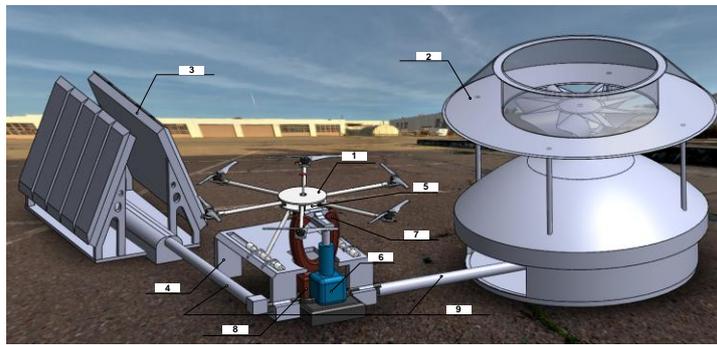


Рис 3. Внешний вид станции контактной подзарядки

Информация о текущих характеристиках БЛА, станции подзарядки, а также результатах стыковки и последующей подзарядки для каждой ситуации накапливается в модуле оценивания и адаптивного выбора. На каждом шаге происходит обобщение этой информации с корректировкой настроечных коэффициентов указанного выше критерия.

Модуль оценивания и адаптивного выбора  $i$ -го БЛА при возникновении необходимости подзарядки производит анализ всех возможных вариантов использования различных станций подзарядки согласно критерию максимизации функционала:

$$G_i(s, j) = \delta_{Eij}(s) \left\{ \pi - \arccos \frac{E_{ij}^*(s) - E_{n,ij}(s)}{E_{\max}'} \right\} + \delta_{Tij}(s) \left\{ \pi - \arccos \frac{\Delta_T}{T_{ij}^*(k) + \Delta_T} \right\} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $s$  – порядковый номер приземления, совершенного данным  $i$ -м БЛА;  $E_{ij}^*(s)$  – заявленная  $j$ -й станцией оставшаяся энергия, доступная для данного БЛА с учетом обращений к этой станции других БЛА;  $T_{ij}^*(k)$  – оцениваемое  $i$ -м БЛА время достижения целевой точки с учетом достижения  $j$ -й станции, подзарядки на ней, взлета и последующего движения до целевой точки;  $\Delta_T$  – оценка верхней границы  $T_{ij}^*(k)$ ;  $E_{n,ij}(s)$  – оцениваемая потребность  $i$ -го БЛА в энергии заряда с учетом достижения  $j$ -й станции. Здесь

$$E_{n,ij}(s) = E_{n0,ij}(s) + E_{nT,ij}(s), \quad (7)$$

где  $E_{n0,ij}(s)$  – потребность энергии  $i$ -го БЛА на момент связи с  $j$ -й станцией,  $E_{nT,ij}(s)$  – оцениваемая им потеря энергии на достижение  $j$ -й станции и последующего возврата на исходную траекторию. Величина  $E_{\max}$  есть максимально возможная энергия, которая может быть выделена одному БЛА. Удельные коэффици-

енты  $\delta_{Eij}(s)$  характеризуют среднюю степень востребованности накопленной на  $j$ -й станции свободной энергии для  $i$ -го БЛА с учетом всех предыдущих опытов получения/неполучения энергии этим БЛА на  $j$ -й станции.

Коэффициенты  $\delta_{Eij}(s)$ ,  $\delta_{Tij}(s)$  удовлетворяют условиям нормировки:

$$\sum_{i=1}^M \delta_{Eij}(s) = \delta_{E0}, \quad \sum_{i=1}^M \delta_{Tij}(s) = \delta_{T0}, \quad \delta_{T0} + \delta_{E0} = 1. \quad (8)$$

В результате оптимизации функционала (7) получаем станцию с номером  $j=j_{opt}(s)$ , обеспечивающую условие:

$$G_i(s, j_{opt}) = \max_{j \in [1, M]} [G_i(s, j)] \equiv G_{max, i}(s). \quad (9)$$

После каждого шага  $s$  параметры  $\delta_{Eij}(s)$  пересчитываются по правилу:

$$\delta_{Eij}(s+1) = \eta_{ij}(s+1) / \sum_{i=1}^M \eta_{ij}(s+1), \quad \eta_{ij}(s+1) = \eta_{ij}(s) + e_{ij}(s), \quad (10)$$

$$e_{ij}(s) = \begin{cases} \pi - \arccos \frac{E_{ij}^*(s) - E_{n,ij}(s)}{E'_{max}}, & j = j_{opt}(s), \\ 0, & j \neq j_{opt}(s), \end{cases} \quad (11)$$

$E_{ij}^*(s)$  – действительное значение энергии, полученное  $i$ -м БЛА от  $j$ -й станции в  $s$ -й ситуации.

