

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление –Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst636732>

© К.К. Ким, Е.Б. Королева, П.К. Рыбин, О.А. Степанская
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. Показать возможность использования бесконтактного способа подзаряда аккумуляторной батареи, установленной на беспилотном летательном аппарате, в процессе мониторинга контактной сети переменного тока электрифицированного железнодорожного транспорта.

Материалы и методы. Создана математическая модель в программе COMSOL Multiphysics® 6.0 с использованием уравнений Максвелла и метода конечных элементов для расчета наведенной электродвижущей силы в бортовой обмотке летательного аппарата.

Результаты. Определены оптимальные режимы эксплуатации разработанного летательного аппарата. Показана экономическая целесообразность его использования для мониторинга контактной сети железнодорожного транспорта.

Практическая значимость. Разработан беспилотный летательный аппарат, характеризующийся увеличенной продолжительностью беспосадочного полета, а, следовательно, увеличенным временем непрерывного мониторинга.

Ключевые слова: время полета; электромагнитное поле; тяговый ток; контактный провод; заряд; беспилотный летательный аппарат; траектория.

Как цитировать:

Ким К.К., Королева Е.Б., Рыбин П.К., Степанская О.А. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 4. С. 463–476. doi: 10.17816/transsyst636732

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда, научный проект № 24-29-00159

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject –Electrotechnical complexes and systems

© **K.K. Kim, E.B. Koroleva, P.K. Rybin, O.A. Stepanskaya**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

(St. Petersburg, Russia)

UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR MONITORING THE AC CONTACT NETWORK

Aim. To demonstrate the feasibility of using a contactless battery recharging method for an unmanned aerial vehicle during the monitoring of the AC contact network in railway transport.

Materials and methods. A mathematical model was created using the COMSOL Multiphysics 6.0 program. Maxwell's equations and the finite element method were applied to calculate the induced electromotive force across the on-board winding of an aircraft.

Results. We determined the optimal operating modes of the developed aircraft. The economic feasibility of its use for monitoring the contact network of railway transport is shown.

Practical significance. We developed an unmanned aerial vehicle with extended nonstop flight duration and an increased capacity for continuous monitoring.

Keywords: flight time; electromagnetic field; traction current; contact wire; charge; unmanned aerial vehicle; trajectory.

To cite this article:

Kim KK, Koroleva EB, Rybin PK, Stepanskaya OA. An unmanned aerial vehicle for monitoring an AC contact network. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(4):463–476. doi: 10.17816/transsyst636732

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная и надежная эксплуатация электрифицированных железных дорог России, а их протяженность составляет 42,9 тыс. км (из них 25 тыс. км приходится на переменный ток), напрямую связана с постоянным мониторингом состояния контактной сети. С недавних пор для этого используют электрические беспилотные летательные аппараты (БЛА), в большинстве своем, мультикоптерного вида [1–3].

Однако, кроме достоинств, БЛА свойственны некоторые недостатки, например, недостаточное полетное время, что обусловлено относительно малой емкостью бортовой аккумуляторной батареи (БАБ), а, следовательно, приводит к необходимости прерывания операции мониторинга объекта.

Данную проблему можно решить разными способами, одним из которых является увеличение емкости БАБ, но данный способ не всегда приемлем, поскольку увеличение емкости приведет к увеличению ее массы, и, следовательно, самого летательного аппарата.

Другим решением является применение на БЛА воздушных винтов с изменяемым углом атаки лопастей, но данный способ требует специального оборудования для контроля ориентации лопастей, а также специальных конструкций винтов, что усложняет конструкцию летательного аппарата, понижает надежность и ухудшает массогабаритные показатели.

Расположение фотоэлектрических преобразователей на БЛА для подзаряда БАБ не в полной мере решает обозначенную проблему, т.к. этот способ может быть использован только в дневное время суток [4].

