

Нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера

К.К. Ким, Е.Б. Королева✉, М.В. Михайлов, Д.Я. Монастырский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

✉elzazybina@yandex.ru

Резюме

Одним из основных недостатков беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа является ограниченность емкости бортовой аккумуляторной батареи. Для осуществления ее подзаряда требуется прекращение полета и возвращение летательного аппарата на базу. В статье рассматривается нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера за счет энергии внешнего электромагнитного поля, созданного сторонними источниками, например токами, протекающими по контактному проводу электрифицированного железнодорожного транспорта или по высоковольтным проводам воздушных линий электропередач. Процесс передачи энергии на борт мультикоптера происходит бесконтактно (индукционно) во время его полета в непосредственной близости от источника магнитного поля. Технически это выполняется с помощью электрической катушки, установленной на борту летательного аппарата, и подсоединеной к блоку заряда аккумуляторной батареи. Повышение эффективности заряда батареи в светлое время суток также достигается с помощью солнечной панели, расположенной на аппарате. Для исследования предложенного способа заряда и подтверждения его результативности была построена математическая модель в пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с использованием метода конечных элементов, с помощью которой в дальнейшем выполнялся расчет электродвижущей силы, наводимой в бортовой электрической катушке. Получен ряд зависимостей величины наведенной электродвижущей силы от геометрических размеров, числа витков бортовой электрической обмотки, расстояния до контактного провода контактной сети переменного тока напряжением 27,5 кВ. Достоверность результатов расчета доказана исследованиями на экспериментальных стендах.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат, аккумуляторная батарея, беспроводной заряд, электромагнитное поле, индукционный способ

Для цитирования

Нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера / К.К. Ким, Е.Б. Королева, М.В. Михайлов, Д.Я. Монастырский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 3 (87). С. 64–71.
DOI 10.26731/1813-9108.2025.3(87).64-71.

Информация о статье

поступила в редакцию: 09.09.2025 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2025 г.; принята к публикации 16.09.2025 г.

Благодарность

Исследование выполнялось в рамках научного проекта № 24-29-00159 по гранту Российского научного фонда на 2024–2025 гг. по результатам конкурса 2023 г. «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

An unconventional way to charge the onboard battery of a multicopter

К.К. Ким, Е.Б. Королева✉, М.В. Михайлов, Д.Я. Монастырский

Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

✉elzazybina@yandex.ru

Abstract

One of the main disadvantages of multi-rotor unmanned aerial vehicles is the limited capacity of their onboard battery, which requires recharging, i.e., stopping the flight and returning the vehicle to its base. This article proposes an unconventional method of charging the onboard battery of a multicopter using the energy of an external electromagnetic field generated by external sources, such as currents flowing through the contact wire of electrified rail transport or high-voltage wires of overhead power lines. Energy is transferred to the multicopter's board in the contactless mode (inductively) during its flight in close proximity to the magnetic field source. Technically, this is carried out using an electric coil installed on board the aircraft and connected to the battery charging unit. Increasing the efficiency of battery charging during daylight hours is also achieved using a solar panel located on the aircraft. To confirm and investigate the proposed charging method, a mathematical model was created in the COMSOL Multiphysics® 6.2 package using the finite element method, which was then used to calculate the electromotive force induced in the onboard electric coil. A

number of dependencies of the induced electromotive force value on the geometric dimensions, the number of turns of the onboard electrical winding, the distance to the contact wire of the AC contact network with a voltage of 27,5 kV. The reliability of the obtained calculation results is confirmed by experimental studies on experimental stands.

Keywords

unmanned aerial vehicle, battery pack, wireless charging, electromagnetic field, the induction method

For citation

Kim K.K., Koroleva E.B., Mikhailov M.V., Monastyrskii D.Ya. Netraditsionnyi sposob zaryada bortovoi akkumulyatornoi batarei mul'tikoptera [An unconventional way to charge the onboard battery of a multicopter]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2025. № 3 (87). Pp. 64–71. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.3(87).64-71.

Article Info

Received: September 9, 2025; Revised: September 15, 2025; Accepted: September 16, 2025.

Acknowledgement

The research was carried out within the framework of scientific project No 24-29-00159 within the framework of a grant provided by the Russian Science Foundation for 2024–2025 based on the results of the 2023 competition «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups».

