

УДК 681.396.6.049.77

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.021](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.021)

Размещение бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата с применением генетического алгоритма

Р.Р. Гайнутдинов✉, С.Ф. Чермошенцев

*Казанский национальный исследовательский технический университет (КНИТУ-КАИ)
им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация*

Резюме. Современный этап развития беспилотных авиационных комплексов характеризуется широким внедрением автоматизированных и интеллектуальных электронных систем. Одним из наиболее сложных и ответственных этапов разработки беспилотных летательных аппаратов является определение оптимальных мест размещения бортового оборудования в пространстве фюзеляжа. Для решения этой задачи в работе предложен подход для определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата. Подход основан на применении генетического алгоритма. Сформулирована содержательная и математическая постановка задачи по определению оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата. Разработаны критерии и ограничения. В качестве критериев оптимизации в первую очередь рассматриваются критерии электромагнитной совместимости, которые характеризуются минимизацией чувствительности бортового оборудования над уровнем напряженности электромагнитного поля в местах инсталляции бортового оборудования, а также ограничение на превышение порогового уровня восприимчивости бортового оборудования над электромагнитной обстановкой, сложившейся в результате электромагнитных воздействий или взаимодействий. Дополнительно рассматриваются критерии по минимизации общей взвешенной длины кабельных соединений, и ограничивается максимальная грузоподъемность отсеков фюзеляжа беспилотного летательного аппарата. Разработан план инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа с использованием разработанной программы, реализующей генетический алгоритм.

Ключевые слова: размещение, оптимизация, бортовое оборудование, генетический алгоритм, беспилотный летательный аппарат.

Благодарности: данная работа выполнена в рамках Соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых нано- и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

Для цитирования: Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Размещение бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата с применением генетического алгоритма. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1484> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.021

Placing on-board equipment in the fuselage space of an unmanned aerial vehicle using a genetic algorithm

R.R. Gainutdinov✉, S.F. Chermoshentsev

*Kazan National Research Technical University (KNITU-KAI) named after A.N. Tupolev,
Kazan, the Russian Federation*

Abstract. The current stage of unmanned aircraft system development is characterized by the widespread introduction of automated and intelligent electronic systems. One of the most difficult and critical stages in the development of unmanned aerial vehicles is determining the optimal locations for placing on-board equipment in the fuselage space. To solve this problem, the approach for determining the optimal installation locations for on-board equipment in the fuselage space of an unmanned aerial vehicle is proposed. The approach is based on the use of a genetic algorithm. A meaningful and mathematical formulation of the problem of determining the optimal installation locations for on-board equipment in the fuselage space of an unmanned aerial vehicle is given. Criteria and restrictions have been developed. As optimization criteria, first of all, electromagnetic compatibility criteria are considered, which are characterized by minimizing the sensitivity of on-board equipment above the level of electromagnetic field strength at the installation sites of on-board equipment, as well as limiting the excess of the threshold level of susceptibility of on-board equipment over the electromagnetic environment resulting from electromagnetic influences or interactions. Additionally, criteria for minimizing the total weighted length of cable connections are considered, and the maximum load-carrying capacity of the fuselage compartments of an unmanned aerial vehicle is limited. The plan has been developed for the installation of on-board equipment in the fuselage space using a developed program that implements a genetic algorithm.

Keywords: placement, optimization, on-board equipment, genetic algorithm, unmanned aerial vehicle.

Acknowledgements: the paper has been prepared as part of Agreement No. 075-03-2023-032, dated 16.01.2023, (FZSU-2023-0004) between the Ministry of Science and Higher Education and KNITU-KAI on the subject “Enhancing the efficiency and security of equipment elements, the design of new nano- and polymeric composites for energy and transport systems”.

For citation: Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Placing on-board equipment in the fuselage space of an unmanned aerial vehicle using a genetic algorithm. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1484> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.021 (In Russ.).