В настоящей работе описывается мультироторный БЛА, в котором подзаряд БАБ осуществляется во время полета аппарата вблизи запитанного переменным током контактного провода. Для подзаряда БАБ используется энергия внешнего магнитного поля, созданного тяговым током.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ БЛА С КОЛЬЦЕВОЙ КАТУШКОЙ

Новизна конструкции заключается в следующем – на борту БЛА установлена электрическая катушка с обмоткой (в частном случае кольцевой формы) для бесконтактного заряда БАБ во время полета БЛА за счет энергии магнитного поля, созданного токами, протекающими по контактной сети переменного тока [5, 6]. Следует отметить, что источником данного поля могут быть токи в проводах воздушной линии электропередачи.

В центре БЛА расположен несущий каркас 1 (Рис. 1), к которому прикреплены одними своими концами радиальные штанги 2. На других концах штанг 2 с помощью креплений 3 установлены электродвигатели 4 (например, AXI 2814/22, 037 или Racerstar Racing Edition 2306 2700 KV) с воздушными винтами 5. На шасси 6 установлена БАБ 7 (например, LiPo 4S 1500 mAh или 3500 mAh). Электродвигатели 4 через регулятор оборотов 9 запитываются от БАБ. На центральной части каркаса 1 (снизу) установлен гиростабилизированный подвес 11 с видеокамерой 8.

На корпусах электродвигателей 4 своей внутренней поверхностью закреплено габаритное кольцо с кольцевой катушкой 12. Возможен вариант, когда эта катушка располагается ниже воздушных винтов, тогда подзаряд осуществляется за счет токов, протекающих по несущему тросу контактной подвески.

На борту БЛА расположены система обеспечения полета, система спутниковой навигации и система связи с наземной базой.

БЛА может эксплуатироваться как в «автономном» режиме, так и в «ручном».

В случае «автономного» режима полет БЛА происходит по программе, заложенной в бортовой компьютер, куда поступают также сигналы с блока спутниковой навигации.

Если полет БЛА выполняется в «ручном» режиме управление реализуется по командам с наземной базы и по сигналам блока спутниковой навигации.

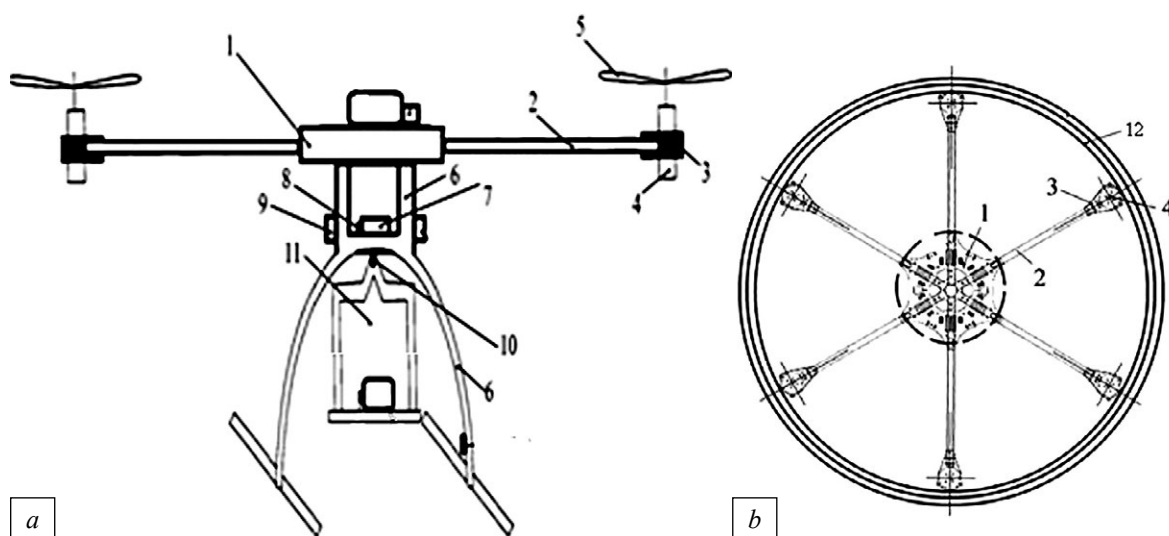


Рис. 1. БЛА: а) вид сбоку; б) вид сверху

Fig. 1. The UAV: a) side view; b) top view

И в первом, и во втором случае имеет место визуальный контроль за полетом БЛА с последующей передачей данных о полете на наземную базу управления.

