

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

К. В. Капелько¹, Э. Ю. Хохулин²

*Военная академия Ракетных войск стратегического назначения
имени Петра Великого (1), Балашиха, Московская обл., Россия;
ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны Российской Федерации (2),
gl.reference@ya.ru; Мытищи, Московская обл., Россия*

Ключевые слова: алгоритм; беспилотный летательный аппарат; система электроснабжения; химический источник тока.

Аннотация: В дополнение к существующим разработан алгоритм оптимизации параметров комбинированной системы электроснабжения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с электрическим двигателем, позволяющий учитывать конкретные условия и режимы применения БЛА. Приведены характеристики химических источников тока, на которые необходимо ориентироваться при выборе наиболее предпочтительного типа химического источника тока. Разработана схема распределения энергопотребления в системе электроснабжения БЛА и отмечены особенности ее функционирования.

Обозначения

$\Phi_1 - \Phi_3$ – критерии оптимизации;
 $I_{\max k}$ – максимально допустимый ток химического источника тока, А;
 $M^{\text{ТР}}, M_{\text{ХИТ}}$ – масса комплекта химических источников тока соответственно требуемая и текущая, кг;
 m_k – масса химического источника тока, кг;
 $P^{\text{ТР}}, P_k$ – удельные мощности химического источника тока соответственно требуемая и текущая, Вт/кг;
 $P_1 - P_5$ – потребляемые мощности при взлете БЛА; полете в заданный район; выполнении задач, стоящих перед ним; полете в район посадки; при посадке БЛА, Вт/кг;
 $Q_{\text{ТР}}, Q_k$ – емкости химического источника тока соответственно требуемая и текущая, А·ч;

$T_{\text{А}}^{\text{ТР}}$ – требуемая длительность автономного функционирования БЛА, ч;
 $t_1 - t_5$ – время, требуемое для взлета БЛА; полета в заданный район; выполнения задач, стоящих перед ним; полета в район посадки; для посадки БЛА, мин;
 U_k – напряжение химического источника тока, В;
 $U^{\text{ТР}}$ – требуемое номинальное напряжение СЭС БЛА, В;
 $U_{\text{ЭД}}$ – рабочее напряжение электродвигателя, В;
 $U_{\text{ЭД1}} \dots U_{\text{ЭДn}}$ – диапазон рабочего напряжения электродвигателя, В;
 $W^{\text{ТР}}, W_k$ – удельные энергии химического источника тока соответственно требуемая и текущая, Вт·ч/кг

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) нашли широкое применение как в военной области, так и гражданской сфере [1 – 4], включая наблюдение и патрулирование позиционных районов, сбор информации при чрезвычайных ситуациях, обеспечение работы телекоммуникаций, проведение метеорологических измерений, экологического мониторинга, контроля трубопроводов, а также доставки грузов и др. Конкурентоспособность организаций промышленности и поиск новых сфер применений БЛА побудили разработчиков и ученых разрабатывать решения, позволяющие преодолеть ограничивающие факторы и проблемные аспекты, такие как маленькие скоростные и высотные возможности БЛА, малое время автономного функционирования БЛА, массогабаритные ограничения полезной нагрузки и др. Чтобы преодолеть некоторые из перечисленных ограничений, такие как малое время автономного функционирования БЛА, необходимо разработать алгоритм, помогающий сформировать индивидуальные решения по выбору параметров системы электроснабжения (СЭС) БЛА, которые могут быть адаптированы к конкретным условиям и режимам применения БЛА.