Аналогичным образом, параметры  $\delta_{Tij}(s)$  пересчитываются по правилу:

$$\delta_{T,ij}(s+1) = \frac{\xi_{ij}(s+1)}{\sum_{i=1}^M \xi_{ij}(s+1)}, \quad \xi_{ij}(s+1) = \xi_{ij}(s) + q_{ij}(s), \quad (12)$$

$$q_{ij}(s) = \begin{cases} \frac{\Delta T}{T_{ij}^*(k) + \Delta T}, & j = j_{opt}(s) \\ 0, & j \neq j_{opt}(s), \end{cases} \quad (13)$$

В начальный момент времени, когда еще не произведено ни одной подзарядки, значения  $\delta_{Eij}(1)$  инициализируются следующим образом:

$$\delta_{E,ij}(s=1) = \frac{\delta_{E0}}{M}, \quad \delta_{T,ij}(s=1) = \delta_{T0}/M. \quad (14)$$

Каждая станция получает сигналы запроса о подзарядке, приходящие от БЛА, и анализирует возможность реализации каждой такой подзарядки, исходя из своего текущего энергетического запаса и прогноза вырабатываемой ею мощности в ближайшем будущем. В ответ станция направляет каждому БЛА, пославшему ей запрос, ответный сигнал, в котором передается информация об энергии, которая может быть доступной для этого БЛА на этой станции в текущий момент времени. Далее модуль оценки и адаптивного заряда данного БЛА выбирает наиболее подходящую станцию с номером  $j=j_{opt}(s)$  и посылает этой станции сигнал о намерении на ней приземлиться. Станция с номером  $j_{opt}(s)$  после получения этого сигнала производит резервирование соответствующей части своей энергии под зарядку данного БЛА.

Эффективность адаптивного выбора подходящей станции каждый раз повышается за счет анализа накопленной к текущему моменту времени информации об опытах подзарядки данного БЛА. Станции, которые дают большее суммарное превышение заявленных над реально переданными данному БЛА энергиями, характеризуются меньшими удельными коэффициентами  $\delta_{Ej}$ .

Указанные дисбалансы могут быть вызваны следующими факторами: 1) неточностью расчета значений энергии, которую станция может предоставить данному БЛА; 2) помехой в канале связи передачи информации об этой энергии;

3) спонтанными изменениями в условиях функционирования, приводящими к значительному снижению реальной энергии по отношению к соответствующей заявленной  $E_{ij}^i(s)$ ; 4) непредвиденными изменениями на пути следования БЛА до станции. Например, если на этом пути следования возникает импульсная ветровая нагрузка, то время движения БЛА может быть значительно увеличено по сравнению с  $T_{ij}^*(k)$ , в результате чего реальная потребность БЛА в энергии заряда возрастет по сравнению с оценочным значением.

Рассмотренный здесь децентрализованный адаптивный выбор пар взаимодействующих объектов эффективен для энергетических распределенных систем, включающих станции подзарядки автономных мобильных объектов, в том числе БЛА, на базе возобновляемых источников ветровой и солнечной энергий.

**Результаты моделирования.** При моделировании будем полагать, что неподвижная часть системы представлена 18 станциями, расположенными в точках  $\{A_m\}$ ,  $m=1,2,\dots,M$ ,  $M=18$ . При этом часть неподвижных станций является станциями подзарядки:  $U_{A,СП} = \{A_1, A_3, A_{10}, A_{11}, A_{12}, A_{15}, A_{16}, A_{17}, A_{18}\}$ .