Введение

События последних лет подтвердили эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как в военных, так и в гражданских целях (например, в сельском хозяйстве, природопользовании, системе правопорядка, транспортной безопасности, железнодорожном транспорте и пр.) [1–8]. В данной работе рассматривается вопрос применения БПЛА мультироторного типа для мониторинга объектов инфраструктуры на территориях с действующей энергосистемой или электрифицированным железнодорожным транспортом.

Несмотря на развитие технологий в аккумуляторной области, одним из недостатков БПЛА мультироторного типа является ограниченность емкости аккумуляторной батареи, что требует частого заряда аккумуляторных батарей, а значит и прекращения полетного задания.

Для увеличения времени выполнения полетных заданий мультикоптеров используют различные способы, например установку на борту аппарата аккумуляторных батарей большей емкости либо размещение зарядных станций по заданному маршруту полета [9, 10] и солнечных панелей на борту [11]. В настоящее время также разрабатываются различные способы беспроводного заряда бортовых аккумуляторных батарей [12–15].

Авторами предлагается нетрадиционный способ заряда бортовой аккумуляторной батареи мультикоптера во время полета, в основе которого лежит беспроводной (индукционный) способ заряда за счет энергии внешнего элек-

тромагнитного поля, созданного сторонними источниками, например токами, протекающими по контактному проводу электрифицированного железнодорожного транспорта или по проводам воздушных линий электропередач энергосистемы [16, 17].

Цель данной работы заключается в подтверждении возможности реализации и практического использования данного способа заряда бортовых аккумуляторных батарей во время полета БПЛА рядом с контактным проводом контактной сети переменного тока напряжением 27,5 кВ (50 Гц).

Конструктивные решения беспроводного способа заряда бортовой аккумуляторной батареи беспилотных летательных аппаратов

На рис. 1 приведена конструкция БПЛА (квадрокоптера) с возможностью беспроводного заряда бортовой аккумуляторной батареи в режиме полета.

К каркасу летательного аппарата с помощью радиальных штанг прикреплены приводные электродвигатели. Бортовая аккумуляторная батарея, расположенная на раме БПЛА, электрически соединена через регулятор оборотов с приводными электродвигателями. Снизу шасси посредством шарнирного механизма прикреплен поворотно-наклонный гиростабилизированный подвес с устройством видеонаблюдения.

Бортовая электрическая обмотка (БЭО) установлена на габаритном кольце, которое прикреплено внутренней поверхностью к корпусам электрических двигателей.

В случае разряда аккумуляторной батареи БПЛА сближается с проводами контактной сети электрифицированных железных дорог или высоковольтной линии энергосистемы, расположение которых определяется оператором либо по координатам, заложенным в программе полета. Сближение с проводами и удержание дистанции между БПЛА и токонесущим проводом контролируется датчиком напряженности электромагнитного поля, который срабатывает при напряженности, равной,

например, 0,27 кВ/см (соответствует дистанции примерно в 1 м). Сигнал с датчика поступает на бортовую систему обеспечения (на рис. 1 не показана), которая управляет работой приводных двигателей. В результате БПЛА «зависает» рядом с проводом или продолжает полет вдоль него по определенной траектории.

Второе условие является обязательным в случае воздушных линий электропередачи или контактной сети постоянного тока.