Постановка задачи

В составе силовой установки БЛА используются, как правило, химические источники тока (ХИТ). Таким образом, характеристики силовой установки напрямую зависят от характеристик ХИТ. Время автономного функционирования БЛА обратно пропорционально значению мощности нагрузки потребителей электроэнергии, то есть чем меньше значение мощности нагрузки потребителей электроэнергии, тем больше время автономного функционирования БЛА. Самым энергоемким потребителем электроэнергии в БЛА с электрическим двигателем (ЭД) является двигательная установка, обеспечивающая перемещение БЛА между двумя точками земной поверхности, над которыми необходимо оказаться. В процессе эксплуатации двигательной установки принято различать три основных режима ее работы: максимальный (взлетный), номинальный и крейсерский [5, 6]. С увеличением скорости полета БЛА потребляемая мощность ЭД сначала уменьшается, на определенной скорости достигает минимального значения, а затем растет. Во время взлета и начального набора высоты потребляемая мощность ЭД принимает максимальное значение, что накладывает ограничения на ХИТ по минимальной удельной мощности. Во время взлета БЛА потребляемая мощность может быть в 3 – 5 раз выше, чем в крейсерском полете, но более высокая мощность требуется только в течение короткого периода времени: примерно 2 – 4 % от общего времени полета, что накладывает ограничения на ХИТ, как по удельным мощностным, так и энергетическим характеристикам. В свою очередь, ХИТ могут быть либо с высокой удельной энергией, либо с высокой удельной мощностью. Удельная энергия – это количество электрической энергии, запасенной в ХИТ, которую он способен отдать при разряде на нагрузку, отнесенную к его массе. Удельная мощность определяет количество мощности, которую может обеспечить ХИТ в течение заданного периода времени, отнесенную к его массе. Химические источники тока с высокой удельной энергией рационально использовать в крейсерском полете БЛА, где требуется длительное время автономного функционирования БЛА. Химические источники тока с высокой удельной мощностью рационально использовать там, где требуется короткий, но интенсивный импульс мощности, например, при взлете БЛА, смене эшелонов полета или использовании импульсной нагрузки. Как только будут выбраны типы ХИТ, их необходимо соединить последовательно и/или параллельно в виде моду-

лей для достижения определенной емкости и напряжения. Последовательное соединение увеличивает напряжение при неизменной емкости, в то время как параллельное соединение увеличивает емкость при неизменном напряжении. Например, надпись на модуле 3S2P означает, что он состоит из 3 ячеек последовательно и 2 ячеек параллельно соединенных элементов в каждой группе, в общей сложности 6 ячеек. В зависимости от стоящих задач перед БЛА возможны различные подключения модулей.

Цель работы – разработка алгоритма оптимизации параметров комбинированной СЭС БЛА, учитывающего конкретные условия и режимы применения БЛА.

Особенности функционирования СЭС БЛА

Анализ системы электроснабжения БЛА с электрическим двигателем [7 – 9] показал, что имеются следующие параметры, характеризующие ее работу:

- уровень напряжения в СЭС БЛА;
- удельная энергия ХИТ;
- удельная мощность ХИТ;
- массогабаритные характеристики ХИТ.

Действительно, для надежной работы приемников электрической энергии БЛА уровень напряжения в бортовой сети не должен выходить за пределы заданного диапазона. Степень заряженности ХИТ не должна быть ниже необходимой для надежной работы ЭД.

Химические источники тока могут работать в широком диапазоне напряжений, а напряжение элемента пропорционально его состоянию заряда. Доступная емкость ХИТ уменьшается по мере увеличения скорости разряда, из-за внутреннего сопротивления проводимости. Поэтому, когда подключается нагрузка большой мощности, потребляющая большой ток, необходимо ограничить скорость разряда, чтобы оптимизировать доступную мощность и уменьшить потери. В зависимости от условия применений БЛА и задач, стоящих перед ним, параметры СЭС выбираются с помощью метода, показанного на рис. 1.