При разряде БАБ БЛА сближается с запитанным контактным проводом. Сближение происходит до момента срабатывания датчика напряженности электромагнитного поля при 1 кВ/см, что составляет пробивную напряженность влажного воздуха и «зависает» или продолжает полет на фиксированном расстоянии от контактного провода.

Принцип подзаряда БАБ заключается в следующем: во время мониторинга объекта (контактной сети, путевого полотна и т.п.) БЛА выполняет полет по определенной траектории или «зависает» в непосредственной близости от контактного провода. Под действием переменного магнитного поля тягового тока в обмотке кольцевой катушки индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), под действием которой в цепи, состоящей из обмотки кольцевой катушки, зарядного устройства и аккумуляторной батареи, начинает протекать электрический ток. Когда аккумуляторная батарея полностью зарядится, БАБ отключается от обмотки кольцевой катушки с помощью устройства управления зарядом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДЗАРЯДА БАБ

С целью подтверждения возможности использования предложенного способа были проведены исследования данного процесса на примере подзаряда БАБ Phantom 4/4 Pro Intelligent Flight Battery 5870 mAh от контактной сети железнодорожного транспорта напряжением 27,5 кВ (50 Гц). Батарея обладает повышенной емкостью в 5870 мА·ч и рабочим напряжением 15,2 В. Ей оборудуются квадрокоптеры типа Phantom 4 Pro+V2.0 [7].

Для этого была создана математическая модель в программе COMSOL Multiphysics® 6.0 с использованием метода конечных элементов.

В качестве программы для математического моделирования была выбрана программа для решения мультифизических задач – COMSOL Multiphysics® 6.0. Выбор именно этой программы обусловлен возможностью моделирования динамических режимов и расчетов в 3D.

На модели (Рис. 2) показаны сетка конечных элементов, контактный провод и обмотка кольцевой катушки. Расчет производился в воздушном пространстве, окружающем конструктивные элементы модели [8].

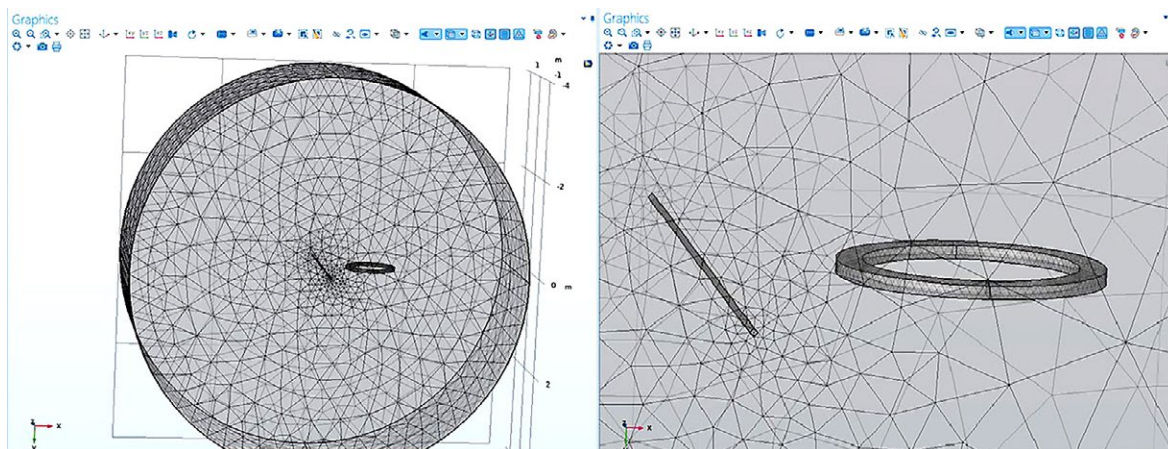


Рис. 2. Геометрия математической модели

Fig. 2. Geometry of the mathematical model

В качестве начальных данных выступали: предварительно рассчитанное число витков обмотки кольцевой катушки и амплитудное значение тока в контактном проводе.

Постановка задачи формулировалась с помощью системы уравнений электромагнитного поля.