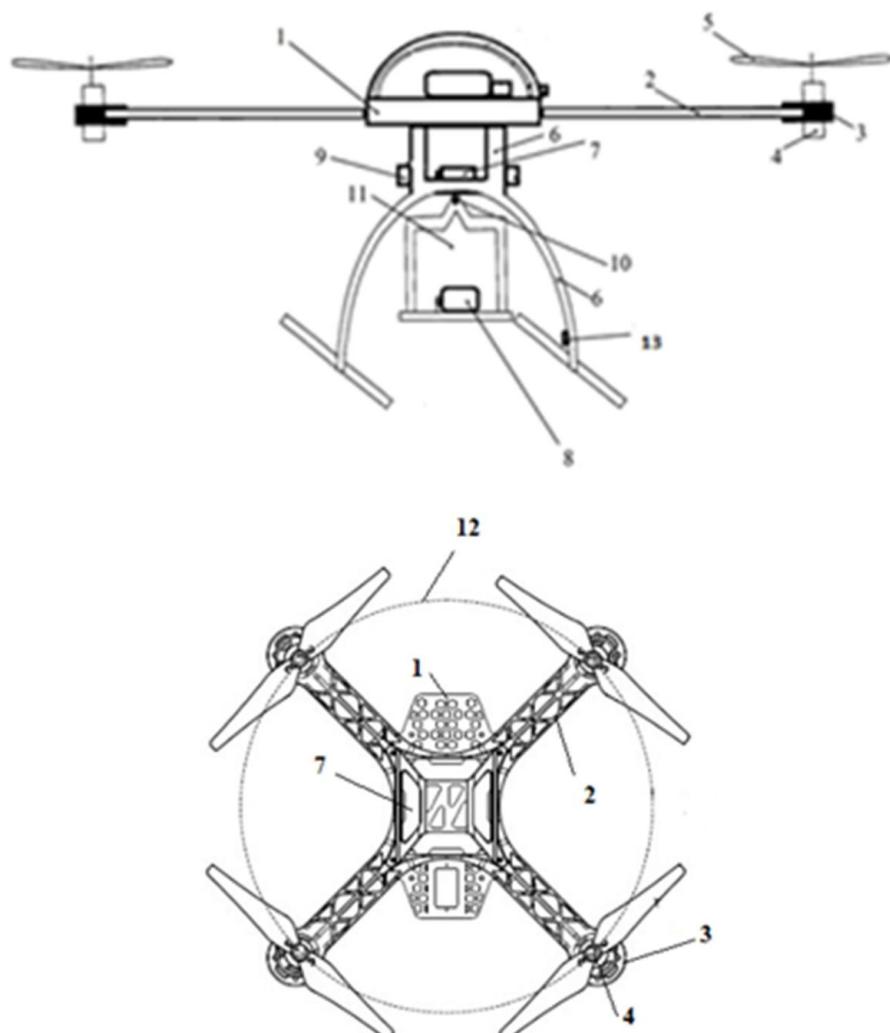


Рис. 1. Конструкция беспилотного летального аппарата с бортовой электрической обмоткой:
 1 – каркас; 2 – штанга; 3 – крепления; 4 – приводные электродвигатели; 5 – воздушные винты; 6 – шасси;
 7 – аккумуляторная батарея; 8 – устройство видеонаблюдения; 9 – регулятор оборотов; 10 – шарнир;
 11 – гиростабилизированный подвес; 12 – бортовая электрическая обмотка;
 13 – датчик напряженности электромагнитного поля

Fig. 1. Unmanned aerial vehicle design with onboard electrical winding:
 1 – frame; 2 – rod; 3 – fasteners; 4 – drive electric motors; 5 – propellers; 6 – chassis; 7 – battery;
 8 – video surveillance device; 9 – speed controller; 10 – hinge; 11 – gyro-stabilized suspension;
 12 – onboard electrical winding; 13 – electromagnetic field sensor

Электромагнитное поле, порожденное электрическими токами в проводах контактной сети электрифицированных железных дорог или проводах высоковольтных линий энергосистемы (источник энергии), индуцирует ЭДС в БЭО (приемник энергии), выводы которой подключены к электрической цепи заряда бортовой аккумуляторной батареи.

Устройство контроля заряда аккумуляторной батареи подключает зарядную БЭО через блок управления зарядом к выводам аккумуляторной батареи.

Под действием наводимой ЭДС в БЭО БПЛА, а, следовательно, и в аккумуляторной батарее, начинают протекать токи. Таким образом происходит подзаряд аккумуляторной батареи. При достижении необходимого уровня напряжения заряда устройство управления зарядом отключает БЭО от аккумуляторной батареи и заряд прекращается. Мультикоптер продолжает выполнять свое полетное задание.

Результаты эксперимента

Для проверки данного способа беспроводного подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА были проведены экспериментальные исследования процесса наведения ЭДС в БЭО.

При этом варьировались следующие параметры БЭО: диаметр, число витков, форма и сечение провода. Внешнее магнитное поле создавалось переменным электрическим током 15 А (50 Гц), протекающим по прямолинейному проводу.

Как и следовало ожидать, эффективность подзаряда аккумуляторной батареи в прямую зависела от диаметра БЭО.

