

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
БЕСКОНТАКТНОГО ПРОЦЕССА ПОДЗАРЯДА
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ МУЛЬТИКОПТЕРА
ОТ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

К.К. Ким

kim@pgups.ru

Е.Б. Королева

elzazybina@yandex.ru

А.С. Ватаев

avataev@yandex.ru

М.В. Михайлов

toe@pgups.ru

А.С. Соловьев

ФГБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Исследован процесс бесконтактного подзаряда аккумуляторной батареи беспилотного летательного аппарата мультикоптерного типа энергией внешнего электромагнитного поля, созданного токами, протекающими по проводам контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта или воздушной линии электропередач, без прерывания полета летательного аппарата. На борт мультикоптера энергия передается индукционным способом с помощью размещенной на нем электрической обмотки, соединенной с аккумуляторной батареей. Построена конечно-элементная математическая модель и выполнены расчеты ЭДС, наводимой в электрической обмотке при различных траекториях движения аппарата вблизи контактного провода контактной сети железной дороги, электрифицированной постоянным (с напряжением 3,3 кВ) и переменным (с напряжением 27,5 кВ и частотой 50 Гц) током. Выявлено, что наибольшие значения ЭДС в электрической обмотке наводятся при полете аппарата под контактным проводом с переменным током. При полете аппарата с электрической обмоткой под контактным проводом с постоянным током частота и амплитуда наводимой ЭДС зависят от периода отклонений аппарата от направления оси его прямолинейного движения. Кривая ЭДС при этом не синусоидальна, ее искажения зависят от амплитуды отклонения электрической обмотки от оси направления движения.

Ключевые слова

Беспилотный летательный аппарат, обмотка, заряд, аккумуляторная батарея, контактный провод

В случае с переменным током в контактном проводе амплитуда наводимой ЭДС зависит от амплитуды и частоты внешнего магнитного поля, созданного этим током. Параметры движения беспилотного летательного аппарата незначительно влияют на ЭДС. При этом наибольшие значения ЭДС, достаточные для подзаряда аккумуляторной батареи, наводятся при движении электрической обмотки под контактными проводами

Поступила 19.10.2023

Принята 22.11.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена в рамках гранта РНФ (проект № 24-29-00159), предоставленного на 2024–2025 гг. по результатам конкурса 2023 года «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами»

Введение. Одним из направлений обеспечения безопасности и надежности работы инфраструктуры энергетической отрасли и транспорта является непрерывный мониторинг ее состояния. Все чаще для мониторинга применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), например, мультикоптерные дроны с электрическим приводом. Однако время полета таких БПЛА ограничивается емкостью аккумуляторной батареи, что делает их использование не всегда экономически выгодным, особенно при отсутствии возможности их заряда во время эксплуатации.

Проблема увеличения времени полета БПЛА не является новой. В настоящее время известны следующие основные направления исследований в этой области, а именно: оптимизация алгоритмов управления [1, 2], применение аккумуляторных батарей повышенной емкости [3] или водородных топливных элементов [4]. Определенный интерес вызывает разработка систем бесконтактного подзаряда батареи с использованием сети автономных зарядных станций с нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии [5–7]. Однако такая разработка не лишена определенных недостатков, а ее реализация сопряжена со значительными затратами, обусловленными необходимостью развития соответствующей инфраструктуры. В качестве альтернативы зарядным станциям предложено устанавливать солнечную батарею на БПЛА [8], что также не является оптимальным решением из-за сильной зависимости от уровня солнечной инсоляции.

Цель настоящей работы — разработка систем бесконтактного подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА применительно к воздушным линиям электропередачи (ВЛЭП).

Конструктивное решение. В настоящей работе рассмотрено решение данной проблемы применительно к ВЛЭП и контактной сети электрифици-

рованного железнодорожного транспорта. Суть решения заключается в бесконтактном заряде аккумуляторной батареи БПЛА за счет энергии внешнего электромагнитного поля, созданного токами, протекающими по проводам ВЛЭП и контактной сети без прерывания полета БПЛА [9–16].

Для конструктивной реализации этого решения в центре БПЛА расположен несущий каркас 1 (рис. 1, а), к боковой поверхности которого прикреплены одними своими концами штанги 2. На других концах штанг с помощью креплений 3 установлены электрические двигатели 4 с воздушными винтами 5 (рис. 1, б). На шасси 6 расположена аккумуляторная батарея 7, выход 8 которой через регулятор оборотов 9 соединен с электрическими двигателями 4.

