

УДК 519.876.5

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

**Математическая модель определения
оптимальных условий функционирования комплекса
дистанционного энергетического обеспечения
пространственно распределенных групп воздушных объектов**

А. А. Чепига

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

andreychepiga@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является комплекс дистанционного энергетического обеспечения (КДЭО) пространственно распределенных групп воздушных объектов. Предметом исследования являются параметры функционирования КДЭО и их влияние на эффективность энергетического обеспечения. Цель – разработка математической модели для определения оптимальных параметров функционирования КДЭО и сравнительная оценка эффективности предложенной модели по отношению к существующим подходам к управлению энергетическим обеспечением пространственно распределенных групп воздушных объектов. *Материалы и методы.* Исследование проведено с применением метода градиентного спуска для синтеза нелинейной аппроксимирующей функции, описывающей зависимость количества заряжаемых воздушных объектов от ключевых параметров системы. Проверка адекватности модели выполнена с использованием критерия Пирсона. *Результаты.* Разработана математическая модель, учитывающая ключевые параметры системы: дальность расположения КДЭО от обслуживаемых объектов, ширину зоны энергетического обеспечения и угловую величину пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости. Результаты численного моделирования демонстрируют повышение эффективности энергетического обеспечения в среднем на 16 % (с пиковыми значениями до 35 %) при использовании разработанной модели. Установлены оптимальные параметры пространственного размещения комплексов с предпочтительным позиционированием в угловых зонах контролируемой территории. Средняя ошибка аппроксимации составила 3,162 %. *Выводы.* Разработанная математическая модель позволяет определить оптимальные условия функционирования КДЭО и значительно повысить эффективность энергетического обеспечения воздушных объектов по сравнению с традиционным управлением оператором. Предложенный подход обеспечивает возможность прогнозирования эффективности энергетического обеспечения, оптимизации параметров расположения и настройки КДЭО, а также планирования его применения в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, беспроводная передача энергии, пространственная кластеризация, покрытие множества, многокритериальная оптимизация, энергоэффективность, алгоритмы кластеризации

Для цитирования: Чепига А. А. Математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 100–111. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

Mathematical model for determining optimal operating conditions of the remote energy supply complex for spatially distributed groups of aerial objects

A.A. Chepiga

Penza State University, Penza, Russia

andreychepiga@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is a remote energy supply complex (RESC) for spatially distributed groups of aerial objects. The subject of the research is the operational parameters of RESC and their impact on the efficiency of energy supply. The purpose of this study is to develop a mathematical model for determining optimal operational parameters of RESC and to provide a comparative assessment of the effectiveness of the proposed model in relation to existing approaches to energy supply management for spatially distributed groups of aerial objects. *Materials and methods.* The research was conducted using the gradient descent method to synthesize a nonlinear approximating function describing the dependence of the number of charged aerial objects on key system parameters. The adequacy of the model was verified using Pearson's criterion. *Results.* A mathematical model has been developed that takes into account key system parameters: the distance of the RESC from the serviced objects, the width of the energy supply zone, and the angular magnitude of the energy supply space in the horizontal plane. The results of numerical modeling demonstrate an increase in energy supply efficiency by an average of 16 % (with peak values up to 35%) when using the developed model. Optimal parameters for the spatial placement of complexes have been established, with preferred positioning in the corner zones of the controlled territory. The average approximation error was 3.162 %. *Conclusions.* The developed mathematical model allows determining the optimal operating conditions of the RESC and significantly improving the efficiency of energy supply to aerial objects compared to traditional operator control. The proposed approach provides the ability to predict the effectiveness of energy supply, optimize the parameters of the location and settings of the RESC, and plan its application in various operating conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicles, wireless energy transfer, spatial clustering, set covering, multi-criteria optimization, energy efficiency, clustering algorithms

For citation: Chepiga A.A. Mathematical model for determining optimal operating conditions of the remote energy supply complex for spatially distributed groups of aerial objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):100–111. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-7

Введение

Современные системы дистанционного энергетического обеспечения воздушных объектов становятся все более востребованными в различных областях применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и других воздушных систем. Эффективность таких комплексов во многом определяется оптимальностью их расположения относительно обслуживаемых воздушных объектов и корректным выбором параметров энергетического воздействия.