Распространенным методом определения оптимальных параметров СЭС БЛА заключается в поиске минимальной массы ХИТ из возможных вариантов различных типов ХИТ, если принять постоянное значение для удельной энергии и определить его массу в соответствии с требуемой энергией. Недостатком данного метода является отсутствие учета напряжения ХИТ, потребляемого тока

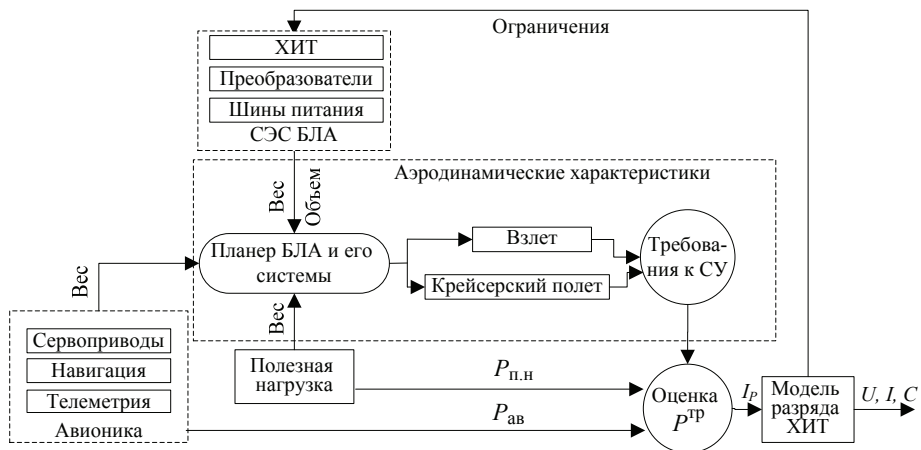


Рис. 1. Общая схема распределения энергопотребления в СЭС БЛА

и эффективности. Кроме того, ячейки ХИТ не доступны в произвольных энергетических вариантах. В работе [10] рассмотрен алгоритм определения параметров первичных источников электроэнергии БЛА, где электромеханический генератор выступает в качестве основного источника электрической энергии, а ХИТ как резервный источник электрической энергии. В данной работе предлагается алгоритм, применяемый к БЛА, где ХИТ является основным источником электрической энергии. Данный алгоритм предполагает вычисление количества ячеек, соединенных последовательно и/или параллельно, а также учет удельных и мощностных характеристик ХИТ. Входными параметрами алгоритма являются входное напряжение и ток электронного регулятора скорости. Емкость одного элемента ХИТ является конструктивной переменной этой модели.

Разработка алгоритма

Основные характеристики ХИТ, на которые необходимо ориентироваться при выборе наиболее предпочтительного типа ХИТ для конкретных условий и режимов эксплуатации БЛА, представлены в табл. 1.

Выбор оптимальных параметров комбинированной СЭС БЛА, обусловленный отсутствием ячеек ХИТ в произвольных энергетических вариантах, а также необходимостью учета как мощностных, так и энергетических характеристик ХИТ, проводится с помощью разработанного алгоритма оптимизации параметров комбинированной СЭС БЛА (рис. 2), выполняемого последовательно в четыре шага:

- подготовка исходных данных и определение ХИТ, пригодных для СЭС БЛА;
- определение рациональных ХИТ из некоторого количества k заданных типов ХИТ;

Таблица 1

**Условные характеристики различных типов ХИТ
при выборе предпочтительного варианта**

| Параметр | Тип ХИТ | | | | |
|--|--------------------|------------------|-------------------------|--------------|------------------|
| | Свинцово-кислотные | Никель-кадмиевые | Никель-металл-гидридные | Литий-ионные | Литий-полимерные |
| Номинальное напряжение, В | 2 | 1,2 | 1,2 | 3,6 | 3,7 |
| Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг | 30...40 | 40...60 | 30...80 | 90...140 | 100...130 |
| Удельная мощность, Вт/кг | 180 | 150 | 250...1 000 | 1 800 | 1 900 |
| Среднее время заряда, ч | более 10 | 8 | 6 | 2 | 2 |
| Количество циклов разряда/заряда (срок службы) | 500...800 | 2 000 | 800 | 2 000 | 600 |
| Средний саморазряд за месяц, % | 4 | 20 | 30 | 7 | 7 |