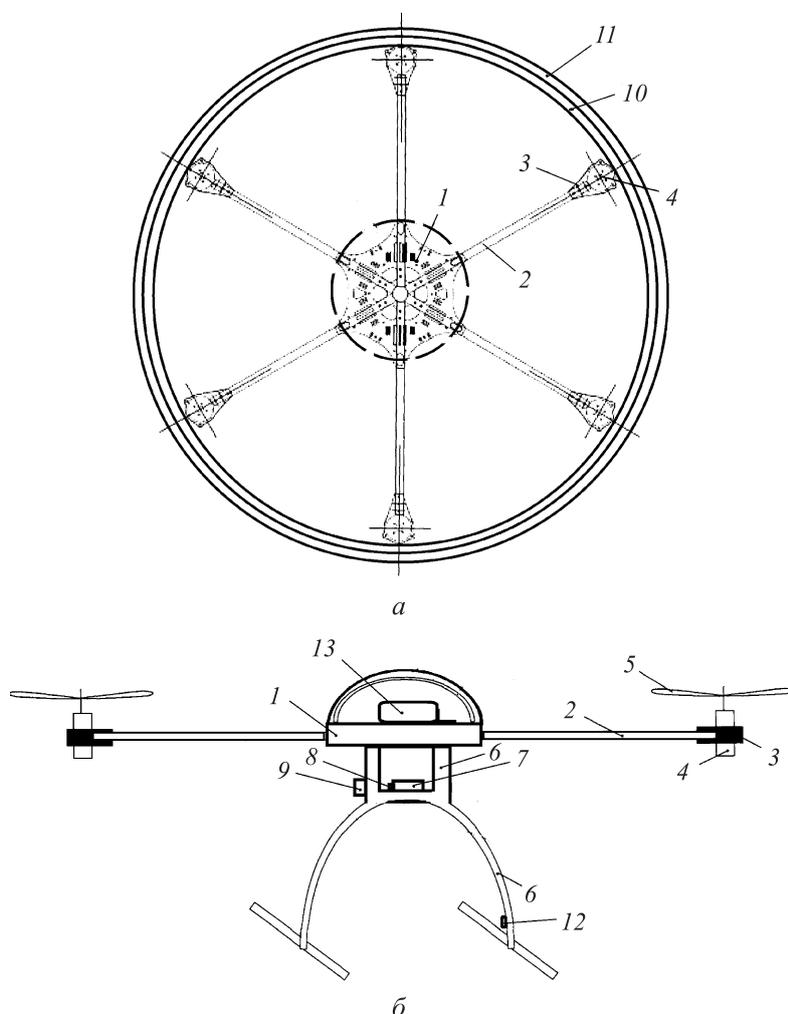


Рис. 1. Конструктивная схема БПЛА — мультикоптерного дрона с электрическим приводом, виды сверху (а) и сбоку (б)

К корпусам (см. рис. 1, *a*) электрических двигателей своей внутренней поверхностью прикреплено габаритное кольцо 10, на котором размещена электрическая кольцевая обмотка 11, присоединенная к силовому входу устройства управления зарядом батарей, а его выходы соединены с аккумуляторной батареей питания электродвигателей. Возможен вариант, когда электрическая кольцевая обмотка располагается ниже воздушных винтов. К индикаторному входу устройства управления зарядом батарей подключен индикатор уровня заряда аккумуляторной батареи, закрепленный на шасси. На нижней части шасси установлен датчик 12 напряженности электромагнитного поля, который соединен с маршрутным вычислительным устройством 13.

При разряде аккумуляторной батареи БПЛА сближается с проводами контактной сети железнодорожного транспорта или действующей ВЛЭП, местоположение которых определяется оператором визуально, а если их координаты заложены в программе маршрутного вычислительного устройства, то — автоматически. Сближение происходит до тех пор, пока не сработает датчик напряженности электромагнитного поля в момент времени, когда напряженность электромагнитного поля в зоне датчика приблизится к значению 1 кВ/см, что составляет пробивную напряженность влажного воздуха. Сигнал с датчика поступает на вход маршрутного вычислительного устройства, вырабатывающего команду, под действием которой БПЛА зависает над контактным проводом линии электропередачи, если ток в проводе переменный, или БПЛА продолжает полет на определенном расстоянии от контактного провода по траектории «змейка» в горизонтальной плоскости по сигналам маршрутного вычислительного устройства, если ток в проводе постоянный.

Электромагнитное поле индуцирует в электрической кольцевой обмотке ЭДС, под действием которой в цепи (кольцевой обмотке) устройства управления зарядом батарей и аккумуляторной батареи начинает протекать зарядный ток. По сигналу индикатора уровня заряда кольцевая обмотка отключается и процесс заряда прекращается.

Методика и результаты моделирования. Процесс заряда аккумуляторной батареи Intelligent Flight Battery, установленной на квадрокоптере типа Phantom 4 Pro+V2.0, моделировали методом конечных элементов на математической модели, созданной в программе COMSOL v 6.0¹. Моделирование выполнялось для двух случаев заряда:

¹ COMSOL v 6.0 Multiphysics Reference Manual. URL: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_Reference (дата обращения: 13.01.2023).

- 1) от контактной сети железнодорожного транспорта переменного тока с напряжением 27,5 кВ и частотой 50 Гц;
- 2) от контактной сети постоянного тока с напряжением 3,3 кВ [17].

Приняты следующие допущения и упрощения:

- ток контактного провода распределен равномерно по сечению; поверхностный эффект не учитывается; контактный провод рассматривается как тонкий вытянутый цилиндр;
- проводники по поперечному сечению электрической кольцевой обмотки распределены равномерно; намагничивающая сила, создаваемая током, практически не влияет на результирующее распределение магнитного поля;
- влияние ферромагнитных элементов, окружающих электрическую кольцевую обмотку, незначительно;
- вихревые токи, наводимые в проводящих крепежных элементах, оказывают пренебрежимо малое влияние на ЭДС кольцевой обмотки;
- электрическая кольцевая обмотка движется поступательно и равномерно, колебаний по крену, тангажу и рысканию нет;
- влияние воздушных потоков и сила сопротивления воздуха не учитываются;
- переходные процессы в контактной сети отсутствуют.

Расчет наводимой в кольцевой обмотке ЭДС при полете БПЛА может быть выполнен как аналитическими, так и численными методами.

Отметим, что достаточно простое аналитическое решение можно получить только для случая расположения оси симметрии провода в плоскости кольцевой обмотки. При этом форма обмотки может быть и прямоугольной. В остальных случаях необходимо применение численных методов.

В движущейся кольцевой обмотке ЭДС рассчитывается численными методами с применением нестационарной постановки задачи расчета. При этом можно учитывать изменение тока в кольцевой обмотке при подключении и отключении нагрузки и динамические процессы, связанные с изменением тока провода контактной сети. Такая постановка задачи сопряжена с рядом трудностей, поскольку при перемещении кольцевой обмотки на каждом временном шаге расчета происходит изменение взаимного расположения границ и узлов геометрической модели, а значит, искажение конечно-элементной сетки и увеличение погрешности расчета. Для уменьшения погрешности применяют алгоритмы автоматического перестроения сетки, которые являются затратными с точки зрения машинного времени и производительности. Практика подобных расчетов в программе COMSOL v 6.0 показала, что помимо затруднений, связанных

с перестроением сетки, в некоторых случаях возникают проблемы со сходимостью задачи, что требует значительного уменьшения временного шага расчета и применения дополнительных алгоритмов для стабилизации решения. Это приводит к увеличению времени решения задачи без значительного повышения точности.