Пусть имеется три БЛА, которые получили от оператора путевые маршруты в следующем виде:

БЛА 1 –  $A_1 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_5 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_1 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_8 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_1 \rightarrow A_7 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_2 \rightarrow A_1 \rightarrow A_{10}$ ;

БЛА 2 –  $A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_8 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_3 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6 \rightarrow A_{15} \rightarrow A_9 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_{11} \rightarrow A_9 \rightarrow A_6 \rightarrow A_9$ ;

БЛА 3 –  $A_4 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_{10} \rightarrow A_4 \rightarrow A_3 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_6 \rightarrow A_8 \rightarrow A_{11} \rightarrow A_4 \rightarrow A_{10} \rightarrow A_9 \rightarrow A_7 \rightarrow A_6$ .

Также задан временной интервал наблюдения за перемещениями БЛА  $T_{observ}$ .

В процессе выполнения маршрутных заданий БЛА имеют возможность подзарядиться на указанных станциях назначения, входящих в множество  $U_{A,СП}$ . Кроме того, они могут подзарядиться также и на станциях из множества  $U_{A,СП}$ , не входящих в маршрут. В этом случае будем говорить о вынужденной подзарядке. Заметим, что БЛА может оценивать все станции подзарядки, в том числе и те, которые не входят в число станций назначений его маршрута.

Проведем моделирование движения БЛА между пунктами назначения с возможными приземлениями на дополнительных станциях подзарядки.

В течение времени наблюдения  $T_{observ}$  разные БЛА выполняют в общем случае различные числа подзарядок  $s_1, s_2, s_3$ . Интерес представляет динамика изменения весовых коэффициентов энергетического и временного факторов для каждой станции с точки зрения каждого из трех БЛА при изменениях номера этапа подзарядки.

Для первого БЛА реальный маршрут включает кроме исходных узловых точек также и дополнительные станции подзарядки.

Последовательность посещения  $A_{СП}^{(1)}$  всех станций подзарядки для БЛА1, включая как принудительно определенные, заранее являющиеся узлами маршрута, так и выбранные свободно, следующая:

$$A_{СП}^{(1)} = [A_{16} A_{11} A_{10} A_1 A_{17} A_{15} A_{17} A_7 A_{17} A_{15} A_{10} A_1].$$

Аналогичным образом получим соответствующие последовательности для второго и третьего БЛА:

$$A_{СП}^{(2)} = [A_{10} A_{16} A_{15} A_{15} A_{11} A_{10} A_{11} A_{16} A_{15} A_{11} A_{10} A_{10}];$$

$$A_{СП}^{(3)} = [A_{14} A_{16} A_{17} A_{11} A_{10} A_{14} A_{18} A_{18} A_{10} A_{11} A_{15} A_{18} A_{18} A_{17} A_{17}].$$

Для каждого БЛА в крейсерском режиме: плотность воздуха  $\rho=1.1225 \text{ кг/м}^3$ ; миделево сечение аппарата  $S_{char}=0.06 \text{ м}^2$ ; коэффициент лобового сопротивления  $c_x=0.1$ ; крейсерская скорость  $V_k=20 \text{ м/с}$ ; максимальное значение энергии заряда одного БЛА  $E_m=50 \text{ Вт*ч}$ ; пороговое значение энергии батареи БЛА, при достижении которого необходимо осуществлять подзарядку,  $E_{pr}=20 \text{ Вт*ч}$ ; дальность связи одинаков для всех БЛА и станций  $R_{inf}=500 \text{ м}$ ; масса аппарата  $m=2.8 \text{ кг}$ .

Согласно расчетам: средние значения сила тяги и её горизонтальной проекции для первого БЛА:  $F_{u,x,k}=1.5 \text{ Н}$ ;  $F_{T,x}=27.3 \text{ Н}$ ; средняя расходуемая им мощность на протяжении выполнения всей миссии  $P_0=21.68 \text{ Вт}$ ; полная энергия, израсходованная всеми БЛА за период  $T_{observ}=1.3 \text{ ч}$ ; 820 кДж; потребная мощность одной станции для подзарядки БЛА  $P_{СП0}=34 \text{ Вт}$ .