Анализ литературных источников показывает растущий интерес к данной проблематике. В фундаментальных работах [1] заложены теоретические основы передачи энергии радиоволнами, а исследования [2] демонстрируют

практическую реализацию беспроводной передачи энергии через сильно связанные магнитные резонансы, однако в этих работах не рассматриваются вопросы оптимального позиционирования энергетических комплексов для обеспечения групп воздушных объектов.

В исследовании [3] была представлена модель для определения оптимального расположения зарядных станций для БПЛА, однако предложенный подход ограничен стационарными системами с использованием наземного транспорта и не учитывает динамическое перемещение воздушных объектов. В работе [4] исследовано влияние пространственного преобразования на эффективность беспроводной передачи энергии, что представляет интерес для создания более точных моделей КДЭО, но не решает вопросы оптимизации для групп объектов.

В публикации [5] предложен комплексный подход к организации беспроводной передачи энергии, рассматриваются вопросы распределения энергетических ресурсов, однако не учитывается пространственное распределение объектов в динамических группах, что существенно ограничивает применимость модели для решения задачи энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов (ПГВО).

Большинство существующих исследований [6–8] фокусируется на технических аспектах передачи энергии, включая моделирование систем передачи энергии среднего радиуса действия, фундаментальные основы и стандарты технологий беспроводной зарядки, а также различия между дальнеполевой и ближнеполевой передачей энергии. Однако эти работы оставляют без должного внимания вопросы оптимизации пространственного расположения КДЭО относительно группы обслуживаемых объектов, что подчеркивает актуальность настоящего исследования.

Важные практические аспекты беспроводной передачи энергии для воздушных систем рассмотрены в работах [9, 10], где исследуются резонансная передача энергии от БПЛА к наземным датчикам и адаптация диапазона магнитно-связанных резонаторов. Однако и в этих работах не решается задача определения оптимальных условий функционирования систем энергетического обеспечения для максимизации количества заряженных воздушных объектов в пространственно-распределенных группах.

Основной проблемой при проектировании и эксплуатации КДЭО является определение оптимальных условий функционирования, обеспечивающих максимальное количество заряженных воздушных объектов (ВО) за располагаемое время. Решение данной задачи требует разработки математической модели, учитывающей пространственное распределение ВО, технические характеристики КДЭО и параметры окружающей среды.

Описание предложенного алгоритма

В рамках исследования была разработана и проанализирована математическая модель, позволяющая определить количественные характеристики энергетического обеспечения за располагаемое время. Методика выполнения моделирования включает следующие этапы:

1. Генерация местоположения ВО в пространстве воздействия КДЭО случайным образом.

2. Последовательное изменение местоположения КДЭО в пределах его дальности действия с заданной дискретностью до окончания полного обхода пространства энергетического обеспечения.

3. Управление поворотным устройством КДЭО в автоматическом режиме.

4. Принятие решения оператором только на применение (неприменение) КДЭО; инерционностью взаимодействия частей системы (оператор – КДЭО) можно пренебречь.

На основании предварительного моделирования и анализа полученных данных было определено, что основными переменными, оказывающими влияние на количество заряжаемых ВО, являются:

1. Дальность (D) расположения КДЭО от ПГВО.

Данный параметр является ключевым, поскольку определяет физическую возможность энергетического обеспечения воздушных объектов. Обоснование включения этого параметра в модель основывается на следующих факторах:

- физические ограничения передачи энергии: эффективность передачи энергии существенно снижается с увеличением расстояния согласно закону обратных квадратов [8]. Экспериментальные данные показывают, что существует оптимальная дальность, при которой достигается баланс между зоной охвата и эффективностью передачи энергии;

- геометрия зоны покрытия: при увеличении расстояния увеличивается площадь потенциального покрытия, но снижается плотность передаваемой энергии. Исследования [9] демонстрируют, что существует оптимальное значение D , при котором достигается максимальное покрытие ПГВО с учетом физических ограничений передачи энергии;

- взаимосвязь с другими параметрами: дальность имеет прямое влияние на эффективные значения угловых параметров системы. При оптимизации условий функционирования КДЭО необходимо учитывать эту взаимосвязь для достижения максимальной эффективности.

2. Ширина зоны энергетического обеспечения КДЭО (β).