Введение

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция применения в различных отраслях общества беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В зависимости от типа и класса БПЛА подразделяются на нано, микро, мини, большие, сверхбольшие и т. д. Основным отличительным признаком развития современных летательных аппаратов, в первую очередь, беспилотных, является использование автоматизированных и интеллектуальных технических систем. Наибольшего уровня автоматизации и интеллектуализации достигают БПЛА. Соответственно в зависимости от функций, возложенных на БПЛА, наблюдается устойчивая тенденция увеличения плотности компоновки бортового оборудования в пространстве фюзеляжа, что, в первую очередь, характерно для больших и сверхбольших БПЛА. При разработке БПЛА постоянно повышается плотность компоновки бортового оборудования, что приводит к ухудшению электромагнитной обстановки в пространстве фюзеляжа. Тенденции развития автоматизированных систем управления, основаны на применении более чувствительной элементной базы. Так, применение элементной базы с низкими уровнями сигналов и питающих напряжений, делает бортовое оборудование восприимчивым к электромагнитным взаимодействиям. В больших и сверхбольших БПЛА используется большая номенклатура бортового оборудования (авиационного, специального, целевого) [1]. Использование одновременно аналоговых, цифровых и электротехнических устройств, работающих в широком диапазоне частот (до десятков гигагерц), напряжений и токов, постоянно расширяет пути электромагнитных взаимодействий. Все это явно приводит к ухудшению электромагнитной обстановки и трудностям в обеспечении электромагнитной совместимости [2].

Наряду с увеличением интеллектуализации БПЛА наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению массы и увеличению прочности фюзеляжа. Для достижения требуемых массогабаритных характеристик используются композитные (углепластиковые и стеклопластиковые) материалы. Изготовление фюзеляжа БПЛА с применением композитных материалов приводит к усложнению в обеспечении электромагнитной совместимости бортового оборудования. Композитные материалы характеризуются низкой электрической проводимостью, эффективностью экранирования, анизотропностью и т. д. [3].

Базовой проблемой при разработке БПЛА является оптимальное размещение бортового оборудования. При этом основным негативным фактором, который влияет на качественное функционирование БПЛА, является электромагнитная совместимость [4]. Одним из наиболее опасных факторов, создающих сложную электромагнитную обстановку, являются электромагнитные излучения антенн радиопередатчиков, которые создают сложную электромагнитную обстановку в местах инсталляции бортового оборудования. Так, рациональное размещение бортового оборудования позволит снизить влияние электромагнитных факторов [5].

В различных задачах проектирования и разработки технических систем применяются методы оптимального проектирования, основанные на использовании генетических алгоритмов [6, 7]. Следует отметить работы следующих авторов [8, 9], применяющих генетические алгоритмы для оптимизации проектных решений при разработке различных объектов техники.

Целью данной работы является проведение исследований по разработке подходов и исследование по задачам оптимального определения мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА с учетом критериев, характеризующих электромагнитную совместимость.

Постановка задачи

Решение задачи размещения бортового оборудования заключается в поиске оптимальных мест его инсталляции в трехмерном пространстве фюзеляжа БПЛА с учетом следующих условий:

- корпуса бортового оборудования не должны взаимно пересекаться;
- бортовое оборудование должно размещаться в пределах пространства фюзеляжа.

Корпуса бортового оборудования имеют форму параллелепипедов с габаритными размерами, a , b , c . А фюзеляж БПЛА в большинстве случаев имеет форму цилиндра. В рамках работы поиск оптимальных мест инсталляции бортового оборудования проводится в трехмерном объеме фюзеляжа, который представляется параллелепипедом с габаритами A , B , C .

При решении задачи необходимо соблюдать следующие ограничения:

- на расстояние между местами инсталляции бортового оборудования;
- на равномерное распределение бортового оборудования в пространстве фюзеляжа по массе;
- на инсталляцию части бортового оборудования в пределах области, определяемой проектировщиком;
- на инсталляцию бортового оборудования в запрещенных зонах;
- на инсталляцию бортового оборудования в фиксированных позициях, установленных проектировщиком.