Расчет указанных летных, аэродинамических и энергетических величин базировался на упрощенных математических моделях: а) расходования энергии БЛА в процессе полета при отработке целевой траектории в условиях ветровых установившихся возмущений; б) выработки энергии станцией подзарядки на базе комплексной силовой энергетической установки, включающей ветроэнергетическую установку и фотопреобразующие элементы.

Расчет по разработанному методу децентрализованного управления применительно к рассматриваемой энергетической системе «группа БЛА + станции подзарядки» показал сокращение полного времени выполнения миссии группой БЛА на 6,2 % по сравнению с планированием без эффекта памяти, т.е. без учета оцененных результатов предыдущих подзарядок.

На рис. 4 представлены целевые (выделены красным) и реальные в рассматриваемом приближении траектории (выделены синим) всех БЛА (а, б, в – для 1, 2, 3 БЛА, соответственно) при отработке указанных выше маршрутных заданий.

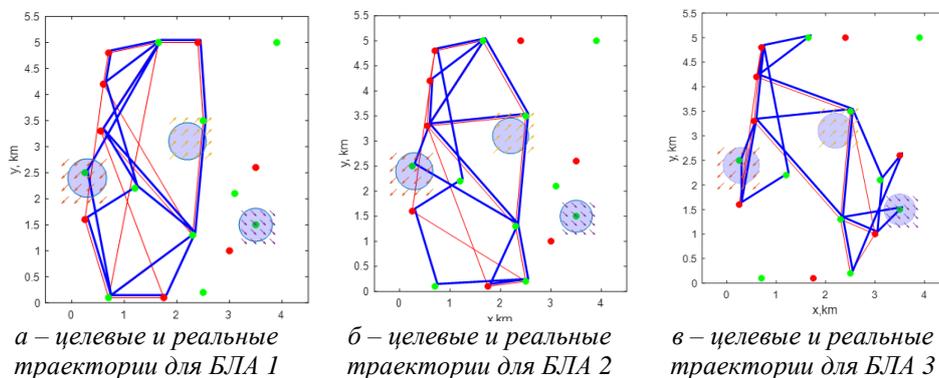
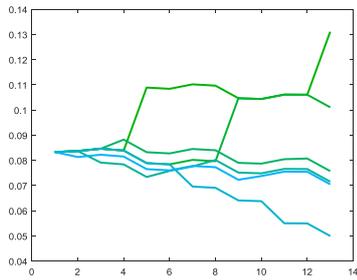


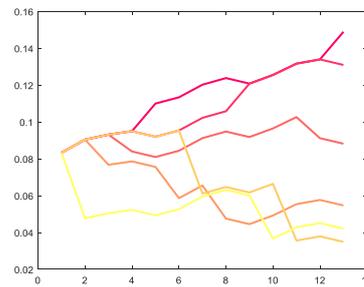
Рис. 4. Целевые и реальные траектории БЛА группы

Видно, что БЛА периодически вынуждены приземляться на станциях подзарядки, которых не было в исходных списках назначений. Это приводит к дополнительным ответвлениям от целевых траекторий в соответствующих реальных траекториях. Здесь также красными кружками выделены станции, не имеющие модулей подзарядки, а зелеными малыми кружками – станции подзарядки; зелеными большими кругами выделены области с дополнительными установившимися ветровыми возмущениями относительно средней скорости ветра  $V_{w0}=20 \text{ м/с}$ .

На рис. 5,а представлены зависимости весовых коэффициентов, определенных первым БЛА, для различных номеров этапов вынужденной подзарядки вплоть до последнего отсчетного  $s_1=12$ ,  $\delta_{E,1,q}(u)$ ,  $u=1,2,\dots,12$ , соответствующего выбранному интервалу наблюдения  $T_{observ}=1.3 \text{ ч}$ . На рис. 6,б показаны аналогичные зависимости, но для весов временного фактора  $\delta_{T,1,q}(u)$ .