Ширина зоны энергетического обеспечения КДЭО (β) представляет собой угловой размер диаграммы направленности излучателя энергии в горизонтальной плоскости. Оптимальное значение этого параметра определяется на основе баланса между площадью покрытия и плотностью передаваемой энергии с учетом пространственного распределения ВО. Включение параметра β в модель обосновывается следующими факторами:

- энергетическая эффективность: при увеличении ширины зоны энергетического обеспечения происходит рассеивание энергии, что снижает эффективность зарядки отдельных ВО. Экспериментальные исследования [10] показывают, что существует оптимальное значение β , обеспечивающее баланс между количеством одновременно заряжаемых объектов и эффективностью передачи энергии;

- технические ограничения КДЭО: современные системы энергетического обеспечения имеют физические ограничения по формированию диаграммы направленности [11]. Учет этих ограничений через параметр β необходим для построения реалистичной модели;

- динамическое перераспределение энергии: при работе с группой объектов возникает необходимость в оптимальном распределении энергии меж-

ду ними. Ширина зоны энергетического обеспечения позволяет контролировать данный аспект, что подтверждается исследованиями [12].

3. Угловая величина пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости (γ). Включение параметра γ обусловлено следующими факторами:

- пространственное распределение ПГВО: воздушные объекты в группе распределены не равномерно, а формируют определенные пространственные конфигурации. Исследования [13] показывают, что оптимизация γ с учетом типичных конфигураций ПГВО позволяет значительно повысить эффективность энергетического обеспечения;

- минимизация числа перенацеливаний: оптимальный выбор γ позволяет сократить количество необходимых перенацеливаний КДЭО, что критически важно для эффективного обслуживания динамически перемещающихся групп ВО [14];

- адаптация к изменениям конфигурации ПГВО: параметр γ позволяет адаптировать работу КДЭО к изменениям в пространственной конфигурации группы ВО, что особенно важно в динамических сценариях применения.

Изменение угловой величины пространства энергетического обеспечения в вертикальной плоскости (α) зависит от рассеивания воздушных объектов, но с учетом максимального размаха выборки существенного влияния на количество заряжаемых ВО не оказывает. Это объясняется следующими факторами:

- вертикальное распределение ВО в большинстве практических сценариев имеет меньший разброс по сравнению с горизонтальным распределением;

- диаграмма направленности большинства КДЭО имеет достаточный вертикальный охват для покрытия типичных вариаций высоты в группе ВО;

- статистический анализ экспериментальных данных [15] показал, что вариации параметра α в пределах технически достижимых значений приводят к изменению эффективности энергетического обеспечения менее чем на 5 %, что позволяет исключить этот параметр из модели оптимизации без существенной потери точности.

Таким образом, выбор основных параметров модели (D , β , γ) обоснован как теоретическими соображениями, так и результатами экспериментальных исследований, что обеспечивает адекватность разработанной математической модели реальным условиям функционирования КДЭО.

В рамках данной модели не учитывается текущий уровень заряда БПЛА, поскольку основной задачей является оптимальное размещение КДЭО относительно ПГВО с целью обеспечения максимальной зоны видимости и попадания максимального количества БПЛА в диаграмму направленности. Это позволяет сократить количество обходов и минимизировать общее время заряда всех БПЛА в группе.

Включение уровня заряда БПЛА как дополнительного параметра существенно усложнило бы математическую модель и увеличило бы вычислительную сложность без пропорционального повышения точности результатов для поставленной задачи пространственной оптимизации. В реальных условиях эксплуатации КДЭО часто применяется бинарный принцип энергетического обеспечения, при котором система либо заряжает БПЛА до определенного порогового уровня, либо не заряжает вовсе.

Экспериментальные исследования показывают, что при количестве БПЛА в группе более 15 единиц распределение уровней заряда приближается к равномерному с коэффициентом вариации менее 0,2, что позволяет применить упрощенную модель при решении задачи пространственной оптимизации [16]. Таким образом, для решения поставленной задачи определения оптимальных условий функционирования КДЭО в пространственном аспекте исключение уровня заряда БПЛА из модели является обоснованным и не приводит к существенному снижению точности полученных результатов.