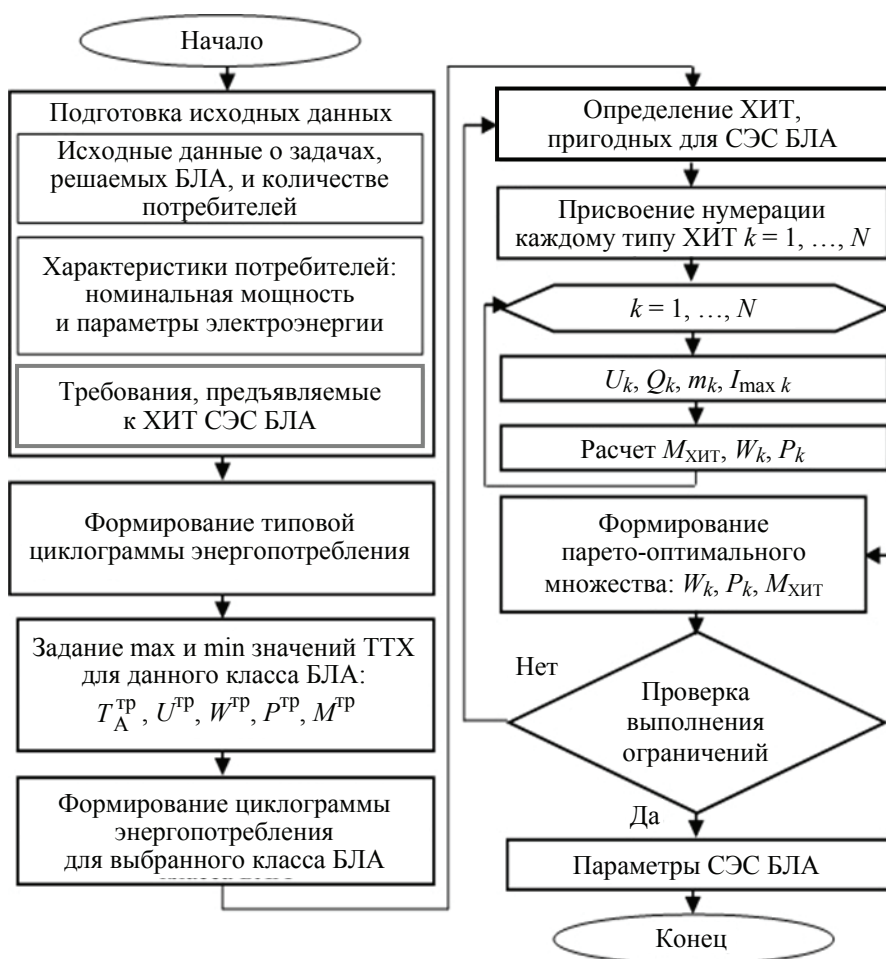


Рис. 2. Алгоритм оптимизации параметров комбинированной СЭС БЛА

- установление диапазона рабочего напряжения электродвигателя и авионики и определение параметров ХИТ;
- формирование парето-оптимального множества параметров комбинированной СЭС БЛА.

На первом шаге выполняется подготовка исходных данных к расчету. В качестве исследуемых параметров выступают: исходные данные о задачах, решаемых БЛА, и количестве потребителей; характеристики потребителей: номинальная мощность и параметры электроэнергии; требования, предъявляемые к ХИТ СЭС БЛА. Далее формируется типовая циклограмма энергопотребления (рис. 3), задаются максимальные и минимальные значения ТТХ для данного класса БЛА, формируется циклограмма энергопотребления для выбранного класса БЛА и определение ХИТ, пригодных для СЭС БЛА.

На втором шаге рациональный тип ХИТ выбирается из некоторого количества k заданных типов ХИТ ($k = 1, \dots, N$). Присваиваются значения напряжений, емкости, массы и максимально допустимого тока для каждого значения от 1 до N в соответствии со спецификацией на ХИТ.