Считалось, что кольцевая катушка осуществляет движение на определенном постоянном расстоянии от контактного провода. Также делалось предположение, что магнитного поля за пределами расчетной области нет (использовалось условие магнитной изоляции на границе расчетной области). Расположение обмотки кольцевой катушки задавалось с помощью области Coil, а контактный провод – с помощью настройки типа катушки (coiltype) в виде линейного провода (linear). Сама катушка описывалась с помощью типа катушки (circular).

Для получения зарядного напряжения необходимой величины, число витков обмотки кольцевой катушки (3880 витков) находилось с учетом этого требования. При этом считалось, что обмотка совершает движение с постоянной продольной скоростью (v) на одном и том же удалении (h) от контактного провода.

Были приняты ниже перечисленные допущения:

- 1) плотность тягового тока постоянна по всему сечению контактного провода;
- 2) провод контактной сети имеет форму тонкого прямого цилиндра (схема «зиг-заг» не учитывается);
- 3) витки по поперечному сечению обмотки кольцевой катушки намотаны равномерно;

- 4) намагничивающая сила тягового тока не оказывает заметного влияния на результирующее магнитное поле;
- 5) влияние вихревых токов в электропроводящих крепежных элементах на величину наведенной в обмотке электродвижущей силы (ЭДС) – незначительно;
- 6) переходные процессы в контактной сети отсутствуют;
- 7) воздушные потоки и сила аэродинамического сопротивления не влияют на полет БЛА.

На первом этапе исследований рассматривался случай «зависания» БЛА относительно контактного провода, по которому протекал синусоидальный ток. Действующее значение тока определялось по рекомендациям, приведенным в [9], как среднестатистическое значение. Для магистрального участка контактной сети оно составило 300 А.

Расстояние от кольцевой катушки диаметром 0,8 м до контактного провода составляло 1 м.

Для расчета ЭДС, наведенной в обмотке кольцевой катушки, рассчитывалось потокоцепление магнитного потока поля тягового тока с данной обмоткой с помощью встроенной процедуры Comsol (был использован интерфейс Parametric Sweep). В результате было получено напряжение на ее выводах, равное 49,1 В.

На втором этапе рассматривался случай полета БЛА по прямолинейной траектории вдоль контактного провода с постоянной скоростью 2 м/с. Допущения 4) и 6), а также линейная постановка задачи позволили расчет ЭДС в движущейся обмотке выполнить для квазистационарного случая.

В начале для текущего значения времени с помощью метода конечных элементов рассчитывалось потокоцепление (Ψ) по специально созданной математической модели (Рис. 3). В данной модели были применены сочетания подвижных и деформируемых сеток. На рис. 3 области, которые подвергаются деформации в направлении оси x обозначены позициями 1 и 2, а недеформируемая область вокруг обмотки помечена – позицией 3. Области, которым свойственна деформация по оси y , пронумерованы как 4 и 5. Область вокруг контактного провода (она неподвижна и недеформирована) обозначена позицией 6.

С использованием алгоритмов численного дифференцирования рассчитывалась ЭДС по формуле:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

При полете БЛА наведенная в обмотке кольцевой катушки ЭДС содержит две компоненты: первая обусловлена переменным характером магнитного поля тока в контактном проводе, вторая возникает при движении БЛА с кольцевой катушкой относительно контактного провода.

Расчеты показали, что доля ЭДС, обусловленная движением БЛА, не превышает сотых долей вольт.

Для усиления влияния движения БЛА на величину индуцированной ЭДС было предложено выполнять полет по траектории, отличной от прямолинейной, на постоянной высоте полета. Рассматривалось два вида траекторий полета: вариант 1, траектория «синусоида», причем плоскость, в которой лежит траектория, находится снизу от контактного провода на постоянном расстоянии от него (Рис. 4а), а ось симметрии синусоиды совпадает с проекцией контактного провода на плоскость траектории; вариант 2, траектория «синусоида», сбоку от контактного провода на некотором расстоянии от него, причем траектория полета и контактный провод лежат в одной горизонтальной плоскости (Рис. 4б).