Несимметричное положение БЭО относительно провода с током приводило к появлению высших гармоник в кривой, наводимой ЭДС. Данный факт привел к необходимости использования LC-фильтров в зарядном блоке.

Математическое моделирование

Математическое моделирование проводилось в пакете COMSOL Multiphysics 6.2 с применением метода конечных элементов [18–21]. Расчетная модель для простого типа контактной подвески представлена на рис. 2.

Исходя из требуемого значения зарядного напряжения бортовой аккумуляторной батареи определялись параметры БЭО. Расчеты проводились при фиксированных величинах расстояния между контактным проводом и БЭО (h) и продольной скорости полета БПЛА (v). Значения v выбирались из диапазона от 2 до 10 км/ч.

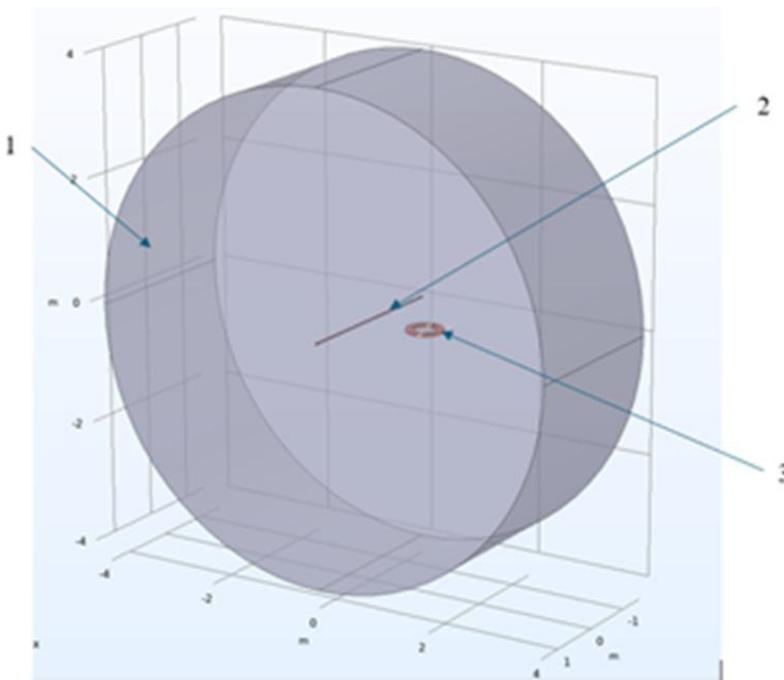


Рис. 2. Построение математической модели:

1 – расчетная область; 2 – контактный/высоковольтный провод; 3 – бортовая электрическая обмотка

Fig. 2. Construction of a mathematical model:

1 – calculation area; 2 – contact/high-voltage wire; 3 – onboard electrical winding

При этом принималось, что по контактному проводу протекает переменный ток с амплитудным значением 300 А. Наиболее подробно результаты расчетов приведены в [22, 23].

Также были определены зависимости величины наводимой ЭДС от числа витков БЭО при различных диаметрах обмотки (d) (рис. 3). Можно видеть, что данные зависимости имеют линейный характер. Кроме простой контактной подвески, моделировался вариант использования для подзаряда цепной одинарной контактной подвески.

В этом случае математическое моделирование заряда аккумуляторной батареи БПЛА с БЭО проводилось с учетом несущего троса, по которому, как показали расчеты, может протекать ток величиной до 50 % от тока контактного провода (рис. 4). Предполагалось, что БЭО находится в одной горизонтальной плоскости с несущим тросом (справа от него) и траектория полета аппарата параллельна продольной оси прямолинейного несущего троса. Токи в контактном проводе и несущем тросе принимались равными 500 А и 158,83 А соответственно.