На третьем шаге задается диапазон рабочего напряжения электродвигателя и авионики. Далее определяется масса комплекта ХИТ (1), состоящего из соединенных последовательно и (или) параллельно элементов, для обеспечения требуемого

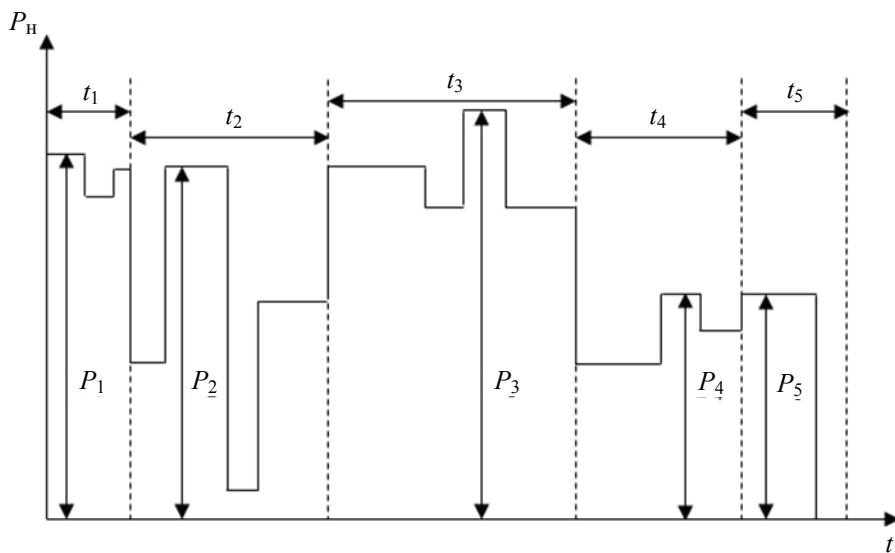


Рис. 3. Циклограмма потребления мощности

напряжения и максимального полетного времени БЛА, удельная энергия (2) и удельная мощность (3) ХИТ. При этом значение массы комплекта ХИТ варьируется от $M_{ХИТ1}$ до $M_{ХИТn}$ в зависимости от диапазона рабочего напряжения ЭД ($U_{ЭД1} \dots U_{ЭДn}$):

$$M_{ХИТ} = \frac{U_{ЭД}}{U_k} \frac{Q_{тр}}{Q_k} m_k; \quad (1)$$

$$W_k = \frac{Q_k U_k}{m_k}; \quad (2)$$

$$P_k = \frac{U_k I_{\max k}}{m_k}. \quad (3)$$

На четвертом шаге формируется парето-оптимальное множество параметров комбинированной СЭС БЛА. Количество и номенклатура ХИТ, применяемых в составе силовых установок БЛА, непрерывно возрастает. Известно множество вариантов ХИТ, отличающихся размерами, конструктивными особенностями и природой протекающих в них токообразующих электрохимических реакций. Это затрудняет выполнять разработчику БЛА анализ их характеристик и принятие решения по выбору конкретных типов ХИТ. Кроме этого, ХИТ имеет противоречивые критерии его эффективности, что также затрудняет разработчику выбор его оптимального варианта. Например, для БЛА ближнего радиуса действия два важных критерия часто определяют их производительность: время выполнения задания и скороподъемность (связанная с живучестью и безопасностью БЛА). Данные критерии противоречат друг другу в электрическом БЛА, так как один максимизирует энергию, а другой – мощность. Оптимизация для любой цели приводит к тому, что другая цель равна нулю. В связи с этим, под эффективным решением этой задачи понимается решение, являющееся наилучшим (предпочтительным) в пространстве критериев $\Phi_1 - \Phi_3$ по сравнению с остальными решениями согласно парето-оптимальному подходу.