Критерии задачи

Электромагнитная совместимость является базовым параметром, позволяющим различным техническим системам работать с заданным качеством в замкнутых объемах отсека фюзеляжа БПЛА. При исследовании внутрисистемной электромагнитной совместимости, определяемой электромагнитными взаимодействиями внутри одного объекта, выделяются электромагнитные факторы, определяющие электромагнитную обстановку внутри отсеков фюзеляжа. Одним из факторов, создающих наиболее сложную электромагнитную обстановку, являются излучения антенн радиопередатчиков. Так, для определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования может быть предложен следующий критерий F_1 :

$$F_1 = \left(\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (E_{\text{восп}}^i - E_{\text{возд}}^{x_i, y_i, z_i}) \right) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Использование данного критерия для решения поставленной задачи позволяет выявить вариант размещения электронных средств, который минимизирует воздействие излучения от антенн радиопередатчиков на электронное, радиоэлектронное и электротехническое оборудование БПЛА.

При этом предлагается дополнительно учитывать ограничение порогового уровня восприимчивости бортового оборудования над электромагнитной обстановкой, сложившейся в результате электромагнитных воздействий или взаимодействий:

$$E_{\text{возд}}^{(x_i, y_i, z_i)} \leq E_{\text{восп}}^i, \quad i = \overline{1..n}, \quad (2)$$

где $E_{\text{восп}}^i$ – уровень восприимчивости i -го оборудования; $E_{\text{возд}}^{(x_i, y_i, z_i)}$ – уровень напряженности электрического поля в точке инсталляции i -го оборудования с координатами x_i, y_i, z_i , характеризующей электромагнитную обстановку в отсеке БПЛА.

Показатели уровня восприимчивости бортового оборудования могут быть получены из требований нормативно технических документов. Так, согласно требованиям стандарта Mil-461 для контроля эмиссии электромагнитных помех и характеристик восприимчивости электронного, электрического и электромеханического оборудования и подсистем. Все бортовое оборудование в составе БПЛА, изготовленного из композитных материалов, должно удовлетворять требованиям восприимчивости при воздействии радиочастотного электромагнитного поля с напряженностью в 200 В/м.

Основным источником электромагнитных взаимодействий, влияющих на показатели электромагнитной обстановки в пространстве фюзеляжа БПЛА, являются излучения антенн радиопередатчиков.

Для определения электромагнитной обстановки могут применяться различные методы: аналитические вычисления, компьютерное моделирование, экспериментальные исследования.

Для случая изготовления фюзеляжа из радиопрозрачного материала может быть использован следующий аналитический подход.

Введем ограничение на то, что все антенны являются несимметричными вибраторами. Для дипольных антенн характерным является малый ток и высокое напряжение, поэтому в электромагнитном поле электрическая составляющая будет превалировать над магнитной, отсюда напряженность электрического поля в ближней зоне излучения ($r < \frac{\lambda}{2\pi}$) задается следующей формулой:

$$E = \frac{\sqrt{50}IL}{2\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (3)$$

где I – ток в антенне, L – длина антенны, ε – диэлектрическая проницаемость среды, ω – угловая частота, r – расстояние от антенны до отсека.

Расстояние от антенны до места инсталляции бортового оборудования задается следующей формулой в координатах:

$$r = \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i - c_j)^2}, \quad (4)$$

где (x_i, y_i, z_i) – координаты места инсталляции i -го бортового оборудования, $(a_j; b_j; c_j)$ – координаты j -ой антенны.

В дальней зоне излучения ($r > \frac{\lambda}{2\pi}$) может быть использована следующая формула, которая позволяет определить уровень электрического поля:

$$E = \frac{\sqrt{30PG}}{r}, \quad (5)$$

где P – мощность излучения антенной системы, G – коэффициент усиления антенны.