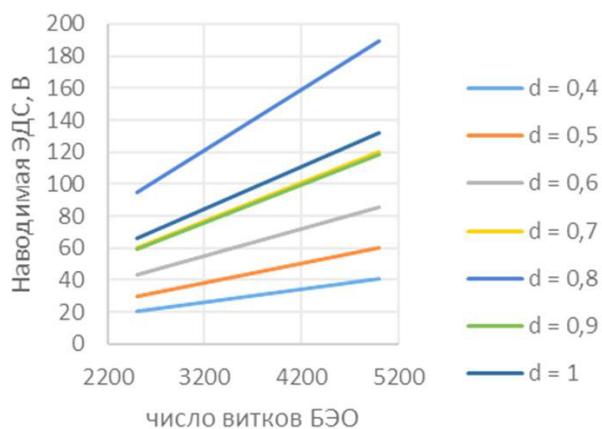


Рис. 3. Зависимость величины наводимой ЭДС от числа витков при различных диаметрах бортовой электрической обмотки
Fig. 3. Dependence of the induced EMF on the number of turns at the different diameters of the board electrical winding

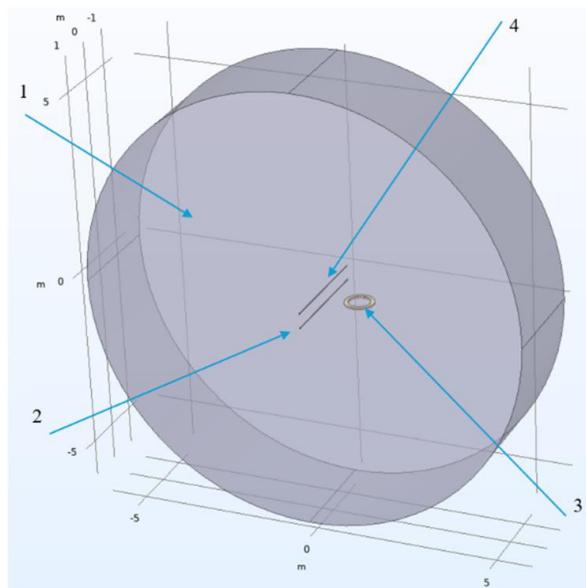


Рис. 4. Построение математической модели с учетом несущего троса контактной подвески:
1 – расчетная область; 2 – контактный провод; 3 – электрическая обмотка; 4 – несущий трос
Fig. 4. Construction of a mathematical model taking into account the contact suspension cable:
1 – calculation area; 2 – contact wire; 3 – electrical winding; 4 – contact suspension cable

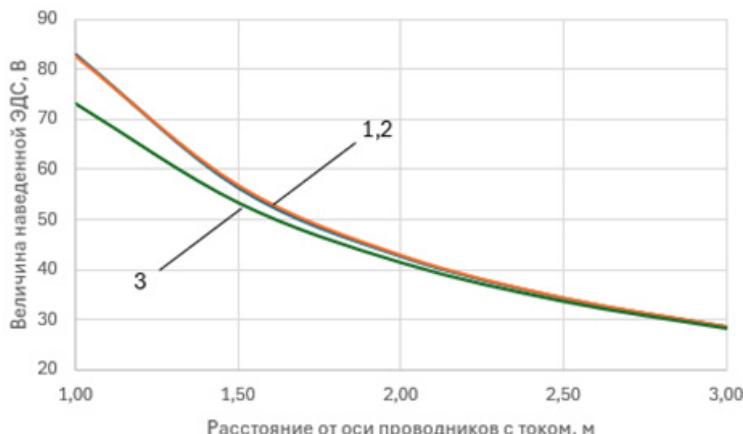


Рис. 5. Зависимость величины наведенной ЭДС в бортовой электрической обмотке от расстояния до источника электромагнитного поля (контактной сети переменного тока):

1 – бортовая электрическая обмотка на уровне контактного провода; 2 – бортовая электрическая обмотка равнодistantа от контактного провода и несущего троса; 3 – бортовая электрическая обмотка на уровне несущего троса

Fig. 5. Dependence of the induced EMF value in the BEW on the distance to the electromagnetic field source (AC contact network):

1 – board electrical winding at the level of the contact wire; 2 – board electrical winding equidistant from the contact wire and the supporting cable; 3 – board electrical winding at the level of the supporting cable

Расчеты проводились для разных расстояний между БЭО и несущим тросом. По результатам расчетов построена зависимость (рис. 5, кривая 3).

Моделирование показало, что передача энергии будет наиболее эффективна, если БПЛА будет располагаться сбоку от контактного провода: в этом случае при числе витков в бортовой обмотке, равном, например, 3 880 и ее диаметре 0,9 м, величина наведенной ЭДС составит ≈ 80 В (рис. 5, кривые 1 и 2). Если же БПЛА находится на уровне несущего троса, то наводимая ЭДС уменьшается до ≈ 73 В.

