

Научная статья
УДК 623.746.4-519
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185121>
EDN: <https://www.elibrary.ru/RJRCWP>

МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ БПЛА FRV-ТИПА НА ОСНОВЕ ПРОТОТИПА

**Александр Владиславович Ананьев^{1✉}, Александр Вячеславович Акимов²,
Наиль Фаритович Кузьяров³, Сергей Игоревич Моисеев⁴**

¹ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,
Воронеж, Россия

^{1,3}ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия

²ООО «Радиоизмерения»,
Казань, Республика Татарстан

⁴Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия

¹Ananyev-Alexandr@yandex.ru✉

Аннотация. Реализация полноценного цикла разработки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) требует значительных ресурсов, времени и финансовых вложений. В связи с этим рациональным подходом может стать модернизация существующих моделей путем эволюции от некоторого прототипа с использованием методов многокритериальной оптимизации.

В работе проведен анализ существующих методов конструирования БПЛА. На

основе анализа предложено выделение базовой модели (прототипа) БпЛА. Методика включает некоторую конфигурацию с определенными характеристиками, определяющими основные свойства изделия.

Проведен анализ методов многокритериальной оптимизации, учитывающих несколько противоречивых критериев. Выбран метод критериальных ограничений в задаче многокритериальной оптимизации для методики разработки БпЛА с заданными характеристиками, позволяющий получить из многокритериальной задачи однокритериальную с одной целевой функцией, что обеспечивает использование стандартных аналитических и численных методов поиска оптимальных решений. Выбор метода критериальных ограничений также обусловлен тем, что он позволяет задавать жесткие ограничения по каждому критерию, отличающемуся от улучшаемого, что не позволит на множестве Парето-оптимальных решений ухудшить параметры БпЛА ниже допустимых значений. Выделение нескольких основных критериев в процессе реализации метода многокритериальной оптимизации и последовательной оптимизации по каждому из них позволяет максимально приблизить характеристики конфигурации к требуемым значениям.

Для практической реализации предложенной авторами идеи в работе сконструирован прототип базовой модели.

Ключевые слова: формирование БпЛА, конфигурация БпЛА, многокритериальная методика, проектирование, оптимизация, критериальные ограничения

Для цитирования: Ананьев А.В., Акимов А.В., Кузьяров Н.Ф., Моисеев С.И. Методика многокритериального эволюционного формирования конфигурации БПЛА

Original article

METHODOLOGY OF MULTI-CRITERIA EVOLUTIONARY CONFIGURATION FORMATION FOR FPV-TYPE UAV BASED ON A PROTOTYPE

Alexander V. Ananjev^{1,3✉}, Alexander V. Akimov², Nail F. Kuziyarov³, Sergey I. Moiseev⁴

¹Plekhanov Russian University of Economics,
Voronezh, Russia

^{1,3}MERC AF «AFA named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»,
Voronezh, Russia

²LLC «Radio Measurements»,
Kazan, Republic of Tatarstan

⁴Voronezh state technical university
Voronezh, Russia

¹Ananyev-Alexandr@yandex.ru✉

Abstract. Developing a new unmanned aerial vehicle (UAV) from scratch requires significant resources, time, and financial investment. Instead, an optimal approach may be to modernize existing models. This work presents a methodology for the evolutionary formation of the configuration of FPV-type UAV based on a prototype, grounded in multi-criteria optimization. An analysis of existing methods for forming UAVs has been conducted. Based on this analysis, a basic model (prototype) of the UAV has been identified,

and the elements included in the prototype are listed. The methodology encompasses a specific configuration and possesses certain characteristics that define the main properties of the product.

Multi-criteria optimization methods are used to solve problems where it is necessary to consider several conflicting criteria. The method of criterion constraints in multi-criteria optimization for the development of UAVs with specified characteristics allows for transforming a multi-criteria problem into a single-criteria one with a single objective function. This enables the use of standard analytical and numerical methods for finding optimal solutions. However, this feature is also characteristic of other multi-criteria optimization methods.

The decision to specifically use the criterion constraints method is primarily due to its ability to impose strict limits on each criterion that differs from the one being improved. This ensures that the parameters of the UAV do not fall below acceptable values within the set of Pareto-optimal solutions. Highlighting several key criteria during the implementation of the multi-criteria optimization method and sequential optimization for each of them allows for the characteristics of the configuration to be brought as close as possible to the required values.