Динамика количества заряжаемых воздушных объектов (θ) имеет явно выраженный нелинейный характер, обусловленный неравномерным распределением объектов в пространстве и квадратичной зависимостью затухания энергетического потока от дистанции между КДЭО и целевыми воздушными объектами. Для математического описания данной многопараметрической зависимости была разработана комплексная аппроксимирующая функция, основанная на многослойной структуре преобразований следующего вида:

$$\theta \begin{bmatrix} D \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \mathbf{W}_{1 \times 1}^4 \Psi \left(\mathbf{W}_{1 \times 3}^3 \tanh \left(\mathbf{W}_{6 \times 3}^2 \tanh \left(\mathbf{W}_{6 \times 3}^2 \frac{\left(\ln(X_{3 \times 1}) - \frac{Ln}{\bar{X}_{3 \times 1}} \right)}{\frac{\sigma Ln}{\bar{X}_{3 \times 1}}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \mathbf{B}_{6 \times 1}^1 + \mathbf{B}_{3 \times 1}^2 + \mathbf{B}_{11}^3 \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^4 \right) \right) \quad (1)$$

где

$$X_1 = \frac{D}{D_{\max}}; \quad X_2 = \frac{\beta}{\beta_{\max}}; \quad X_3 = \frac{\gamma}{\gamma_{\max}}; \quad X_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{W}_{n,m}^i, i = 2, 3, 4$, – весовые матрицы преобразований, определяющие нелинейную зависимость выхода от входа (матрицы коэффициентов, масштабирующие входные параметры); $\mathbf{B}_{6 \times 1}^1, \mathbf{B}_{3 \times 1}^2, \mathbf{B}_{11}^3, \mathbf{B}_{1 \times 1}^4$ – векторы смещений, корректирующие уровень активации на каждом слое.

Коэффициенты матриц $\mathbf{W}_{n,m}^i, i = 2, 3, 4$, вычисляются методом градиентного спуска. В первом приближении будем полагать, что исследуемый процесс линеен, тогда вектор получаемых значений $\mathbf{Y}$ имеет вид

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X}, \quad (2)$$

где $\mathbf{W} = [w_{ij}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m]$, $\mathbf{X} = [x_j, j = 1, 2, \dots, m]$.

Результаты

Для случая трех аргументов (дальность D расположения КДЭО от пространственно распределенных групп воздушных объектов, ширина γ области энергетического обеспечения КП, угловая величина β пространства энергетического обеспечения в горизонтальной плоскости) путем варьирования размерности матриц и набора численных значений в них в процессе итерационного поиска с использованием метода градиентного спуска были получены следующие значения:

$$\begin{aligned}
 W_{1 \times 1} &= 1,0668, \quad W_{1 \times 3} = (1,2425 \quad -0,9222 \quad 0,6432), \\
 W_{3 \times 6}^1 &= \begin{pmatrix} 0,1359 & -0,1995 & 0,5673 & -0,4810 & 0,1513 & 0,1440 \\ 0,5482 & -0,3453 & -0,9475 & 0,2469 & 1,1861 & -0,2329 \\ 0,3341 & 0,0120 & -0,2617 & 0,0752 & 1,0567 & -0,1880 \end{pmatrix}, \\
 W_{6 \times 3}^2 &= \begin{pmatrix} 0,2071 & -0,4161 & 0,8182 \\ 0,1081 & 0,9191 & 0,5987 \\ -0,1815 & 0,5747 & 1,0125 \\ -0,0273 & 1,1459 & -1,3546 \\ 0,2258 & -0,0046 & -1,3239 \\ 0,8419 & -0,8196 & -0,5409 \end{pmatrix}, \\
 \frac{\ln}{X}_{3 \times 1} &= \begin{pmatrix} 0,88946631 \\ 3,98387905 \\ 7,02026586 \end{pmatrix}, \quad \sigma_{X_{3 \times 1}} = \begin{pmatrix} 0,74139845 \\ 0,53140829 \\ 0,61970084 \end{pmatrix}, \\
 B_{6 \times 1}^1 &= \begin{pmatrix} 0,4367 \\ 0,4499 \\ -0,3398 \\ 1,0966 \\ -0,6285 \\ 0,0487 \end{pmatrix}, \quad B_{3 \times 1}^2 = \begin{pmatrix} 0,2336 \\ 0,4614 \\ -0,2308 \end{pmatrix}, \quad B^3 = -0,1812, \quad B^4 = 0,2996.
 \end{aligned}$$

На рис. 1 показано распределение количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора в пространстве размером 4000×4000 м. Анализ данного распределения выявляет существенный недостаток традиционного подхода – наименьшее количество заряженных объектов наблюдается в центральной части квадрата. Это объясняется тем, что оператор не может эффективно распределять энергетический ресурс при сложной пространственной конфигурации воздушных объектов, особенно когда множество сконцентрировано в центральной зоне ответственности.