Формирование парето-оптимального множества параметров комбинированной СЭС БЛА может быть представлено в виде:

$$\Phi_1 = W_k \rightarrow \max;$$

$$\Phi_2 = P_k \rightarrow \max;$$

$$\Phi_3 = M_{\text{ХИТ}} \rightarrow \min.$$

Таким образом, после перебора всех типов ХИТ, остается множество эффективных точек Парето, которым соответствуют оптимальные по Парето параметры комбинированной СЭС БЛА.

Заключение

Предложенный алгоритм, учитывающий конкретные условия и режимы применения БЛА, позволяет выбрать оптимальные параметры комбинированной СЭС БЛА. Внедрение данного алгоритма в автоматизированную систему проектирования приведет к увеличению эффективности процесса проектирования СЭС БЛА за счет применения инструментальных средств, реализующих предлагаемый алгоритм.

Список литературы

1. Карякин, В. В. Беспилотные летательные аппараты – новая реальность войны / В. В. Карякин // Проблемы национальной стратегии. – 2015. – № 3 (30). – С. 130 – 145.
2. Кошкин, Р. П. Беспилотная авиация – новая отрасль высоких технологий / Р. П. Кошкин // Стратегические приоритеты. – 2016. – № 1 (9). – С. 22 – 43.
3. Кузнецов, Г. А. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов / Г. А. Кузнецов, И. В. Кудрявцев, Е. Д. Крылов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 9 (81). – С. 1 – 7. doi: 10.18698/2308-6033-2018-9-1801.
4. Макаренко, С. И. Сетецентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы : монография / С. И. Макаренко, М. С. Иванов. – СПб. : Научное издательство «Лань», 2018. – 898 с.
5. Гусева, Р. И. Особенности конструкции, организация работы авиационных двигателей : учеб. пособие / Р. И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 100 с.
6. Моисеев, В. С. Динамика полета и управление беспилотными летательными аппаратами : монография / В. С. Моисеев. – Казань : Редакционно-изд. центр «Школа», 2017. – 416 с.
7. Грузков, С. А. Электрооборудование летательных аппаратов : учеб. / С. А. Грузков. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 568 с.
8. Капелько, К. В. Методологические основы построения автономных систем электроснабжения : монография / К. В. Капелько. – Балашиха : ВА РВСН им. Петра Великого, 2019. – 218 с.
9. Синдеев, И. М. Системы электроснабжения воздушных судов : учеб. / И. М. Синдеев, А. А. Савелов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1990. – 296 с.
10. Халютин, С. П. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БПЛА / С. П. Халютин, Б. В. Жмуров // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2010. – Т. 1. – С. 425 – 429.

Algorithm for Optimizing the Parameters of the Combined Power Supply System for Electrical Unmanned Aerial Vehicles

K. V. Kapelko¹, E. Yu. Khokhulin²

*Military Academy of the RVSN named after Peter the Great (1),
Balashikha, Moscow region, Russia;*

*Main Scientific Metrology Center of the Ministry of Defense of Russia (2),
gl.reference@ya.ru; Mytishchi, Moscow region, Russia*

Keywords: algorithm; unmanned aerial vehicle; power supply system; chemical current source.

Abstract: In addition to the existing algorithms, an algorithm has been developed to optimize the parameters of a combined power supply system for unmanned aerial vehicles (UAVs) with an electric motor, which allows taking into account specific conditions and modes of use of UAVs. The characteristics of chemical power sources are given, which should be taken into account when choosing the most preferred type of chemical power source. A scheme for distributing energy consumption in the UAV power supply system has been developed and the features of its functioning have been noted.