Keywords: formation of UAV, configuration of UAV, multi-criteria methodology, design, optimization, criteria constraints

For citation: Ananjev A.V., Akimov A.V., Kuziyarov N.F., Moiseev S.I. Methodology of multi-criteria evolutionary configuration formation for FPV-type UAV based on a prototype. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185121>

Введение

В настоящее время наблюдается рост промышленного производства мультироторных БПЛА FPV-типа. Несмотря на достигаемые в настоящее время гибкость производства, представляет интерес сохранение цепей поставок оборудования предприятий-партнеров и контрагентов. В то же время для сохранения конкурентоспособности выпускаемой продукции необходимо своевременно реагировать на современные достижения производителей специализированных функциональных узлов из состава БПЛА. Так, например, целесообразно своевременно переходить на полетные контроллеры с повышенным быстродействием обработки информации и расширенной периферией, передатчики с большей мощностью выходного сигнала и т.д.

Изложенное обуславливает противоречие в практике производства между необходимостью своевременно переходить на использование более технически совершенных компонентов БПЛА и инертностью перестройки производства, как правило, сопровождаемой ограниченным финансированием.

Разрешить изложенное противоречие можно путем эволюционного перехода к новым конструктивным исполнениям аппаратуры на основе существующих прототипов с соблюдением оптимизации технических характеристик. Такому принципу повышения качества продукции способствует конструктивное сходство БПЛА.

В ходе работы был проведен анализ существующих научных подходов к разработке аппаратуры БПЛА, который показал следующее. В исследованиях [1-7] рассматривается процесс разработки конструкции БПЛА мультироторного типа,

изучаются особенности и отличия разработки БПЛА от разработки пилотируемых летательных аппаратов, проводится полунатурное моделирование БПЛА мультироторного типа, обсуждается формирование технического облика БПЛА с учетом используемого на нем оборудования, решается задача выбора элемента питания из их множества для БПЛА мультироторного типа с заданным количеством двигателей. Также в некоторых исследованиях [8-11] применяется морфологический анализ компоновки технических устройств. Так, в работе [8] описан комплекс моделирования и оптимизации процесса сборки самолётов, в работе [9] обсуждается вопрос выбора оптимального компоновочного решения из нескольких предложенных вариантов в условиях отсутствия достоверных статистических данных, при этом предлагается проводить экспертную оценку по каждому параметру, влияющему на выбор данного компоновочного решения. Декомпозиция состава БПЛА также может включать структурно-параметрический анализ с автоматизацией маршрута проектирования [10, 11].

Конструирование БПЛА связано с разрешением многокритериального противоречия группы показателей. В этом случае с позиций системного подхода наиболее подходящим инструментом является многокритериальный анализ. В отечественной практике основоположником применения многокритериального анализа радиотехнических систем в исследованиях можно считать Гуткина Льва Соломоновича [12, 13]. Известны и существенно упрощенные методы для рационального выбора технических решений [14], где предложен экспертный метод обоснования рационального выбора БПЛА для аэромобильной сети связи, но экспертным методам присущ ряд недостатков, таких как субъективность,

неоднородность мнений и т.д. [15, 16]

Целью данной работы является разработка методики многокритериального эволюционного формирования конфигурации БпЛА FPV-типа на основе прототипа.

Предпосылки использования методики прототипов при разработке новых конфигураций БпЛА

При формировании БпЛА возникает необходимость подбирать особые конфигурации изделий, которые должны отвечать набору требований по их использованию. Ввиду этого рационально использовать некоторое базовое изделие, которое в дальнейшем будем называть прототипом БпЛА, исходя из которого, будем изменять его конфигурацию в некоторых пределах, приближая свойства изделия к необходимым требованиям.

Прототипирование представляет собой «черновую» реализацию основных функций будущего изделия, что позволяет проанализировать работу системы в целом. На этапе прототипирования с минимальными усилиями создаётся работающая система, но она может быть низкоэффективной, содержать ошибки и не в полной мере соответствовать требованиям.

Разработка методики совершенствования поколений модельного ряда БпЛА по апробированным прототипам отличается применением математической модели критериальных ограничений методов многокритериальной оптимизации, что позволит разработать наиболее функциональное изделие с минимальными временными и ресурсными затратами.

Метод критериальных ограничений в многокритериальной оптимизации обладает несколькими преимуществами:

1. Гибкость – позволяет учитывать множество критериев, адаптируя их под специфику задачи.

2. Упрощение решения – преобразует многокритериальную задачу в одноцелевую, что облегчает поиск оптимального решения.

3. Четкое управление – позволяет задавать жесткие ограничения по каждому критерию, что помогает избежать недопустимых решений.