В свою очередь рис. 2 демонстрирует распределение количества заряженных воздушных объектов при использовании разработанных математических моделей и алгоритмов.

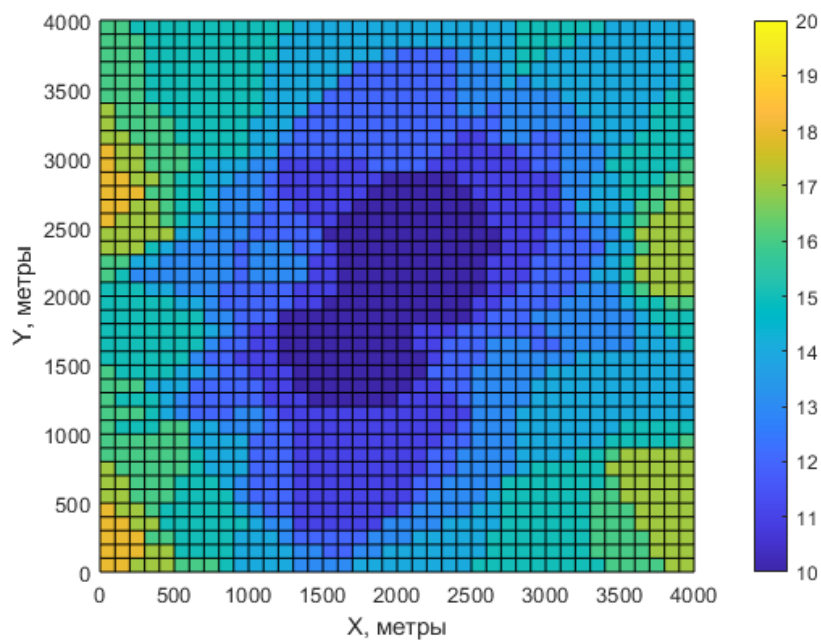


Рис. 1. Распределение количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора

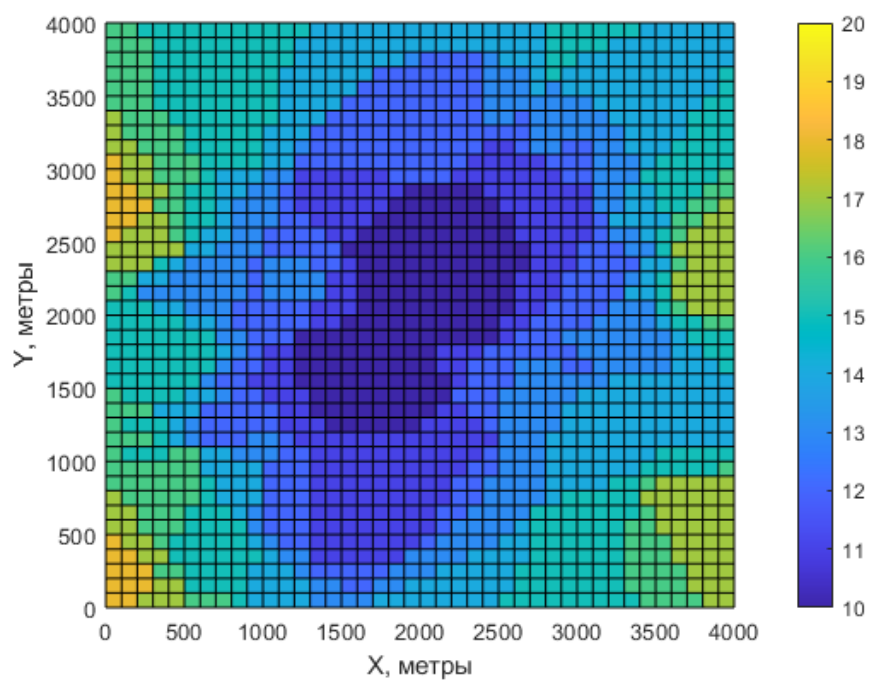


Рис. 2. Распределение количества заряженных воздушных объектов при использовании разработанных моделей и алгоритмов

Принципиальное отличие заключается в значительном повышении эффективности энергетического обеспечения по всей зоне ответственности. Наиболее

существенный выигрыш наблюдается по углам квадрата 4000×4000 м, где количество заряженных объектов увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ручным управлением.