С учетом допущений об отсутствии переходных процессов в контактной сети и влияния токов в кольцевой обмотке на общую картину распределения магнитного поля тока в контактном проводе, а также предположения о линейности рассматриваемой системы эту задачу можно решить в квазистационарной постановке. В этом случае методом конечных элементов рассчитывается не ЭДС кольцевой обмотки, а ее потокосцепление Ψ . При этом положение кольцевой обмотки относительно контактного провода и значение тока в нем задаются параметрическими функциями, где определяющим параметром является время. Это позволяет разбить задачу расчета ЭДС на два этапа. На первом этапе для каждого момента времени с помощью метода конечных элементов выполняется расчет потокосцепления Ψ , а на втором этапе с использованием алгоритмов численного дифференцирования ЭДС e рассчитывается по формуле

$$e = - \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (1)$$

На первом этапе расчета в целях автоматизации процесса построения геометрии расчетной модели и сетки при наличии поступательно движущейся кольцевой обмотки использован интерфейс Parametric Sweep (параметрическое изменение). Координаты движущейся кольцевой обмотки задаются при построении модели в виде функций, зависящих от времени.

Дискретизация расчетной области выполнена с помощью тетраэдров. Расчетная область после дискретизации приведена на рис. 2.

На наружной границе расчетной области установлено граничное условие Magnetic Insulation, что соответствует отсутствию магнитного поля снаружи расчетной области. Для задания кольцевой обмотки применены области Coil. Для имитации контактного провода использована настройка типа катушки (coil type) в виде линейного провода (linear). Для описания кольцевой обмотки применены замкнутый (circular) тип обмотки и число витков, равное 3880.

Расчет проведен в стационарной постановке. Рассмотрены случаи полета БПЛА рядом с контактном проводом, запитанным постоянным или переменным током промышленной частоты.

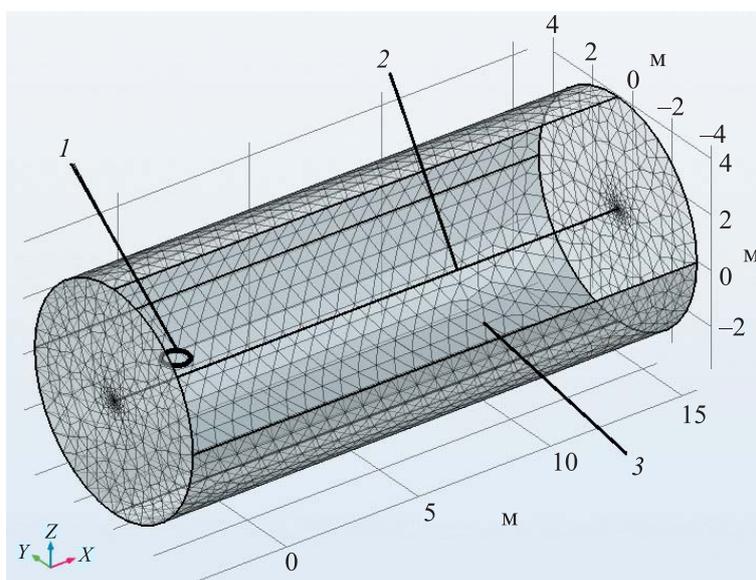


Рис. 2. Расчетная область:

1 — кольцевая обмотка; 2 — контактный провод; 3 — область, окружающая контактный провод и кольцевую обмотку

Беспилотный летательный аппарат с кольцевой обмоткой перемещается по траектории «змейка» вдоль контактного провода (оси X , рис. 3) в зависимости от времени t по закону

$$dx = vt,$$

где v — скорость полета БПЛА.

Перемещение БПЛА вдоль оси Y описывается синусоидальным законом

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

где A — амплитуда колебаний оси кольцевой обмотки БПЛА от нейтрального положения, определяемого смещением оси симметрии БПЛА относительно оси контактного провода; t — время; T — период колебаний БПЛА от оси направления движения (см. рис. 3).

Высота полета БПЛА над землей считается неизменной. В настоящей работе полет БПЛА осуществлялся по траекториям трех типов (см. рис. 3).

1. Траектория «змейка» под контактным проводом; плоскость, в которой лежит траектория, находится на постоянном расстоянии от контактного провода (рис. 3, *a*).

2. Траектория «змейка» сбоку от контактного провода на некотором расстоянии от него; траектория и контактный провод расположены в одной плоскости (рис. 3, б).

3. Траектория в виде уплощенной спирали сбоку от провода; ось провода совпадает с плоскостью кольцевой обмотки (рис. 3, в).