Каждая антенна радиопередатчика бортового оборудования БПЛА излучает с заданной мощностью, создавая напряженность электрического поля в определенном пространстве. Для нахождения значения напряженности электрического поля E , которое характеризует излучение одновременно всех антенн радиопередатчиков в некоторой точке с координатами (x_i, y_i, z_i) , используется принцип суперпозиции:

$$E_{\text{возд}}^{(x_i, y_i, z_i)} = \sum_{j=1}^k E_j, \quad (6)$$

где E_j – напряженность электрического поля, характеризующая излучение j -ой антенны в точке (x_i, y_i, z_i) .

Обобщающее выражение для определения результирующей напряженности поля в точке (x_i, y_i, z_i) отсека можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} E_j &= \frac{\sqrt{50I_j l_j}}{4\pi^2 \varepsilon f_j \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i + c_j)^2}^3}, \\ \sum_{j=1}^k \text{by} \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i + c_j)^2} &< \frac{c}{2\pi f_j} \\ \sum_{j=1}^k E_j &= \frac{\sqrt{30P_j}}{\sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i + c_j)^2}}, \\ \text{by} \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i + c_j)^2} &> \frac{c}{2\pi f_j} \end{aligned} \quad (7)$$

где n – количество размещаемых устройств, k – количество излучающих антенн.

Для обеспечения электромагнитной совместимости бортового оборудования БПЛА при электромагнитных взаимодействиях и воздействиях использован вышеописанный критерий.

Критерий, учитывающий минимальную суммарную взвешенную связанность бортового оборудования БПЛА, представлен ниже:

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \times d_{ij} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где c_{ij} – количество кабельных соединений между i -ым и j -ым бортовым оборудованием, d_{ij} – расстояние между блоками бортового оборудования:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - b_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (9)$$

где (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) – координаты места инсталляции i -го и j -го бортового оборудования. Учет данного критерия позволяет уменьшить длину кабельных

соединений на этапе их трассировки, что дополнительно позволяет повысить устойчивость бортового оборудования к электромагнитным взаимодействиям и воздействиям за счет уменьшения площади контуров, образованных линиями связи.

При размещении бортового оборудования необходимо учитывать максимальную грузоподъемность отсеков фюзеляжа летательного аппарата. Для данных целей введем следующее ограничение:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n m_i \leq M_j, \quad (10)$$

где M_j – грузоподъемность j -ого отсека, кг; m_i – масса i -ого бортового оборудования, кг.

Аддитивная целевая функция, которая применяется для свертки критериев, может быть представлена следующим выражением:

$$F = \alpha_1 \times F_1 + \alpha_2 \times F_2, \quad (11)$$

где α_i – весовые коэффициенты, определяющие приоритет использования i -го критерия оптимальности при решении задачи размещения оборудования ($\alpha_i \in [0,1], \sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1; i = \overline{1..n}$). Уровни весовых коэффициентов определяются, как исходные данные задачи, на основании требований к определению мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА.

Генетический алгоритм для решения задачи размещения бортового оборудования

Для решения определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА с учетом предложенных критериев и ограничений используется генетический алгоритм оптимизации [7, 10]. Концептуальная схема генетического алгоритма для решения задачи по определению оптимальных мест инсталляции бортового оборудования БПЛА представлена на Рисунке 1.

Решение задачи представляется в виде хромосомы. Подразумевается, что данное решение потенциальное. Номенклатура бортового оборудования нумеруется, таким образом, локусы ($i = \overline{1..n}$) хромосомы X соответствуют данным номерам. Аллели $X[i]$ – являются номерами позиций для инсталляции оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА.

На первом этапе работы генетического алгоритма происходит формирование начальной популяции особей, которые являются потенциальными решениями задачи. Генам хромосом всех особей присваиваются значения из диапазона допустимых случайным образом: $1 \leq X[i] \leq m$, где m – количество позиций для инсталляции. Значения генов внутри одной хромосомы особи не повторяются: $X[i] \neq X[j], i, j = \overline{1..n}, i \neq j$.