*а – зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{E,1,q}(u)$ , нижняя ветвь – для A16, верхняя – для A17*



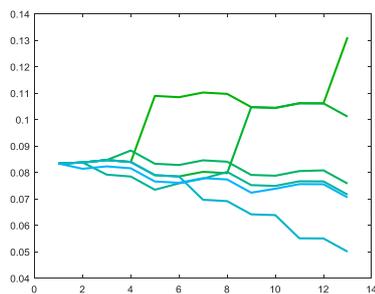
*б – зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{T,1,q}(u)$ , нижняя ветвь – для A16, верхняя – для A17*

*Рис. 5. Зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{E,1,q}(u)$  и  $\delta_{T,1,q}(u)$ , определенных первым БЛА на основании опыта подзарядок, приобретенного к каждому текущему этапу*

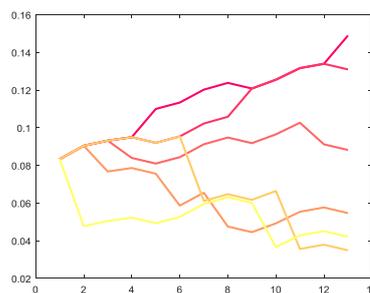
Из графиков, приведенных на рис. 5,а видно, что в энергетическом плане все станции для первого БЛА неодинаковы. Несмотря на то, что в рассматриваемом нами частном случае все станции энергетически эквивалентны, на доступную для данного БЛА энергию заряда играет роль также и тенденции к накоплению очередей для подзарядки на различных станциях. Последнее определяется, очевидно, расположением станций и характером маршрутных целевых траекторий движения БЛА. Кроме того, для незадействованных БЛА станций подзарядки их весовые коэффициенты автоматически будут в целом снижаться по сравнению с задействованными.

Из графиков, приведенных на рис.5 б, можно сделать вывод, что вес  $\delta_{T,1,q}(u)$  станции A16 в итоге значительно снижается по сравнению со станциями A10 и A11, что можно объяснить наличием локального участка ветровой нагрузки  $\beta$ , усложняющей и замедляющей перемещения между станциями A7, A9, A10 и A11. Вес станции A14 также снижается, но в меньшей степени, чем это имеет место в отношении станции A16. При этом вес станции A17 значительно повышается, поскольку БЛА переориентируется именно на эту станцию после первой же неэффективной, по временным затратам, подзарядки на станции A16.

На рис. 6,а,б представлены аналогичные зависимости  $\delta_{E,3,q}(u)$ ,  $\delta_{T,3,q}(u)$ , получаемые на борту третьего БЛА, при  $s_3=15$ .



*а – зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{E,3,q}(u)$ , нижняя ветвь – для A14, верхняя – для A18*



*б – зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{T,3,q}(u)$ , нижняя ветвь – для A14, верхняя – для A18*

*Рис. 6. Зависимости весовых коэффициентов  $\delta_{E,3,q}(u)$  и  $\delta_{T,3,q}(u)$ , определенных первым БЛА на основании опыта подзарядок, приобретенного к каждому текущему этапу*

Из графиков, приведенных на рис. 6, можно сделать вывод, что веса  $\delta_{T,3,16}(u)$ ,  $\delta_{E,3,16}(u)$  станции A14, находящейся в зоне действия дополнительного ветрового потока со скоростью, в итоге значительно снижаются, а значения аналогичных весов для станции A18, на которую происходит частичная переориентация при планировании подзарядок третьим БЛА после первой же неэффективной подзарядки на станции A14, значительно растут по сравнению с соответствующими средними значениями весов на последней итерации.

**Заключение.** В настоящей работе разработана концепция взаимодействия подвижных и стационарных объектов системы, подразумевающая возможность выбора каждым агентом потенциального взаимодействия соответствующего компаньона. Базисом такого выбора является учет предыстории процесса, когда для принятия решения о выборе объекта для взаимодействия, используется как текущая информация о этих объектах на данный момент времени, так и оцененные результаты ранее сделанных выборов, показавших свою соответствующую эффективность с точки зрения некоторого целевого критерия.

Разработанная концепция конкретизирована для системы, объединяющей БЛА с неподвижными станциями их подзарядки. Рассмотрен алгоритм децентрализованного выбора пар взаимодействующих элементов типа «БЛА – станция подзарядки» на основе двух частных показателей – энергетической эффективности непосредственно самого процесса заряда, и полного времени, затрачиваемого мобильным объектом на достижение его целевой точки при выборе данной станции. Последний показатель важен при требовании оптимизации по быстродействию, например, грузооборота между станциями назначения. Оба этих фактора учитываются при выработке весовых коэффициентов, назначаемых каждой станции подзарядки.