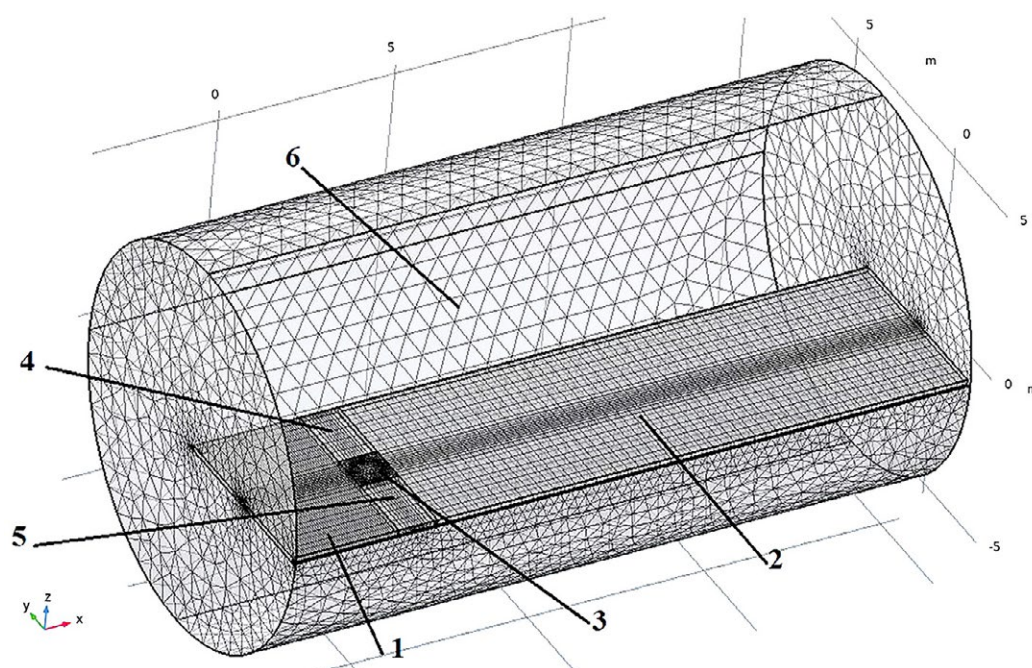


Рис. 3. Математическая модель для расчета ЭДС при полете БЛА вдоль контактного провода

Fig. 3. The mathematical model for calculating the EMF when an UAV flies along the contact wire

Полетная траектория типа «синусоида» представлялась в виде сочетания прямолинейного движения вдоль контактного провода (ось x) с постоянной скоростью и колебаний относительно поперечной оси (ось y):

$$dx = v \cdot t,$$

где v – скорость движения, м/с; t – время, с;

$$dy = A \cdot \sin(2\pi \frac{t}{T}),$$

где A – амплитуда поперечных перемещений обмотки БЛА; T – период этих колебаний, с (Рис. 4).

Для варианта 1 плоскость, в которой лежит траектория полета БЛА находилась ниже горизонтальной плоскости контактного провода на 0,5 м. исследовались случаи, когда обмотка совершала поперечные синусоидальные колебания с амплитудами, равными 0,25 м; 0,5 м; 0,75 м и 1 м [10].

В варианте 2 ось симметрии синусоидальной траектории на 1,6 метров отстояла от продольной оси контактного провода. Поперечные синусоидальные колебания обмотки имели амплитуду, равную 0,25 и 0,5 м, и период – 0,25 и 0,5 с.

Скоростям полета вдоль провода придавались значения: 2 м/с и 10 м/с.

Некоторые результаты расчета приведены на Рис. 5.