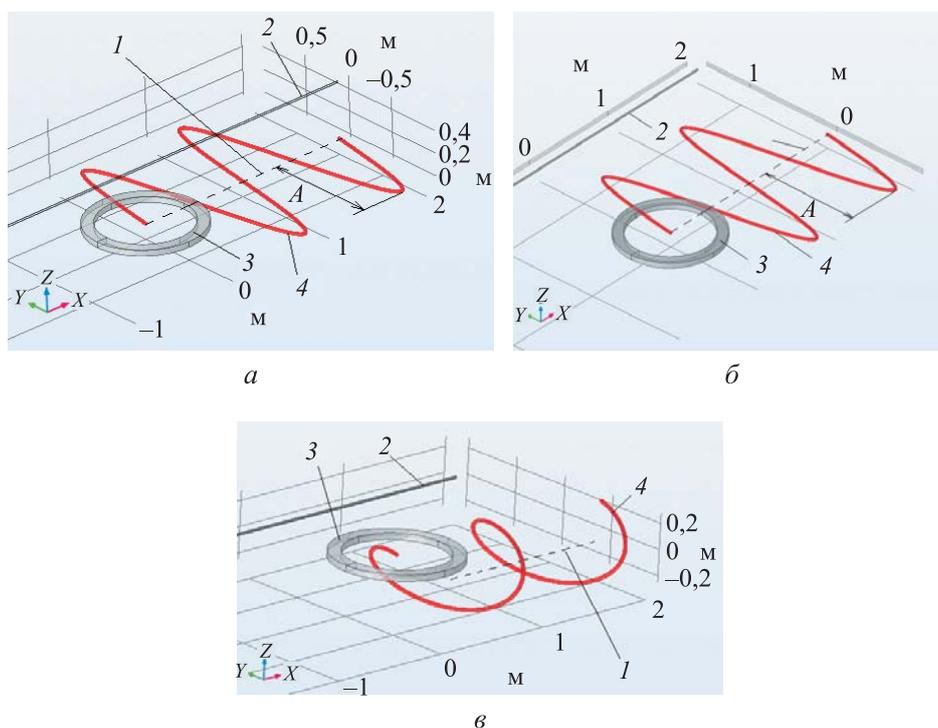


Рис. 3. Траектории полета БПЛА под контактным проводом (а), сбоку от контактного провода (б) и по спирали (в):

1 — ось направления движения; 2 — контактный провод; 3 — электрическая кольцевая обмотка зарядного устройства БПЛА; 4 — траектория полета БПЛА

Расчет потокосцепления выполнен с помощью встроенной процедуры COMSOL v 6.0, ток в контактном проводе изменялся по закону

$$i(t) = I_m \sin(2\pi \cdot 50t).$$

Для задания временного интервала при настройке параметров решателя при расчете ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке при движении БПЛА рядом с проводом с переменным током частотой 50 Гц в интерфейсе *Parametric Sweep* задан диапазон значений времени 0...1 с с шагом 0,01с.

Выполнена серия расчетов ЭДС кольцевой обмотки БПЛА при его полете по траекториям, приведенным на рис. 3. Рассмотрены варианты расположения кольцевой обмотки при полете БПЛА под контактным прово-

дом на расстоянии 0,5 м от его оси и сбоку от контактного провода на расстоянии 1,6 м от него при скоростях движения вдоль провода 2 и 10 м/с. В случае полета БПЛА под проводом (см. рис. 3, а) амплитуда поперечных синусоидальных колебаний кольцевой обмотки составила 0,25, 0,5, 0,75 м, при полете БПЛА сбоку от контактного провода (см. рис. 3, б) — 1,0 и 0,5 и 0,25 м. Отметим, что в последнем случае выбранные значения амплитуды колебаний кольцевой обмотки от оси контактного провода и оси направления движения являются предельными, поскольку при меньшем расстоянии и больших амплитудах увеличивается вероятность столкновения БПЛА с узлами подвески контактного провода. Период колебаний кольцевой обмотки от оси направления движения составлял 0,25 и 0,5 с.

При полете БПЛА по спирали (см. рис. 3, в) амплитуда колебаний кольцевой обмотки по горизонтали принималась равной 0,5 м, по вертикали — 0,25 м, период колебаний — 0,5 с, скорость — 2 м/с. Среднестатистическое значение тока контактного провода определено в соответствии с [17, 18]. Для магистрального участка контактной сети постоянного тока оно составляет 300 А.

Некоторые результаты расчета ЭДС в кольцевой обмотке при движении вдоль провода с постоянным током приведены на рис. 4.

Определено, что значения ЭДС недостаточны для устойчивой работы системы заряда аккумуляторной батареи вне зависимости от скорости полета БПЛА вдоль контактного провода, форма которого предполагалась прямолинейной (допущение, обычно монтаж контактного провода осуществляется по схеме зигзаг [17]). При полете БПЛА под проводом пиковое значение наводимой ЭДС линейно зависит от амплитуды колебания кольцевой обмотки от оси направления движения и не зависит от скорости. Форма кривой наводимой в кольцевой обмотке ЭДС значительно отличается от синусоиды и имеет сложный гармонический состав. По мере уменьшения амплитуды колебания форма кривой ЭДС приближается к синусоиде.

При полете БПЛА по спирали кривая ЭДС также имеет сложную форму, однако значение ЭДС несколько больше, чем при плоскостном движении по траектории (см. рис. 3, б).

Выполнена серия расчетов ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, при различных положениях оси направления движения относительно оси контактного провода. Рассмотрены случаи полета БПЛА в горизонтальной плоскости, расположенной на 0,5 м ниже оси контактного провода, при отсутствии смещения оси направления движения в направлении оси Y , а также при смещении оси направления движения на 0,5, 1,0 и 1,6 м