Эффективность разработанного метода реализации выбора пар взаимодействующих элементов подтверждена моделированием энергетического обмена в распределенной системе «группа БЛА + станции подзарядки».

Полученные результаты могут быть применены для разработки робототехнических систем, обслуживающих БЛА в части их энергетической поддержки. Непосредственная сфера практического применения разработанного метода децентрализованного управления – для автономной подзарядки БЛА и их групп с зоной функционирования, которая может включать гористую местность, поверхность воды, труднопроходимый район лесных массивов и т.п., а также БЛА, функционирование которых должно происходить в местах радиационного заражения, очагов пожаров, северных районах и т.п.

Также представленная система может применяться в городских или сельских условиях, где ручной тип подзарядки хотя и может применяться, но значительно менее эффективен, чем автоматическая система подзарядки. Причем разрыв в эффективности двух этих типов подзарядки будет расти с увеличением числа БЛА, подлежащих обслуживанию, увеличением площади территории, которая должна быть покрыта данной группой БЛА в процессе своего функционирования, а также с увеличением времени функционирования группы БЛА на данной территории вследствие эффекта самообучения при принятии решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gupta L., Jain R. and Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, Vol. 18, No. 2, pp. 1123-1152. Doi: 10.1109/COMST.2015.2495297.
2. Hassija V., Chamola V., Krishna D.N.G. and Guizani M. A Distributed Framework for Energy Trading Between UAVs and Charging Stations for Critical Applications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, Vol. 69, No. 5, pp. 5391-5402. Doi: 10.1109/TVT.2020.2977036.

3. Li L., Wu J., Xu Y., Che J. and Liang J. Energy-controlled optimization algorithm for rechargeable unmanned aerial vehicle network, *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Siem Reap, 2017, pp. 1337-1342. Doi: 10.1109/ICIEA.2017.8283046.
4. Hanyu A., Kawamoto Y. and Kato N. "On Improving Flight Energy Efficiency in Simultaneous Transmission and Reception of Relay Using UAVs," *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, 2019, pp. 967-972. Doi: 10.1109/IWCMC.2019.8766559.
5. AI electrically charging system for drones, by M. Ippolito. (2016, January, 07). Patent ID WO 2016/113766.
6. Systems and methods for UAV battery exchange, by M. Wang. (2015, September, 22). Patent ID US 9139310B1.
7. Multi-use uav docking station systemis and methods, by N.K. Gentry, R. Hsieh, and L.K. Nguyen. (2016, July, 12). Patent ID US9387928B1.
8. Shevchenko V.A., and Medvedev M.Yu. Decomposition of a complex dynamic system with a network architecture, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 635, No 1, pp. 12-24, Doi: 10.1088/1757-899X/635/1/012024.
9. Elliott D., Keen, W. and Miao L. Recent advances in connected and automated vehicles, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, April 2019, Vol. 6, Issue 2, pp. 109-131. Doi: 10.1016/j.jtte.2018.09.005.
10. Di Silvestre M.L., Gallo P., Guerrero J.M., Musca R., Riva Sanseverino E., Sciumè G., Vásquez J.C., Zizzo G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, March, 2020, Vol. 119. Doi: 10.1016/j.rser.2019.109585.
11. Imdadullah S.M., Amrr M.S., Asghar Jamil, Ashraf I. and Meraj M. A Comprehensive Review of Power Flow Controllers in Interconnected Power System Networks, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 18036-18063. Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968461.
12. Hangos K.M. and Pózna A.I., Structural Decomposition and its Use in Qualitative Model-based Diagnosis of Complex Systems: Plenary Talk, *2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, Subotica, Serbia, 2019, pp. 13-14. Doi: 10.1109/SISY47553.2019.9111630.
13. Ghadami R. and Shafai B. Decomposition-Based Distributed Control for Continuous-Time Multi-Agent Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 58, No. 1, pp. 258-264.
14. Borrelli F., Keviczky T. Distributed LQR Design for Identical Dynamically Decoupled Systems // *IEEE Transactions on Automatic Control*, Sept. 2008, Vol. 53, Issue 8, pp. 1901-1912.
15. Yang J.P., Cheng G.H. and Xu Z. Dynamic Reduction of Large Power System in PSS/E, *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Dalian, 2005, pp. 1-4. Doi: 10.1109/TDC.2005.1546815.
16. Zhang M., Li Q., Liu C. and Zhang J. An Aggregation Modeling Method of Large-scale Wind Farms in Power System Transient Stability Analysis, *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Guangzhou, 2018, pp. 1351-1356. Doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601652.
17. Blekhnman I.I., Indeitsev D.A., and Fradkov A.L. Slow motions in systems with inertial excitation of vibrations, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, February 2008, Vol. 37, Issue 1, pp. 21-27. Doi: 10.1007/s12001-008-1006-z.
18. Kamachkin A.M., Sogonov S.A., Shamberov V.N. The Decomposition Method in Issues of Researching Electric-Power Systems with Dry Friction, *Russian Electrical Engineering*, 2017, Vol. 88 (12), pp. 827-831. Doi: 10.3103/S1068371217120082.
19. Abgaryan K.A. Asymptotic decoupling of the equations for a linear automatic control system, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1966, Vol. 166, No 2, pp. 301-304.
20. Clancy L.J. Aerodynamics, 1st Edition, *Sterling Book House*, 2006, 610 p.
21. Kostjukov 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*, 2020, Vol. 21, No 10, pp 599-608. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.599-608>.
22. Kostjukov V.A., Medvedev M.Y., Poluyanovich N.K., Dubyago M.N., Bulanovich D.I., Pavlenko D.D. Control law synthesis of the wind-driven power-plant with variable geometry, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2019, Vol. 19, No 23. Doi: 10.4108/eai.13-7-2018.157036.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