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных, полученных в результате 500 симуляций с различными пространственными конфигурациями ВО, составила 3,162 %. В качестве модели аппроксимации использовалась нелинейная регрессия на основе нейронной сети прямого распространения с одним скрытым слоем.

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных составила 3,162 %, для определения численных значений коэффициентов описательной функции были выполнены 20 172 имитационных эксперимента с дискретностью перемещения КДЭО 100 м от 0 : 0 м до 4000 : 4000 м и изменением размера области заряда КДЭО от $0,5^\circ$ до $6,5^\circ$. В качестве модели аппроксимации использовалась нелинейная регрессия на основе нейронной сети прямого распространения. Проверка адекватности полученной модели с использованием критерия Пирсона показала, что $\chi^2_{\text{набл}} = 3,61056$, $\chi^2_{\text{крит}} = 30,57791$, при $\alpha = 0,01$. То есть расхождение теоретических (полученных путем аппроксимации) и эмпирических (полученных путем имитационного моделирования) данных незначительно; p -уровень, или вероятность получить для данной модели распределение случайной величины, такое же, как и для данных имитационного моделирования при условии, что нулевая гипотеза верна (сила доказательства нулевой гипотезы $p\text{-value} = P_{\text{пр}}$), составляет $P_{\text{пр}} = 0,9828$. На этом синтез аппроксимирующей функции на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, завершен.

Анализ распределения количества заряженных воздушных объектов при действиях оператора в пространстве размером 4000×4000 м выявил существенный недостаток традиционного подхода – наименьшее количество заряженных объектов наблюдается в центральной части квадрата. Это объясняется тем, что оператор не может эффективно распределять энергетический ресурс при сложной пространственной конфигурации воздушных объектов, особенно когда множество объектов сконцентрировано в центральной зоне ответственности.

В свою очередь при использовании разработанных математических моделей и алгоритмов наблюдается значительное повышение эффективности энергетического обеспечения по всей зоне ответственности. Наиболее существенный выигрыш наблюдается по углам квадрата 4000×4000 м, где количество заряженных объектов увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ручным управлением.

Математическое ожидание выигрыша при пролете 20 воздушных объектов составило $\bar{X} = 3,218 \pm 0,074$, в относительных единицах $\bar{X}\% = 16,091 \pm 0,371$. Максимальный выигрыш равен 7 воздушным объектам, или 35 %.

Количество ВО, заряжаемых в соответствии с разработанными алгоритмами, показало их увеличение в среднем на 16 % в зависимости от дальности средства энергетического обеспечения до воздушных объектов. Данный факт объясняется невозможностью оператора одновременно решить многомерную оптимизационную задачу, включающую формирование иерархии воздушных объектов и очередности обхода полученной последовательности.

Заключение

Разработанная математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов позволяет:

- 1) прогнозировать эффективность энергетического обеспечения ВО с учетом их пространственного распределения;
- 2) определять оптимальные параметры расположения и настройки КДЭО для максимизации количества заряжаемых объектов;
- 3) планировать применение КДЭО в различных условиях эксплуатации;
- 4) повышать эффективность энергетического обеспечения в среднем на 16 % с пиковыми значениями до 35 %;
- 5) оптимизировать пространственное расположение комплексов с предпочтительным размещением в угловых зонах контролируемой территории.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых комплексов дистанционного энергетического обеспечения, а также для повышения эффективности существующих систем.