Исследования показали, что необходимое значение наводимой ЭДС можно получить с помощью конструктивных мер (выбором диаметра БЭО) или установлением вида траектории полета (изменением расстояния от источника внешнего электромагнитного поля – кон-

тактного или несущего провода до приемника энергии – БЭО БПЛА).

Заключение

1. Результаты исследований и расчетов подтвердили реальную возможность использования данного способа беспроводного подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА при наличии источника внешнего электромагнитного поля.

2. Выполнена оценка величины наводимой ЭДС в БЭО летательного аппарата в зависимости от ее параметров, геометрических размеров и расположения относительно источника внешнего электромагнитного поля.

3. Данный способ может быть рекомендован для увеличения времени непрерывного полета БПЛА при мониторинге протяженных инфраструктурных электрифицированных объектов.

Список литературы

1. Цифровая трансформация сельского хозяйства на основе беспилотных летательных аппаратов / С.В. Шайтура, М.Д. Князева, Л.П. Белю и др. // Вестн. Курск. гос. с.-х. акад. 2021. № 7. С. 174–182.
2. Уланов С.И., Криводубский О.А., Никитина А.А. Анализ возможностей применения летательных аппаратов в контроле состояния местности // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 1 (32). С. 94–102.
3. Шпенст В.А., Морозова О.Ю., Белошицкий А.А. Устройства для диагностики объектов электроэнергетики с помощью беспилотных авиационных систем // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 6. С. 503–508.
4. Голиков Д.В. К вопросу о возможностях программы автономных беспилотных авиационных систем в интересах правоохранительных органов // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2025. С. 140–145.
5. Устинов С.Д. Использование беспилотных летательных аппаратов для борьбы с лесными пожарами // Экология и экологическое образование в современном мире : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Орехово-Зуево, 2024. С. 132–137.
6. Кореньков Д.А. Система диагностирования в ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2023. № 12. С. 18–22.

7. Потапов Г.Ю., Софин А.В., Большаков Р.С. Возможности использования технологий беспилотных летательных аппаратов на Восточно-Сибирской железной дороге // Молодая наука Сибири. 2021. № 1 (11). С. 169–175.
8. Костюченко К.Л., Фараносов Д.А. Беспилотные мобильные средства: инновации и угрозы // Инновационный транспорт. 2024. № 1 (51). С. 36–41.
9. Михайлов М.В., Соловьев А.С., Монастырский Д.Я. Применение беспилотных летательных аппаратов с увеличенной дальностью полета для контроля состояния инфраструктуры железнодорожного высокоскоростного транспорта // VI Бетанкуровский международный инженерный форум : сб. тр. СПб., 2024. Т. 2. С. 55–59.
10. Пат. № 2837679 Рос. Федерации. Система посадки беспилотного летательного аппарата вертикального взлета и посадки / К.К. Ким, Е.Б. Королева, М.В. Михайлов и др. № 2024120739 ; заявл. 18.07.2024 ; опубл. 03.04.2025, Бюл. № 10. 13 с.
11. Назаренко П.А., Сатарова В.И., Макарова Л.В. Модель БПЛА на солнечной энергии // Изв. Тул. гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 10. С. 44–51.
12. Никитин В.В., Васильев В.А., Чжао Т. Бесконтактная передача энергии на экипажи высокоскоростного магнито-левитационного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 23–26.
13. Liu Y., Zhang B., Zeng Ya. High-Efficiency Wireless Charging System for UAVs Based on PT-Symmetric Principle // Drones and Autonomous Vehicles. 2025. Vol. 2. Iss. 2. DOI : 10.70322/dav.2025.10008.
14. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs. A Comprehensive Survey / M.T. Nguyen, C.V. Nguyen, L.H. Truong et al. // Electronics. 2020. Vol. 9. Iss. 3. DOI : 10.3390/electronics9030461.
15. Энергия по лазеру: проект энергоснабжения коптера от китайских инженеров // Военное обозрение : сайт. URL : <https://topwar.ru/209979-jenergija-po-lazeru-proekt-jenergosnabzhenija-koptera-ot-kitajskih-inzhenerov.html> (дата обращения: 21.05.25).
16. Пат. № 042897 Евразийское патентное ведомство. Беспилотный летательный комплекс / К.К. Ким. № 202000255 ; заявл. 30.07.2020 ; опубл. 31.03.2023, Бюл. № 3. 6 с.
17. Ким К.К., Королева Е.Б., Ткачук А.А. Беспилотные электрические летательные аппараты и комплексы для мониторинга на железнодорожном транспорте // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 6 (115). С. 44–51.
18. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2 / А.В. Коваленко, А.М. Узденова, М.Х. Уртенов и др. СПб : Лань, 2022. 228 с.
19. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М. : Наука, 1989. 432 с.
20. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
21. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей : Справочная книга. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 488 с.
22. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока / К.К. Ким, Е.Б. Королева, П.К. Рыбин и др. // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 463–476.
23. Математическое моделирование бесконтактного процесса подзаряда аккумуляторной батареи мультикоптера от внешнего электромагнитного поля / К.К. Ким, Е.Б. Королева, А.С. Ватаев и др. // Вестн. Москов. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2024. № 4 (151). С. 28–46.