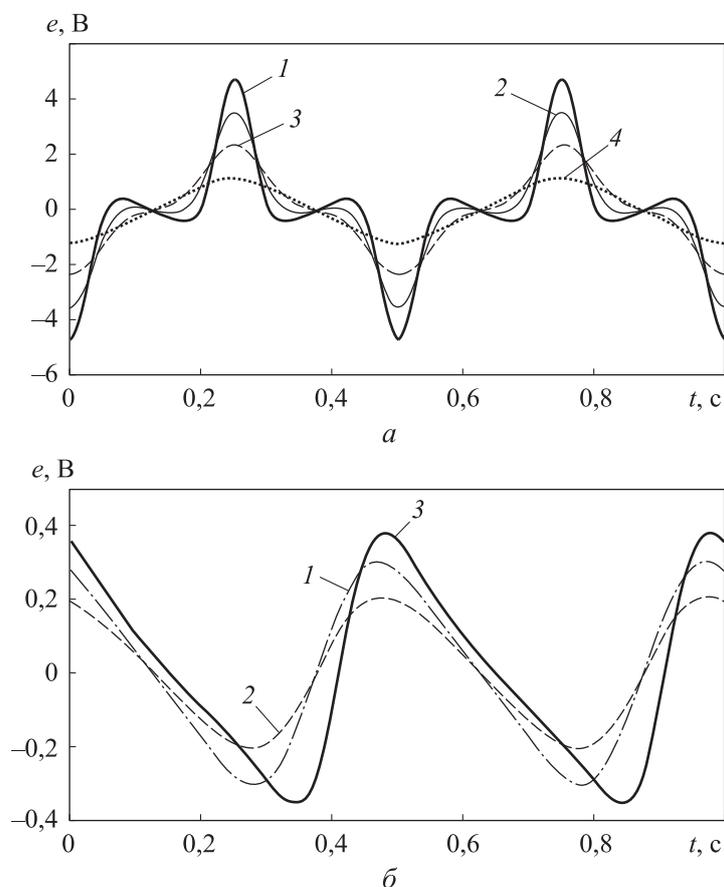


Рис. 4. Результаты расчета ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке:

a — при полете БПЛА снизу и вдоль контактного провода с постоянным током 300 А на расстоянии 0,5 м от его оси и амплитуде колебаний $A = 1,0$ (1), 0,75 (2), 0,5 (3) и 0,25 м (4); *б* — при полете сбоку от контактного провода на расстоянии 1,6 м и амплитуде колебаний 0,5 м (1), 0,25 м (2) и по спирали (3)

в направлении оси Y . Скорость движения вдоль контактного провода при этом принималась равной 2 м/с, амплитуда и период колебаний от оси направления движения составляли 0,5 м и 0,5 с. Результаты расчета приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что при горизонтальном смещении оси направления движения кольцевой обмотки относительно оси контактного провода происходит изменение формы кривой наводимой ЭДС. Максимальное искажение кривой ЭДС и увеличение ее амплитуды характерно для движения по траектории, приведенной на рис. 3, *a*. Видно также наличие явно выраженной третьей гармоники ЭДС. При полете БПЛА в горизонтальной плоскости, расположенной ниже плоскости контактного провода, значение

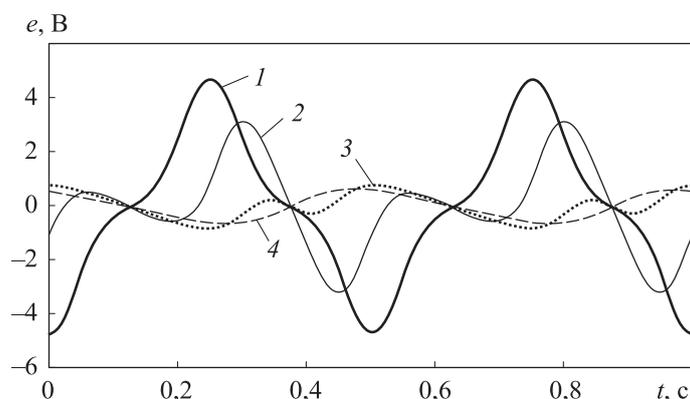


Рис. 5. Результаты расчета ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, при полете БПЛА вдоль контактного провода с постоянным током 300 А и значениях горизонтального смещения оси направления движения относительно оси контактного провода $\Delta = 0$ (1), 0,5 (2), 1,0 (3) и 1,6 м (4)

амплитуды ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, уменьшается по мере удаления от контактного провода. При этом по мере удаления оси направления движения от контактного провода при неизменной амплитуде колебаний меняется гармонический состав кривой ЭДС. Таким образом, мониторинг формы кривой ЭДС может быть использован для оценки положения БПЛА относительно оси контактного провода для автоматического управления аппаратом [19, 20].

Период основной гармоники кривой ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, при движении вдоль контактного провода и всех типах траекторий определяется периодом T колебаний положения БПЛА от нейтрального. Увеличение частоты и амплитуды ЭДС в силу уменьшения периода T не приводит к значительному положительному эффекту.

Аналогичный расчет выполнен для случая запитывания контактного провода переменным током. Действующее значение тока составляет 300 А. Значения параметров полета БПЛА с кольцевой обмоткой и скорости аналогичны значениям в случае полета вдоль контактного провода с постоянным током, временной шаг расчета уменьшен до 0,001 с, временной диапазон составил 0...0,25 с. Некоторые результаты расчета приведены на рис. 6.

Отметим, что при полете БПЛА вблизи контактного провода с переменным током значения наводимой ЭДС достаточны для заряда батареи. При этом амплитуда и период колебаний от оси движения кольцевой обмотки, так же как и скорость движения, не оказывают существенного влияния на значение наводимой ЭДС. Уменьшение периода колебаний до 0,2 с

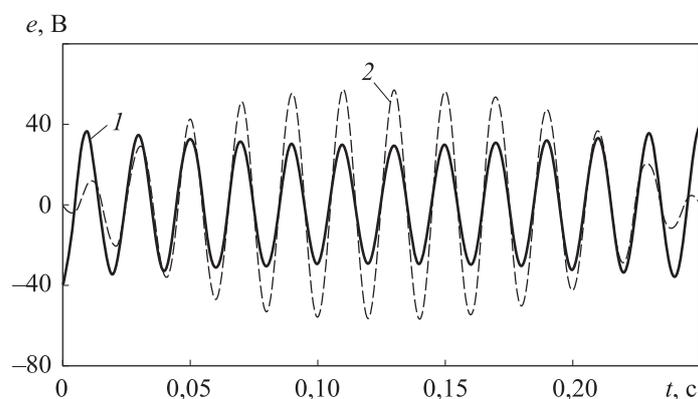


Рис. 6. Результаты расчета ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, при полете БПЛА вдоль контактного провода с действующим значением переменного тока 300 А и частотой 50 Гц при расположении БПЛА сбоку от контактного провода на расстоянии 1,6 м (1), снизу от оси контактного провода на расстоянии 0,5 м (2)

при прочих равных условиях не оказывает существенного влияния на значение наводимой ЭДС. Резонансные явления при этом также отсутствуют.