Родительские пары перед скрещиванием подбираются с применением принципов панмиксии (случайным образом). Потомки являются новыми потенциальными решениями и содержат неповторяющиеся значения генов в хромосоме. Для получения потомков применяется оператор одноточечного упорядоченного скрещивания.

На следующем шаге генетического алгоритма применяется оператор двухточечной мутации. Данный оператор реализует обмен локусами двух, случайно выбранных, генов в хромосоме особей. Для определения плана мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА, соответствующего каждой хромосоме, применяется процедура декодирования особей. После получения потенциальных планов мест инсталляции бортового оборудования происходит оценка их качества, в соответствии с критериями задачи. Следующее поколение особей формируется с использованием оператора, который проводит элитную селекцию. Завершение работы алгоритма происходит, если не происходит изменение значения

аддитивной целевой функции лучшей хромосомы в популяции на протяжении определенного числа последних поколений.

Представленный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ. В рамках экспериментальных исследований генетического алгоритма для решения задачи по определению оптимальных мест инсталляции бортового оборудования определялись зависимости скорости сходимости и показателей качества получаемых решений от значений параметров (размерность популяции особей, вероятность скрещивания и мутации). Так, по выявленным зависимостям установлено, что наиболее эффективная работа генетического алгоритма достигается при следующих значениях управляемых параметров: размерность популяции должна быть равна не менее чем 1000 особей при количестве инсталлируемого бортового оборудования, превышающем 30 единиц; вероятности скрещивания и мутации должны принимать значения в диапазоне от 0,7 до 1.

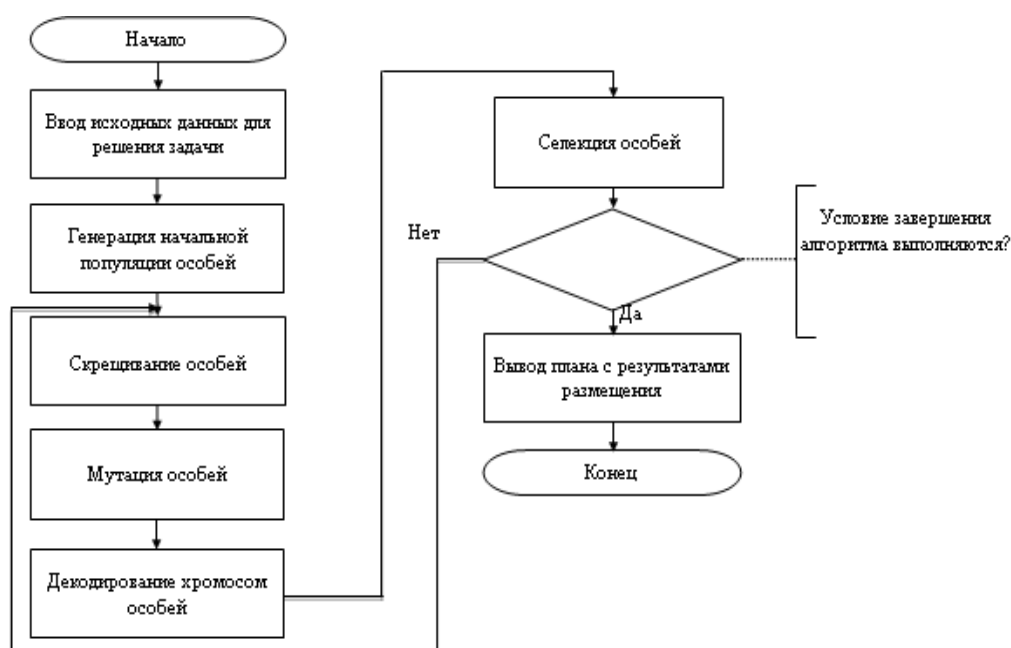


Рисунок 1 – Схема генетического алгоритма, применяемого для определения оптимальных мест инсталляции

Figure 1 – Scheme of the genetic algorithm used to determine optimal installation locations

Пример

На Рисунке 2, для примера, представлен план размещения 30 единиц бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА, полученный с использованием разработанной программы, которая реализует вышеописанный генетический алгоритм.