References

1. Shaitura S.V., Knyazeva M.D., Belyu L.P., Barbasov V.K., Feoktistova V.M. Tsifrovaya transformatsiya sel'skogo khozyaistva na osnove bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Digital transformation of agriculture based on unmanned aerial vehicles]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2021. no 7, pp. 174–182.
2. Ulanov S.I., Krivodubskii O.A., Nikitina A.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya letatel'nykh apparatov v kontrole sostoyaniya mestnosti [Analysis of the possibilities of using aircraft in monitoring the condition of the terrain]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of artificial intelligence], 2024, no 1 (32), pp. 94–102.
3. Shpenst V.A., Morozova O.Yu., Beloshitskii A.A. Ustroistva dlya diagnostiki ob'ektorov elektroenergetiki s pomoshch'yu bespilotnykh aviationsionnykh sistem [Devices for diagnostics of electric power facilities using unmanned aircraft systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Bulletins of higher educational organizations. Instrument engineering], 2021, Vol. 64, no 6, pp. 503–508.
4. Golikov D.V. K voprosu o vozmozhnostyakh programmy avtonomnykh bespilotnykh aviatsionnykh sistem v interesakh pravo-okhranitel'nykh organov [On the question of the possibilities of the autonomous unmanned aircraft systems program in the interests of law enforcement agencies]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Informatizatsiya i informatsionnaya bezopasnost' pravookhranitel'nykh organov»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Informatization and information security of law enforcement agencies】. Moscow, 2025, pp. 140–145.
5. Ustinov S.D. Ispol'zovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya bor'by s lesnymi pozharami [The use of unmanned aerial vehicles to fight forest fires]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekologiya i ekologicheskoe obrazovanie v sovremennom mire»* [Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference «Ecology and environmental education in the modern world】. Orekhovo-Zuyevo, 2024, pp. 132–137.
6. Koren'kov D.A. Sistema diagnostirovaniya v OAO «RZHD» [Diagnostic system in JSC «Russian Railways】. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2023, no 12, pp. 18–22.
7. Potapov G.Yu., Sofin A.V., Bol'shakov R.S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnologii bespilotnykh letatel'nykh apparatov na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The possibilities of using unmanned aerial vehicle technologies on the East Siberian Railway]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no 1 (11), pp. 169–175.
8. Kostyuchenko K.L., Faranov D.A. Bespilotnye mobil'nye sredstva: innovatsii i ugrozy [Unmanned mobile vehicles: innovations and threats]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2024, no 1 (51), pp. 36–41.
9. Mikhaylov M.V., Solov'ev A.S., Monastyrs'kii D.Ya. Primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov s uvelichennoi dal'nost'yu poleta dlya kontrolya sostoyaniya infrastruktury zheleznodorozhnogo vysokoskorostnogo transporta [The use of un-