Следовательно, можно утверждать, что наибольшее влияние на ЭДС, наводимую в кольцевой обмотке, оказывает изменение магнитного поля тока контактного провода.

При движении кольцевой обмотки под контактным проводом с переменным током по траектории, приведенной на рис. 3, а, амплитуда ЭДС также зависит от отклонения движения от оси направления движения (вдоль оси Y), т. е. амплитуда кривой ЭДС здесь является модулированной по синусоидальному закону полета БПЛА вдоль этой оси. Таким образом, по результатам анализа формы кривой ЭДС можно оценить степень отклонения БПЛА от оси контактного провода в режиме мониторинга состояния последнего.

Обсуждение полученных результатов. При полете БПЛА вдоль контактного провода с постоянным током ЭДС, наводимые в кольцевой обмотке (число витков 3880), недостаточны для эффективного подзаряда батареи. В связи с этим необходимо увеличивать число витков, что может привести к некоторому ухудшению массогабаритных показателей БПЛА.

В результате сравнительного анализа полученных зависимостей ЭДС от времени выявлено, что наибольшие значения ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, при полете БПЛА вдоль контактного провода с постоянным током наблюдаются при расположении кольцевой обмотки

под контактном проводом (см. рис. 3, *а*). При полете БПЛА по траектории сбоку от контактного провода и по спирали (см. рис. 4, *б*) значения ЭДС значительно меньше.

Частота и амплитуда колебаний наводимой ЭДС в случае полета БПЛА под контактном проводом с постоянным током зависит от периода колебаний кольцевой обмотки от оси движения. Зависимость максимального значения ЭДС от амплитуды колебаний в рассмотренном диапазоне (0...1 м) носит линейный характер. Кривая ЭДС при этом имеет сложный гармонический состав. По мере уменьшения амплитуды колебаний форма кривой ЭДС приближается к синусоиде.

В случае горизонтального смещения оси направления движения кольцевой обмотки относительно оси контактного провода форма кривой ЭДС значительно отличается от синусоиды. Здесь степень искажения кривой ЭДС зависит от смещения оси направления движения относительно оси контактного провода и уменьшается по мере удаления от него.

При движении кольцевой обмотки вдоль контактного провода с переменным током наибольшие значения ЭДС наводятся при движении под контактном проводом.

При движении кольцевой обмотки под контактном проводом с переменным током по траектории, приведенной на рис. 3, *а*, и отсутствии смещения оси направления движения относительно оси контактного провода амплитуда колебаний кривой ЭДС является модулированной по закону полета БПЛА вдоль оси Y . Таким образом, с помощью измерения амплитуды колебаний кривой ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, можно контролировать положения БПЛА относительно оси контактного провода.

Выводы. Установлено, что наиболее предпочтительным с позиции обеспечения подзаряда аккумуляторной батареи БПЛА является полет под контактном проводом, запитанным переменным током с напряжением 27,5 кВ и частотой 50 Гц. Амплитуда наводимой в кольцевой обмотке ЭДС зависит от амплитуды колебаний и частоты магнитного поля, созданного током контактного провода, а параметры полета БПЛА оказывают незначительное влияние на значение ЭДС.

Если контактный провод запитан постоянным током, то частота и амплитуда колебаний ЭДС, наводимой в кольцевой обмотке, зависят от периода колебаний БПЛА относительно оси направления его движения. Кривая ЭДС при этом не синусоидальна, степень ее искажения зависит от амплитуды колебаний отклонения кольцевой обмотки от оси направления движения.

Наличие третьей гармонической составляющей в кривой индуцированной ЭДС при полете БПЛА вблизи контактного провода с постоянным током, а также модулированной ЭДС при полете БПЛА под контактным проводом с переменным током может быть использовано для оценки отклонения БПЛА от оси контактного провода в режиме мониторинга местонахождения последнего.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коршуненко М.В. Повышение длительности полета БПЛА за счет улучшения эксплуатационных показателей. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2016, т. 1, № 12, с. 862–863. EDN: WTOCEN
- [2] Воронов С.В. Разработка алгоритмов и программных средств управления беспилотным летательным аппаратом. *XIV Нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием. КИИ-2014. Труды конф. Т. 3*. Казань, Школа, 2014, с. 249–255. EDN: TOVZSR
- [3] Артемьева А.О., Вялова Е.П. Аккумулятор нового поколения для БПЛА на службе МЧС. *Комплексные проблемы техносферной безопасности. Безопасный город. Матер. XI Науч.-практ. конф. Ч. 2*. Воронеж, Изд-во ВГТУ, 2016, с. 107–110. EDN: KYLKHO
- [4] Сергеев И.А. Беспилотные летательные аппараты с водородными топливными элементами. *Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли»*. Т. 1. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018, с. 75–77. EDN: YNBGMP
- [5] Чурляева К.Д., Степанов С.Ф., Чурляева О.Н. Обоснование эффективности использования гибридной ветро-солнечной системы источников энергии для подзарядки квадрокоптеров. *Актуальные проблемы энергетики АПК. Матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф.* Саратов, ЦЕСАИН, 2017, с. 284–286. EDN: ZQZCVZ
- [6] Чурляева К.Д., Чурляева О.Н., Степанов С.Ф. Мониторинг воздушных линий электропередач с помощью беспилотных летательных аппаратов. Разработка автономной наземной станции для подзарядки квадрокоптеров. *Актуальные проблемы энергетики АПК. Матер. VII Междунар. науч.-практ. конф.* Саратов, ЦЕСАИН СГАУ, 2016, с. 251–252. EDN: XGQQAX
- [7] Степанов С.Ф., Артюхов И.И., Артюхов Д.И. и др. Комбинированные наземные автономные зарядные станции общего пользования с ветро-солнечными источниками энергии для мультикоптеров. *Актуальные проблемы энергетики АПК. Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф.* Саратов, ЦЕСАИН, 2015, с. 269–274. EDN: UEEIQR
- [8] Денисов Ю.А., Шаповалов О.Л., Середа О.В. и др. Оптимизация энергодинамических процессов в системе управления приводом стабилизации полета беспилотного летательного аппарата. *Технические науки и технологии*, 2018, № 3 (13), с. 187–195. EDN: ZCTXLV