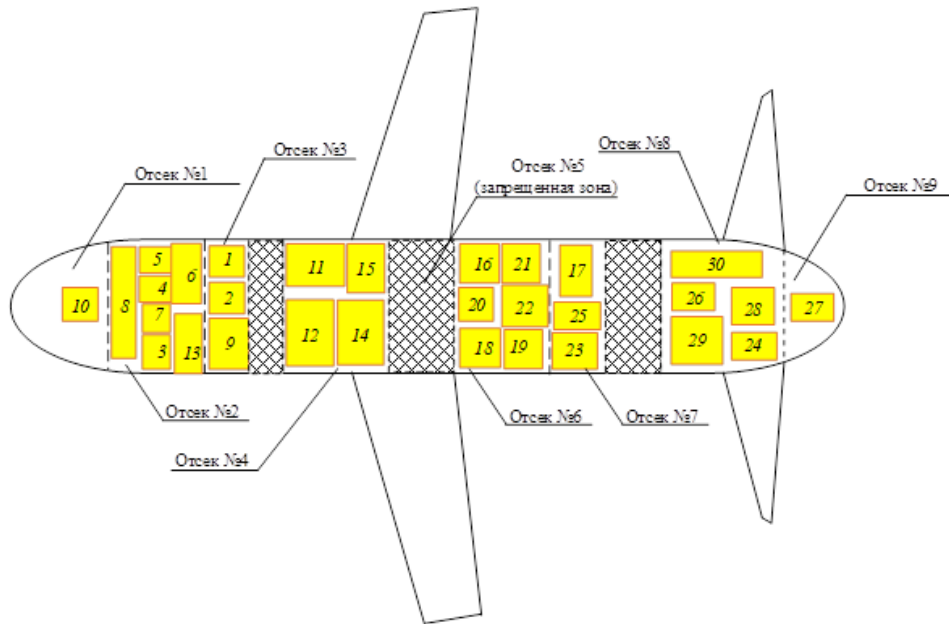


Рисунок 2 – План инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА
Figure 2 – Installation plan for onboard equipment in the fuselage of the UAV

Заключение

Таким образом, по результатам можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложен подход для определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА.

2. Сформулирована содержательная и математическая постановка задачи для определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА.

3. Разработаны критерии и ограничения для задачи определения оптимальных мест инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА, позволяющие учитывать критерий электромагнитной совместимости, который в данной работе представлен уровнями восприимчивости бортового оборудования к излучению антенн радиопередатчиков.

4. Разработан генетический алгоритм, который реализован в виде программы для ЭВМ. Данный алгоритм позволяет определить оптимальные места инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА с применением аддитивной целевой функции для решения многокритериальной задачи оптимизации.

5. Исследования эффективности генетического алгоритма для оптимальной настройки его управляемых параметров. Так, размерность популяции должна быть равна не менее чем 1000 особей при количестве устанавливаемого бортового оборудования, превышающего 30 единиц. Разработан план инсталляции бортового оборудования в пространстве фюзеляжа БПЛА с применением реализованного в виде программы для ЭВМ генетического алгоритма.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов В.Ю., Фуентес Р.К. Алгоритм проектирования бортовой кабельной сети подвижных объектов с учетом электромагнитной совместимости. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2008;(2):47–50.

2. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology for Studying the Electromagnetic Resistance of Technical Systems under External Electromagnetic Effect from Several Sources. *Russian Aeronautics*. 2023;66(2):146–153. DOI: 10.3103/S1068799823010208.
3. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Metaelement Parameters Optimization for Creation Metamaterial with Given Electromagnetic Properties. In: *2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, 05-11 September 2021, Sochi, Russia*. IEEE; 2021. p. 775–779.
4. Averin S.V., Kirillov V.Yu., Mashukov E.V., Reznikov S.B., Shevtsov D.A. Ensuring the electromagnetic compatibility of onboard cables for unmanned aerial vehicles. *Russian Aeronautics*. 2017;60(3):442–446. DOI: 10.3103/S1068799817030175.
5. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics. *Russian Aeronautics*. 2016;59(4):613–618. DOI: 10.3103/S1068799816040279.
6. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Генетические алгоритмы*. М.: Физматлит; 2006. 320 с.
7. Belousov A.O., Gazizov T.T., Gazizov T.R. Multicriteria optimization of four-conductor modal filter by genetic algorithms. In: *2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 18-22 September 2017, Novosibirsk, Russia*. IEEE; 2017. p. 445–448.
8. Suzdaltsev I.V., Chermoshentsev S.F., Bogula N.Yu. Bionic algorithms for multi-criteria design of electronic equipment printed circuit board. In: *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 24-26 May 2017, Saint-Petersburg, Russia*. IEEE; 2017. p. 394–396.
9. Tsarev I.V. Planning the aircraft cable assembly lines, taking into account intersystem electromagnetic compatibility. In: *IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 21-24 June 2005, Saint-Petersburg, Russia*. IEEE; 2005. p. 163–166.

REFERENCES

1. Kirillov V.Yu., Fuentes R.K. An algorithm for designing an on-board cable network of mobile objects taking into account electromagnetic compatibility. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости = Technologies of electromagnetic compatibility*. 2008;(2):47–50. (In Russ.).
2. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology for Studying the Electromagnetic Resistance of Technical Systems under External Electromagnetic Effect from Several Sources. *Russian Aeronautics*. 2023;66(2):146–153. DOI: 10.3103/S1068799823010208.
3. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Metaelement Parameters Optimization for Creation Metamaterial with Given Electromagnetic Properties. In: *2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, 05-11 September 2021, Sochi, Russia*. IEEE; 2021. p. 775–779.
4. Averin S.V., Kirillov V.Yu., Mashukov E.V., Reznikov S.B., Shevtsov D.A. Ensuring the electromagnetic compatibility of onboard cables for unmanned aerial vehicles. *Russian Aeronautics*. 2017;60(3):442–446. DOI: 10.3103/S1068799817030175.
5. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics. *Russian Aeronautics*. 2016;59(4):613–618. DOI: 10.3103/S1068799816040279.
6. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Genetic algorithms*. М.: Fizmatlit; 2006. 320 p. (In Russ.).

7. Belousov A.O., Gazizov T.T., Gazizov T.R. Multicriteria optimization of four-conductor modal filter by genetic algorithms. In: *2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 18-22 September 2017, Novosibirsk, Russia*. IEEE; 2017. p. 445–448.
8. Suzdaltsev I.V., Chermoshencev S.F., Bogula N.Yu. Bionic algorithms for multi-criteria design of electronic equipment printed circuit board. In: *2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 24-26 May 2017, Saint-Petersburg, Russia*. IEEE; 2017. p. 394–396.
9. Tsarev I.V. Planning the aircraft cable assembly lines, taking into account intersystem electromagnetic compatibility. In: *IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, 21-24 June 2005, Saint-Petersburg, Russia*. IEEE; 2005. p. 163–166.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гайнутдинов Рустам Рафкатович, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация.

e-mail: emc-kai@mail.ru

ORCID: [0000-0003-1973-2941](https://orcid.org/0000-0003-1973-2941)

Rustam R. Gaynutdinov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Computer-Aided Design Systems, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, the Russian Federation.

Чермошенцев Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Российская Федерация.

e-mail: sapr@mail.ru

ORCID: [0000-0003-4020-8984](https://orcid.org/0000-0003-4020-8984)

Sergey F. Chermoshentsev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Computer-Aided Design Systems, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023; одобрена после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 12.03.2024.

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 22.01.2024; accepted for publication 12.03.2024.