- manned aerial vehicles with extended flight range to monitor the state of the infrastructure of high-speed railway transport]. *Sbornik trudov «VI Betankurovskii mezdunarodnyi inzhenernyi forum»* [Proceedings «VI Betancourt International Engineering Forum】. Saint Petersburg, 2024, Vol. 2, pp. 55–59.
10. Kim K.K., Koroleva E.B., Mikhailov M.V., Solov'ev A.S. Patent RU 2837679 C1, 03.04.2025.
 11. Nazarenko P.A., Satarova V.I., Makarova L.V. Model' BPLA na solnechnoi energii [A solar-powered UAV model]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletins of Tula State University. Technical sciences], 2021, no 10, pp. 44–51.
 12. Nikitin V.V., Vasil'ev V.A., Zhao T. Beskontaktnaya peredacha energii na ekipazhi vysokoskorostnogo magnitolevitation-nogo transporta [Contactless energy transfer to crews of high-speed magnetolevitation transport]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2022, no 1, pp. 23–26.
 13. Liu Y., Zhang B., Zeng Ya. High-Efficiency Wireless Charging System for UAVs Based on PT-Symmetric Principle // *Drones and Autonomous Vehicles*, 2025, Vol. 2, iss. 2. DOI : 10.70322/dav.2025.10008.
 14. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H., Le A.M., Quyen T.V., Masaracchia A., Teague K.A. Electromagnetic Field Based WPT Technologies for UAVs. A Comprehensive Survey // *Electronics*, 2020, Vol. 9, iss. 3. DOI : 10.3390/electronics9030461.
 15. Energiya po lazeru: proekt energosnabzheniya koptera ot kitaiskikh inzhenerov (Elektronnyi resurs) [Laser Energy: a copter power supply project from Chinese engineers (Electronic resource)]. Available at: <https://topwar.ru/209979-jenergija-po-lazeru-proekt-jenergosnabzhenija-koptera-ot-kitajskih-inzhenerov.html> (Accessed May 21, 2025).
 16. Kim K.K. Patent 042897 B1, 31.03.2023.
 17. Kim K.K., Koroleva E.B., Tkachuk A.A. Bespilotnye elektricheskie letatel'nye apparaty i kompleksy dlya monitoringa na zheleznodorozhnom transporte [Unmanned electric aircraft and complexes for monitoring on railway transport]. *Transport Rossiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. The journal about science, practice, and economics], 2024, no. 6 (115), pp. 44–51.
 18. Kovalenko A.V., Uzdenova A.M., Urtenov M.KH., Nikonenko V.V. Matematicheskoe modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov v srede Comsol Multiphysics 5.2 [Mathematical modeling of physico-chemical processes in the Comsol Multiphysics 5.2 environment]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2022. 228 p.
 19. Samarskii A.A., Gulin A.V. Chislennye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 432 p.
 20. Zienkiewicz O.C. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.
 21. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Raschet induktivnostei: Spravochnaya kniga [Calculation of inductors: a reference book]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
 22. Kim K.K., Koroleva E.B., Rybin P.K., Stepanskaya O.A. Bespilotnyi letatel'nyi apparat dlya monitoringa kontaktnoi seti peremennogo toka [An unmanned aerial vehicle for monitoring an AC contact network]. *Innovatsionnye transportnye sistemy i tekhnologii* [Innovative transport systems and technologies], 2024, Vol. 10, no 4, pp. 463–476.
 23. Kim K.K., Koroleva E.B., Vataev A.S., Mikhailov M.V., Solov'ev A.S. Matematicheskoe modelirovaniye beskontaktnogo protsesssa podzaryadya akkumulyatornoi batrei mul'tikoptera ot vneshnego elektromagnitnogo polya [Mathematical modeling of the contactless process of charging a multicopter battery from an external electromagnetic field]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie* [Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Mechanical Engineering Series], 2024, no 4 (151), pp. 28–46.

Информация об авторах

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: kimkk@inbox.ru.

Королева Елена Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: elzazybina@yandex.ru.

Михайлов Михаил Владимирович, аспирант кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: mihanikk2001@gmail.com.

Монастырский Дмитрий Ярославович, аспирант кафедры теоретических основ электротехники и энергетики, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: swen_88@mail.ru.

Information about the authors

Konstantin K. Kim, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: kimkk@inbox.ru.

Elena B. Koroleva, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: elzazybina@yandex.ru.

Mikhail V. Mikhailov, Ph.D. Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: mihanikk2001@gmail.com.

Dmitrii Ya. Monastyrskii, Ph.D. Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering, Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: swen_88@mail.ru.