- [9] Ким К.К. Беспилотный летательный комплекс. Патент ЕА 042897. Заявл. 30.06.20, опубл. 31.03.2023.
- [10] Ким К.К., Паньчев А.Ю. Беспилотный летательный аппарат для диагностики высоковольтных установок. Патент РФ 2791914С1. Заявл. 08.11.2022, опубл. 14.03.2023.
- [11] Ким К.К., Паньчев А.Ю. Беспилотный летательный аппарат. Патент РФ 2801404. Заявл. 01.02.2023, опубл. 08.08.2023.
- [12] Simica M., Bila C., Vojisavljevic V. Investigation in wireless power transmission for UAV charging. *Proc. Comp. Sc.*, 2015, no. 60, pp. 1846–1855.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.295>
- [13] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 2007, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1143254>
- [14] McDonough M. Integration of inductively coupled power transfer and hybrid energy storage system: a multi-port power electronics interface for battery powered electric vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015, vol. 30, no. 11, pp. 6423–6433.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2422300>
- [15] Yin S., Qu Z. Rate-optimal coding design in joint transfer of energy and information. *IEEE Commun. Lett.*, 2015, vol. 19, no. 5, pp. 715–718.
DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2410291>
- [16] Griffin B., Detweiler C. Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV. *IEEE ICRA*, 2012, pp. 2660–2665.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225205>
- [17] Чернов Ю.А. Электроснабжение электрических железных дорог. М., УМЦ ЖТД, 2016.
- [18] Некрасов О.А., Лисицын А.Л., Мутиштейн Л.А. и др. Режимы работы магистральных электровозов. М., Транспорт, 1983.
- [19] Ким К.К., Паньчев А.Ю. Инновационные электротехнические разработки для транспортной отрасли Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. *Бюллетень результатов научных исследований*, 2021, № 4, с. 87–103. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-87-103>
- [20] Ким К.К., Ефремов М.А., Иванов С.Н. Разработка электромеханической системы для привода беспилотного летательного аппарата. *Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Матер. VI Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. Ч. 1.* Комсомольск-на-Амуре, Изд-во КНАГУ, 2023, с. 193–197.

Ким Константин Константинович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС (Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9).

Королева Елена Борисовна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС (Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9).

Ватаев Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС (Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9).

Михайлов Михаил Владимирович — аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС (Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9).

Соловьев Андрей Сергеевич — аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО ПГУПС (Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ким К.К., Королева Е.Б., Ватаев А.С. и др. Математическое моделирование бесконтактного процесса подзаряда аккумуляторной батареи мультикоптера от внешнего электромагнитного поля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 4 (151), с. 28–46. EDN: ZRDBMU

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE CONTACTLESS PROCESS
IN CHARGING A MULTICOPTER BATTERY
FROM THE EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD**

K.K. Kim

E.B. Koroleva

A.S. Vataev

M.V. Mikhailov

A.S. Soloviev

kim@pgups.ru

elzazybina@yandex.ru

avataev@yandex.ru

toe@pgups.ru

SPTU, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

The paper studies the process of contactless battery recharging of the multicopter type unmanned aerial vehicle with the external electromagnetic field power created by currents flowing through the wires of a contact network in the electrified railway transport or the overhead power line, without interrupting the flying vehicle flight. Power is being transferred on board the multicopter by induction using an electric winding positioned on it and connected to the battery. A finite element mathematical model is constructed, and the EMF is computed. The EMF is induced in winding at various trajectories of the vehicle motion in vicinity of the railway contact network wire electrified with direct (at the 3.3 kV voltage) and alternating (at the 27.5 kV voltage

Keywords

Unmanned aerial vehicle, winding, charge, battery, contact wire

and 50 Hz frequency) current. The paper shows that the EMF highest values in the winding are induced during a flight under the AC contact wire. With the winding motion under the DC wire, the induced EMF frequency and amplitude depend on the device deviations period from its rectilinear motion axis direction. The EMF curve is not sinusoidal; its distortions depend on the winding deviation amplitude from the motion direction axis. In the AC case in the contact wire, the induced EMF amplitude primarily depends on the amplitude and frequency of the external magnetic field created by this current. The device motion parameters are slightly affecting the EMF. In this case, the highest EMF values sufficient to recharge the battery, are induced with the winding motion under the contact wire

Received 19.10.2023

Accepted 22.11.2023

© Author(s), 2024

The work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation (grant no. 24-29-00159) provided for 2024–2025 and based on results of the 2023 competition “Conducting fundamental scientific and exploratory scientific research by small separate scientific groups”