**Костюков Владимир Александрович** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: vakostukov@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент; с.н.с.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

**Пшихопов Вячеслав Хасанович** – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

**Косенко Евгений Юрьевич** – e-mail: ekosenko@sfnedu.ru; к.т.н.; доцент; с.н.с.

**Kostjukov Vladimir Aleksandrovich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: vakostukov@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

**Medvedev Mikhail Yurjevich** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

**Pshikhopov Viacheslav Khasanovich** – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

**Kosenko Evgeny Yurevich** – e-mail: ekosenko@sfnedu.ru; cand. of eng. sc.; associated professor; senior researcher.

УДК 629.5.061

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-189-203

**Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич**

**ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО  
ПОДВОДНОГО АППАРАТА\***

*Целью исследования является организации электросети гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата, способного двигаться в широком диапазоне скоростей. Необходимость движения автономного подводного аппарата в широком диапазоне скоростей требует применения разнородных источников электроэнергии, работающих на различных физических принципах – аккумуляторных батарей и электрохимических генераторов, использующих реагенты из хранилища реагентов. Кроме того, для обеспечения потребителей электроэнергией с требуемыми параметрами (токами, напряжениями, объемами электроэнергии) необходимо применения дополнительных распределительных щитов, преобразователей напряжения, защитно-коммутационной аппаратуры, ключей. Использование дополнительного оборудования в электросети позволяет гибко конфигурировать электросеть с целью формирования энергии в объеме, согласованном с объемом потребляемой электроэнергии. С другой стороны, дополнительное оборудование вызывает потери электроэнергии в сети, и, соответственно, дополнительной электроэнергии. В связи с этим задача определения варианта организации электросети, при котором потери электроэнергии были бы минимальными, является актуальной. Для решения указанной задачи проанализированы особенности использования дополнительного оборудования в электросети, проанализировано потребление электроэнергии автономным необитаемым подводным аппаратом на различных этапах выполнения аппаратом маршрутного задания, определены минимальные и максимальные объемы потребления при движении автономного необитаемого подводного аппарата в различных скоростных режимах. Это позволило определить степень задействования разнородных источников электроэнергии в процессе выполнения маршрутного задания. По результатам анализа были сформированы альтернативные варианты электросети. Для выбора варианта организации, обеспечивающего минимальные потери электроэнергии, был сформирован целевой график влияния потерь на отдельных устройствах электросети – на потери всей электросети, и с использованием метода распространения меток получены количественные оценки каждого из альтернативных вариантов. Получение количественных оценок по-*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00130.