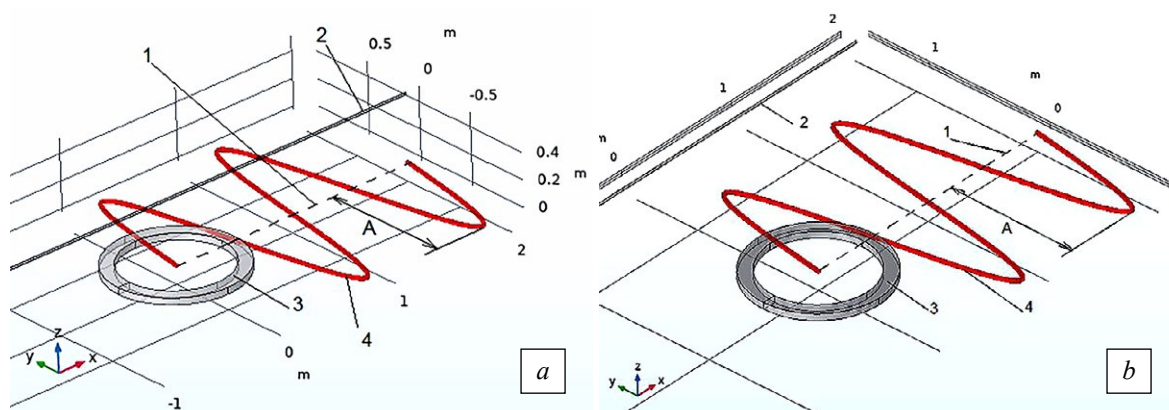


Рис. 4. Полетная траектория БЛА: а) под проводом, б) сбоку от провода:

1 – ось направления прямолинейного движения; 2 – контактный провод;

3 – обмотка кольцевой катушки; 4 – траектория полета

Fig. 4. The flight path of the UAV: a) under the wire, b) to the side of the wire:

1 is the axis of the direction of rectilinear motion; 2 is the contact wire; 3 is the winding of the annular coil; 4 is the flight path

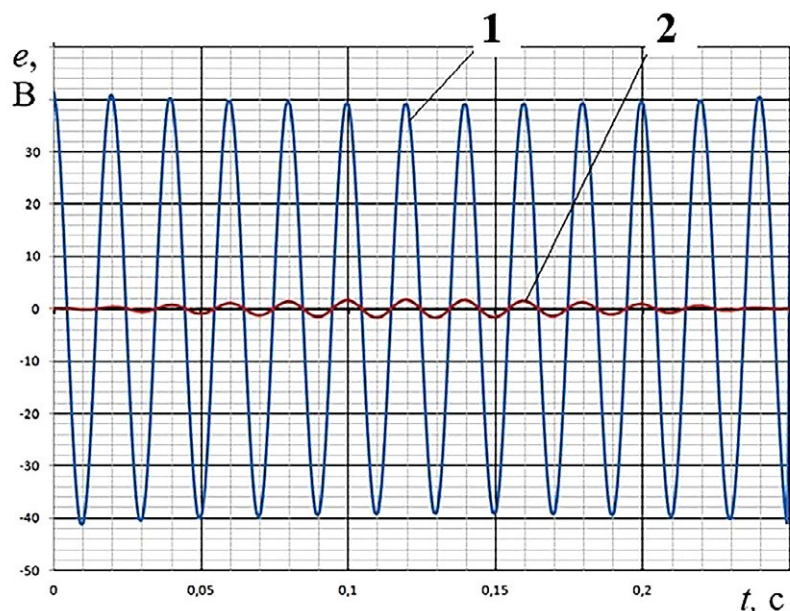


Рис. 5. Зависимость ЭДС в обмотке при движении вдоль контактного провода с переменным током частотой 50 Гц и действующим значением 300 А: кривая 1 – вариант 2; кривая 2 – вариант 1

Fig. 5. The dependence of the EMF across the winding when moving along the contact wire with an alternating current of 50 Hz and the effective value of 300 A: curve 1 – variant 2; curve 2 – variant 1

При полете БЛА по траектории варианта 2 значения наводимой ЭДС в обмотке кольцевой катушки достаточны для подзаряда БАБ [11–16].

Результаты расчетов показали сильную зависимость величины наведенной ЭДС обмотки от параметров переменного магнитного поля, созданного тяговым током, и незначительную – от скорости полета аппарата [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОоды

1. Наибольшие значения ЭДС, наводимой в обмотке кольцевой катушки, наблюдаются при полете БЛА сбоку от контактного провода с переменным тяговым током по траектории «синусоида».
2. Амплитуда наводимой ЭДС в первую очередь зависит от амплитуды и частоты магнитного поля, созданного тяговым током, а параметры полета БЛА не оказывают существенного влияния на величину ЭДС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования, описанные в статье, выполнялась в рамках научного проекта № 24-29-00159 гранта, предоставленного Российским Научным

Фондом на 2024–2025 гг. по результатам конкурса 2023 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами».