REFERENCES

- [1] Korshunenkov M.V. Proving long flight UAV due to improved operational performance. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, vol. 1, no. 12, pp. 862–863 (in Russ.). EDN: WTOCEN
- [2] Voronov S.V. [Development of algorithms and software tools for control of an unmanned aerial vehicle]. *14 Nats. konf. po iskusstvennomu intellektu s mezhdunar. uchastiem. KII-2014. Trudy konf. T. 3* [14 National Conf. on Artificial Intelligence with Int. Anticipation KII-2014. Vol. 3]. Kazan, Shkola Publ., 2014, pp. 249–255 (in Russ.). EDN: TOVZSR
- [3] Artemyeva A.O., Vyalova E.P. [A new generation battery for UAVs in the service of the Ministry of Emergency Situations. Complex problems of technosphere security]. *Bezopasnyy gorod. Mater. XI Nauch.-prakt. konf. Ch. 2* [Safe City. Proc. XI Int.-Pract. Conf. P. 2]. Voronezh, VGTU Publ., 2016, pp. 107–110 (in Russ.). EDN: KYLKHO
- [4] Sergeev I.A. [UAVs with hydrogen fuel cells]. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie Rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. T. 1* [New Technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry. Russ. Sc.-Pract. Conf. with Int. Anticipation. Vol. 1]. Kazan, KNITU-KAI Publ., 2018, pp. 75–77 (in Russ.). EDN: YNBGMP
- [5] Churlyayeva K.D., Stepanov S.F., Churlyayeva O.N. [Rationalisation of efficiency of hybrid wind-solar system of energy sources for recharging quadrocopters]. *Aktualnye problemy energetiki APK. Mater. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems of Energetics of Agroindustrial Complex. Proc. VIII Int. Sc.-Pract. Conf.]. Saratov, TseSAin Publ., 2017, pp. 284–286 (in Russ.). EDN: ZQZCVZ

- [6] Churlyayeva K.D., Churlyayeva O.N., Stepanov S.F. [Monitoring of overhead power lines using unmanned aerial vehicles. Development of the autonomous ground station for recharging quadcopters.]. *Aktualnye problemy energetiki APK. Mater. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems of Energetics of Agroindustrial Complex. Proc. VII Int. Sc.-Pract. Conf.]. Saratov, TseSAin Publ., 2016, pp. 251–252 (in Russ.). EDN: XGQQAX
- [7] Stepanov S.F., Artyukhov I.I., Artyukhov D.I., et al. Combined ground-based autonomous public charging stations with wind-solar energy sources for multicopters. *Aktualnye problemy energetiki APK. Mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems of Energetics of Agroindustrial Complex. Proc. VI Int. Sc.-Pract. Conf.]. Saratov, TseSAin Publ., 2015, pp. 269–274 (in Russ.). EDN: UEEIQR
- [8] Denisov Yu.A., Shapovalov O.L., Sereda O.V., et al. Optimization of energy dynamical processes in the control system of the drive for stabilizing the flight of the unmanned aerial vehicle. *Tekhnicheskie nauki i tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 187–195 (in Russ.). EDN: ZCTXLV
- [9] Kim K.K. Bepilotnyy letatelnyy kompleks [Unmanned aerial complex]. Patent EA 042897. Appl. 30.06.20, publ. 31.03.2023 (in Russ.).
- [10] Kim K.K., Panychev A.Yu. Bepilotnyy letatelnyy apparat dlya diagnostiki vysokovoltnykh ustanovok [Unmanned aerial vehicle for diagnosing high-voltage electrical installations]. Patent RU 2791914. Appl. 08.11.2022, publ. 14.03.2023 (in Russ.).
- [11] Kim K.K., Panychev A.Yu. Bepilotnyy letatelnyy apparat [Unmanned aerial vehicle]. Patent RU 2801404. Appl. 01.02.2023, publ. 08.08.2023 (in Russ.).
- [12] Simica M., Bila C., Vojisavljevic V. Investigation in wireless power transmission for UAV charging. *Procedia Comput. Sc.*, 2015, vol. 60, pp. 1846–1855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.295>
- [13] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 2007, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1143254>
- [14] McDonough M. Integration of inductively coupled power transfer and hybrid energy storage system: a multiport power electronics interface for battery-powered electric vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2015, vol. 30, no. 11, pp. 6423–6433. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2422300>
- [15] Yin S., Qu Z. Rate-optimal coding design in joint transfer of energy and information. *IEEE Commun. Lett.*, 2015, vol. 19, no. 5, pp. 715–718. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2410291>
- [16] Griffin B., Detweiler C. Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV. *IEEE ICRA*, 2012, pp. 2660–2665. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225205>
- [17] Chernov Yu.A. Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog [Power supply of electric railways]. Moscow, UMTs ZhDT Publ., 2016.
- [18] Nekrasov O.A., ed. Rezhimy raboty magistralnykh elektrovozov [Modes of operation of mainline electric locomotives]. Moscow, Transport Publ., 1983.

- [19] Kim K.K., Panychev A.Yu. Innovative electrical engineering developed for the transport industry by the Emperor Alexander I Petersburg state transport university. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Result], 2021, no. 4, pp. 87–103 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-87-103>
- [20] Kim K.K., Efremov M.A., Ivanov S.N. [Development of an electromechanical system for driving an unmanned aerial vehicle]. *Proizvodstvennyye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu. Mater. VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh. Ch. 1* [Production Technologies of the Future: from Creation to Implementation. Proc. VI Int. Sc.-Pract. Conf. of Young Scientists. P. 1]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2023, pp. 193–197 (in Russ.).

Kim K.K. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, SPTU (Moskovskiy prospekt 9, St. Petersburg, 190031 Russian Federation).

Koroleva E.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, SPTU (Moskovskiy prospekt 9, St. Petersburg, 190031 Russian Federation).

Vataev A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, SPTU (Moskovskiy prospekt 9, St. Petersburg, 190031 Russian Federation).

Mikhailov M.V. — Post-Graduate Student, Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, SPTU (Moskovskiy prospekt 9, St. Petersburg, 190031 Russian Federation).

Soloviev A.S. — Post-Graduate Student, Department of Electrical Engineering and Heat Power Engineering, SPTU (Moskovskiy prospekt 9, St. Petersburg, 190031 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kim K.K., Koroleva E.B., Vataev A.S., et al. Mathematical simulation of the contactless process in charging a multicopter battery from the external electromagnetic field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 4 (151), pp. 28–46 (in Russ.). EDN: ZRDBMU