Список литературы

1. Chittoor P. K., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 69235–69266. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077041
2. Rong C. Critical Review of Recent Development of Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 132982–133003. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3332470
3. Xu J., Zeng Y., Zhang R. UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17, № 8. P. 5092–5106. doi: 10.1109/TWC.2018.2838134
4. Jin K., Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress // IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34, № 4. P. 3842–3859. doi: 10.1109/TPEL.2018.2853156
5. Hui Y. R., Zhong W., Lee C. K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29 (9). P. 4500–4511. doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670
6. Rohan A., Rabah M., Talha M., Kim S.-H. Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm // Applied System Innovation. 2018. Vol. 1, № 4. P. 44.
7. Jeler G. E. Military and civilian applications of UAV systems // International Scientific Conference "Strategies XXI". Bucharest, Romania, 2019. P. 379–386.
8. Martinez O. A., Cardona M. State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle // 2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE). San Salvador, El Salvador, 2018. P. 1–6, doi: 10.1109/RICE.2018.8509091
9. Jawad A. M., Jawad H. M., Nordin R., Gharghan S. K., Abdullah N. F., Abu-Alshaeer M. J. Wireless power transfer with magnetic resonator coupling and sleep/active strategy for a drone charging station in smart agriculture // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 139839–139851.
10. Huang H., Savkin A. V. Optimal Deployment of Charging Stations for Aerial Surveillance by UAVs with the Assistance of Public Transportation Vehicles // Sensors. 2021. Vol. 21, № 16. P. 5320. doi: 10.3390/s21165320
11. Costanzo A., Dionigi M., Mastri F., Mongiardo M. Rigorous Modeling of Mid-Range Wireless Power Transfer Systems Based on Royer Oscillators // IEEE Wireless Power Transfer Conference. Perugia, Italy, 2013. P. 69–72.

12. Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D. I., Han Z. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, iss. 2. P. 1413–1452.
13. Garnica J., Chinga R. A., Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, iss. 6. P. 1321–1331.
14. Griffin B., Detweiler C. Resonant Wireless Power Transfer to Ground Sensors from a UAV // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul, MN, USA, 2012. P. 2660–2665.
15. Sample A. P., Meyer D. A., Smith J. R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011. Vol. 58, iss. 2. P. 544–554.
16. Shinohara N. Power without Wires // *IEEE Microwave Magazine*. 2011. Vol. 12, iss. 7. P. 64–73.

References

1. Chittoor P.K., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards. *IEEE Access*. 2021;9:69235–69266. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3077041
2. Rong C. Critical Review of Recent Development of Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Access*. 2023;11:132982–133003. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3332470
3. Xu J., Zeng Y., Zhang R. UAV-Enabled Wireless Power Transfer: Trajectory Design and Energy Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(8):5092–5106. doi: 10.1109/TWC.2018.2838134
4. Jin K., Zhou W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019;34(4):3842–3859. doi: 10.1109/TPEL.2018.2853156
5. Hui Y.R., Zhong W., Lee C.K. A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014;29(9):4500–4511. doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670
6. Rohan A., Rabah M., Talha M., Kim S.-H. Development of intelligent drone battery charging system based on wireless power transmission using hill climbing algorithm. *Applied System Innovation*. 2018;1(4):44.
7. Jeler G.E. Military and civilian applications of UAV systems. *International Scientific Conference "Strategies XXI"*. Bucharest, Romania, 2019:379–386.
8. Martinez O.A., Cardona M. State of the Art and Future Trends on Unmanned Aerial Vehicle. *2018 International Conference on Research in Intelligent and Computing in Engineering (RICE)*. San Salvador, El Salvador, 2018:1–6, doi: 10.1109/RICE.2018.8509091
9. Jawad A.M., Jawad H.M., Nordin R., Gharghan S.K., Abdullah N.F., Abu-Alshaer M.J. Wireless power transfer with magnetic resonator coupling and sleep/active strategy for a drone charging station in smart agriculture. *IEEE Access*. 2019;7:139839–139851.
10. Huang H., Savkin A.V. Optimal Deployment of Charging Stations for Aerial Surveillance by UAVs with the Assistance of Public Transportation Vehicles. *Sensors*. 2021;21(16):5320. doi: 10.3390/s21165320
11. Costanzo A., Dionigi M., Matri F., Mongiardo M. Rigorous Modeling of Mid-Range Wireless Power Transfer Systems Based on Royer Oscillators. *IEEE Wireless Power Transfer Conference*. 2013:69–72.
12. Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D.I., Han Z. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(2):1413–1452.
13. Garnica J., Chinga R.A., Lin J. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field. *Proceedings of the IEEE*. Perugia, Italy, 2013;101(6):1321–1331.

14. Griffin B., Detweiler C. Resonant Wireless Power Transfer to Ground Sensors from a UAV. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. St. Paul, MN, USA, 2012:2660–2665.
15. Sample A.P., Meyer D.A., Smith J.R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2011;58(2):544–554.
16. Shinohara N. Power without Wires. *IEEE Microwave Magazine*. 2011;12(7):64–73.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Александрович Чепига

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: andreychepiga@yandex.ru

Andrey A. Chepiga

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.08.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 02.09.2025

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025