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дроны на железных дорогах. Ожидание или реальность? [internet] Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://www.djimsk.ru/guides/2022/02/16/drony-na-zheleznih-dorogah-ozhidanie-vs-realnost>
2. Применение беспилотных летательных аппаратов в железнодорожном комплексе. [internet] Дата обращения: 29.11.2023. Режим доступа: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/227>
3. Классификация БЛА по летным характеристикам. [internet] Дата обращения: 29.11.2022. Режим доступа: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>
4. Зеленцов В.В., Тарасов В.С., Шаповалов Л.А. Оценка изменения продолжительности полета беспилотного летательного аппарата с электродвигателем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2013. № 3(92). С. 77–85. EDN: RBGXGB
5. Евразийский патент РФ 2006007 / 31.03.2023 Ким К.К. Беспилотный летательный комплекс.
6. Валинский О.С., Ким К.К. Разработки Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 2. С. 8–14.
7. Phantom 4 Pro Plus V2.0. Authorized retail store. Каталог продукции. [internet] Дата обращения: 29.07.2024. Режим доступа: <https://aeromotus.ru/product/dji-phantom-4-pro-plus-v2-0>
8. Ватаев А.С., Михайлов М.В., Соловьев А.С. Математическое моделирование бесконтактного заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата. В кн.: Транспорт России: проблемы и перспективы: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2022 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Коллектив авторов. Том 2. Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2022. С. 103–106. EDN: MEEULT

9. Некрасов О.А., Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А., Рахманинов В.И. Режимы работы магистральных электровозов. М.: Транспорт, 1983.
10. Михайлов М.В., Соловьев А.С., Рогов А.С., и др. Бесконтактный способ заряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата. В кн.: Современная наука, общество, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 сентября 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 30–33. EDN: XXMEUI
11. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. Дата обращения: 29.07.2024. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/59070/>
12. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
13. Bins K.J., Lawrenson P. Analysis and computation of electric and magnetic problems. Oxford: Pergamon Press, 1963. Дата обращения: 04.08.2024. Режим доступа: <https://archive.org/details/analysiscomputat0000binn>
14. Flankl M., Wellerdieck T., Tüysüz A., Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation // IET Electric Power Applications. 2017. Т. 12, № 3. С. 357–364. doi: 10.1049/iet-epa.2017.0480
15. Chin J.C., Gray J.S., Jones S.M., Berton J.J. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Florida, Kissimmee. doi: 10.2514/6.2015-1587
16. Ким К.К., Королева Е.Б., Ватаев А.С. Мониторинг объектов инфраструктуры железных дорог с применением беспилотных летательных аппаратов. В кн.: Eltrans – 2023: сборник трудов XI Международного симпозиума, Санкт-Петербург, 31 мая – 02 июня 2023 года / Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург: ООО «ИПК «НП-Принт», 2023. С. 247–252. EDN: ARWRUW

REFERENCES

1. Drony na zheleznih dorogah. Ozhidanie ili realnost? [internet] Accessed: 29.11.2023. Available from: <https://www.djimsk.ru/guides/2022/02/16/drony-na-zheleznih-dorogah-ozhidanie-vs-realnost> (In Russ.)
2. Primenenie bespilotnykh letatelnykh apparatov v zheleznodorozhnom komplekse [internet] Accessed: 29.11.2023. Available from: <https://eoi.rzd.ru/Ex/Claim/View/227> (In Russ.)
3. Klassifikatsiya BLA po letnym harakteristikam. [internet] Accessed: 29.11.2022. Available from: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html> (In Russ.)
4. Zelentsov VV, Tarasov VS, Shapovalov LA. Assessment of changes in the flight duration of an unmanned aerial vehicle with an electric motor. *Bulletin of*