References

1. Karyakin V.V. [Unmanned aerial vehicles - the new reality of war], *Problemy natsional'noy strategii* [Problems of national strategy], 2015, no. 3 (30), pp. 130-145. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Koshkin R.P. [Unmanned aircraft - a new branch of high technologies], *Strategicheskoye priority* [Strategic priorities], 2016, no. 1 (9), pp. 22-43. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kuznetsov G.A., Kudryavtsev I.V., Krylov Ye.D. [Retrospective analysis, current state and development trends of domestic unmanned aerial vehicles], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering journal: science and innovations], 2018, no. 9 (81), pp. 1-7, doi: 10.18698/2308-6033-2018-9-1801. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Makarenko S.I., Ivanov M.S. *Setetsentricheskaya voyna - printsipy, tekhnologii, primery i perspektivy: monografiya* [Network-centric war - principles, technologies, examples and prospects: monograph], St. Petersburg: Naukoyemkiye tekhnologii, 2018, 898 p. (In Russ.)
5. Guseva R.I. *Osobennosti konstruktivnykh, organizatsiya raboty aviatsionnykh dvigateley: uchebnoye posobiye* [Design features, organization of work of aircraft engines: a tutorial], Komsomolsk-on-Amur: FGBOU VPO «KnAGTU», 2015, 100 p. (In Russ.)
6. Moiseyev V.S. *Dinamika poleta i upravleniye bespilotnymi letatel'nymi apparatami: monografiya* [Flight dynamics and control of unmanned aerial vehicles: monograph], Kazan: Redaktsionno-izdatel'skiy tsentr «Shkola», 2017, 416 p. (In Russ.)
7. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov: uchebnyy* [Electrical equipment of aircraft: textbook], Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005, 568 p. (In Russ.)
8. Kapel'ko K.V. *Metodologicheskiye osnovy postroyeniya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya: monografiya* [Methodological foundations of construction of autonomous power supply systems: monograph], Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2019, 218 p. (In Russ.)

9. Sineyev I.M., Savelov A.A. *Sistemy elektrosnabzheniya vozdushnykh sudov: uchebnyk* [Aircraft power supply systems: textbook], Moscow: Transport, 1990, 296 p. (In Russ.)

10. Khalyutin S.P., Zhmurov B.V. [Algorithm for determining the composition and parameters of the primary power sources of UAVs], *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"], 2010, vol. 1, pp. 425-429. (In Russ.)

Algorithmus zur Optimierung der Parameter des kombinierten Systems der Stromversorgung der elektrischen unbemannten Luftfahrzeuge

Zusammenfassung: Zusätzlich zu den bestehenden Systemen ist ein Algorithmus zur Optimierung der Parameter des kombinierten Stromversorgungssystems von Drohnen (UAVs) mit Elektromotor entwickelt, der es ermöglicht, spezifische Bedingungen und Anwendungsmodi von Drohnen zu berücksichtigen. Hier sind die Eigenschaften chemischer Stromquellen aufgeführt, auf die man sich bei der Auswahl der am meisten bevorzugten chemischen Stromquelle konzentrieren muss. Das Schema der Verteilung des Energieverbrauchs im UAV-Stromversorgungssystem ist entwickelt und die Merkmale seines Funktionierens sind hervorgehoben.

Algorithme d'optimisation des paramètres du système combiné d'alimentation électrique des véhicules aériens sans pilote

Résumé: En plus des algorithmes existants, est mis au point un algorithme d'optimisation des paramètres du système d'alimentation électrique combiné des véhicules aériens sans pilote (VAP) avec un moteur électrique permettant de prendre en compte les conditions et les modes d'utilisation spécifiques des VAP. Sont citées les caractéristiques des sources de courant chimique, qui doivent être orientées lors du choix du type de source de courant chimique le plus préféré. Est élaboré le schéma de la répartition de la consommation d'énergie dans le système d'alimentation électrique du drone et sont notées les caractéristiques de son fonctionnement.

Авторы: *Капелько Константин Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение ракетных комплексов», Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, Балашиха, Московская обл., Россия; *Хохулин Эдуард Юрьевич* – начальник лаборатории ФГБУ «ГНМЦ» Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Московская обл., Россия.