- the Bauman Moscow State Technical University*. 2013;3(92):77–85. (In Russ.) EDN: RBGXGB
5. Eurasian Patent RUS 2006007 / 31.03.2023 Kim KK. Unmanned aerial system. (In Russ.)
 6. Valinsky OS, Kim KK. Developments of the St. Petersburg State University of Communications of Emperor Alexander I in the field of unconventional and renewable energy. *Transport of the Russian Federation*. 2024;2:8–14. (In Russ.)
 7. Phantom 4 Pro Plus V2.0. Authorized retail store. Product catalog. [internet] Accessed: 29.07.2024. Available from: <https://aeromotus.ru/product/dji-phantom-4-pro-plus-v2-0> (In Russ.)
 8. Vataev AS, Mikhailov MV, Solovyov AS. Mathematical modeling of contactless battery charging of an unmanned aerial vehicle. In: *Transport of Russia: problems and prospects: Materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09-10, 2022 / N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Team of authors. Volume 2*. St. Petersburg: N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences; 2022. 103–106. (In Russ.) EDN: MEEULT
 9. Nekrasov OA, Lisitsyn AL, Muginstein LA, Rachmaninov VI. *Modes of operation of mainline electric locomotives*. Moscow: Transport; 1983. (In Russ.)
 10. Mikhailov MV, Solovyov AS, Rogov AS, et al. Contactless method of charging the battery of an unmanned aerial vehicle. In: *Modern science, society, education: current issues, achievements and innovations: Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference, Penza, September 15, 2022*. Penza: Science and Education; 2022:30–33. (In Russ.) EDN: XXMEUI.
 11. Kim KK. *Sistemy elektrodvizheniya s ispol'zovaniem magnitnogopodvesa i sverhprovodimosti*. Moscow: GOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniy nazheleznodorozhnom transporte”; 2007. Accessed: 29.07.2024. Available from: <https://e.lanbook.com/book/59070> (In Russ.)
 12. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnitolevitacionnyj transport: nauchnye problem tekhnicheskie resheniya*. Moscow: FIZMATLIT; 2015. (In Russ.)
 13. Bins KJ, Lawrenson P. *Analysis and computation of electric and magnetic problems*. Oxford: PergamonPress; 1963. [internet] Accessed: 04.08.2024. Available from: <https://archive.org/details/analysiscomputat0000binn>
 14. Flankl M, Wellerdieck T, Tüysüz A, Kolar JW. Scaling laws for electrodynamic suspension in high-speed transportation. *IET Electric Power Applications*. 2017;12(3):357–364. doi:10.1049/iet-epa.2017.0480
 15. Chin JC, Gray JS, Jones SM, Berton JJ. Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod. In: *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 5–9 January 2015. Kissimmee, Florida*. doi: 10.2514/6.2015-1587
 16. Kim KK, Koroleva EB, Vataev AS. Monitoring of railway infrastructure facilities using unmanned aerial vehicles. In: *Eltrans – 2023: proceedings of the XI International*

Symposium, St. Petersburg, May 31 – June 02, 2023 / St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I. St. Petersburg: NP-Print; 2023:247–252. EDN: ARWRUW

Сведения об авторах:

Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru

Королева Елена Борисовна, кандидат технических наук, доцент;

eLibrary SPIN: 5664-6112; ORCID: 0009-0002-1804-6982;

E-mail: elzazybina@yandex.ru

Рыбин Петр Кириллович, кандидат технических наук, профессор,

eLibrary SPIN: 6592-1064; ORCID: 0000-0001-7396-2954;

E-mail: rybin@pgups.ru

Степанская Ольга Андреевна, кандидат технических наук;

eLibrary SPIN: 5918-7823; ORCID: 0000-0002-2993-2261;

E-mail: step_step@mail.ru

Information about the authors:

Konstantin K. Kim, Doctor of Technical Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 3278-4938; ORCID: 0000-0001-7282-4429;

E-mail: kimkk@inbox.ru

Elena B. Koroleva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN: 5664-6112; ORCID: 0009-0002-1804-6982;

E-mail: elzazybina@yandex.ru

Peter K. Rybin, Candidate of Technical Sciences, Professor,

eLibrary SPIN: 6592-1064; ORCID: 0000-0001-7396-2954;

E-mail: rybin@pgups.ru

Olga A. Stepankaya, Candidate of Technical Sciences;

eLibrary SPIN: 5918-7823; ORCID: 0000-0002-2993-2261;

E-mail: step_step@mail.ru