4. Интуитивное понимание – легко воспринимается, так как методы, основанные на ограничениях, часто более понятны для пользователей.

5. Адаптивность – можно легко подстраивать ограничения в зависимости от изменяющихся условий или ввода данных.

6. Оптимальность решений – помогает находить решения, которые наиболее полно учитывают заданные ограничения и критерии.

7. Подход к компромиссу – способствует нахождению компромиссных решений при наличии конфликтующих критериев.

В данной работе ставится задача привести математическую модель, основанную на методах многокритериальной оптимизации [17], а также описать ее практическую реализацию.

Использование прототипов при разработке новых БПЛА на основе базового изделия имеет несколько ключевых преимуществ:

прототипы позволяют исследовать и тестировать первоначальные идеи и концепции, что дает возможность выявить слабые стороны на ранних этапах;

создание прототипов помогает избежать крупных ошибок в конечном продукте, что уменьшает риски при создании новых изделий;

прототипы позволяют проверить работу всех функций изделия и убедиться, что они соответствуют запланированным характеристикам;

использование прототипов помогает обнаружить проблемы и неоптимальные решения при разработке новых БПЛА на более ранней стадии, что в конечном итоге экономит время и ресурсы на дальнейшей стадии подбора конфигурации БПЛА, и другие.

Если конкретизировать данные преимущества непосредственно для БПЛА FPV-типа, то можно сказать, что переделка прототипа изделия путем замены отдельного компонента может быть проще и более целесообразной, чем сборка нового аппарата с нуля, по нескольким причинам:

сохранение существующей структуры – имеется уже готовая база и другие компоненты, замена одного или несколько элементов позволяет сохранить уже настроенную конструкцию, что экономит время и усилия на сборку;

сокращение времени реагирования – разборка и сборка нового БПЛА требует значительного времени на установку всех компонентов, настройку и тестирование, замена части компонентов занимает гораздо меньше времени;

сохранение существующих настроек – при замене малого количества компонентов, например, камеры или передатчика, можно сохранить уже настроенные параметры полетного контроллера и другие настройки;

легкость в тестировании – после замены компонента можно быстро провести тестовые полеты, чтобы убедиться в его работоспособности;

быстрая адаптация к изменениям – если в процессе выполнения каких-либо задач становится очевидным, что определенный компонент нуждается в улучшении,

его можно быстро заменить без необходимости сборки всего аппарата с нуля;

снижение времени на обучение – если оператор уже знаком с конкретной моделью БПЛА, ему будет легче заменить компонент, чем обучаться сборке нового аппарата;

экономия – сборка нового БПЛА требует покупки всех компонентов, а замена одного компонента позволяет избежать дополнительных затрат;

логистические преимущества – вместо необходимости хранить и транспортировать множество компонентов для сборки нового БПЛА, можно сосредоточиться на запасных частях, которые наиболее уязвимы или подвержены повреждениям.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим некоторую базовую модель БПЛА, имеющую известную конфигурацию и обладающую определенными характеристиками.

Пусть конфигурация БПЛА содержит в себе n характеристик базовых элементов, определяющих основные свойства изделия. Обозначим эти элементы вектором $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Под переменными данного вектора будем подразумевать не сами элементы, как физические объекты, а их числовые характеристики. Если таких характеристик несколько, каждая характеризуется отдельной переменной.

Базовое изделие или прототип имеет следующие характеристики:

$$\vec{X}^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0).$$

Кроме этого, необходимо учитывать допустимые значения характеристик, которые выражаются, согласно методам оптимизации [17, 18] в виде некоторых

неравенств или равенств, наложенных на комбинации из характеристик, что в совокупности образует область допустимых значений характеристик D , которую можно записать в виде:

$$D = \begin{cases} \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_1; \\ \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_2; \\ \dots \\ \varphi_K(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_K, \end{cases} \quad (1)$$

где: $\varphi_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $k = 1, 2, \dots, K$ - некоторые функции, связывающие характеристики в ограничениях;

b_k – границы ограничений;

K – количество ограничений, может быть любым целым числом, $\{ \geq, \leq, = \}$ – множество видов ограничений.

Конфигурация изделия включает в себя базовые элементы с определенными характеристиками, которые указаны ниже:

мотор: тяга, входное напряжение, рабочая температура, потребляемые токи;

несущие винты: максимальная тяга;

регуляторы оборотов: потребление тока, входное напряжение;

полетный контроллер: программное обеспечение, количество разъемов для подключения периферийных устройств;

рама: размер, вес, прочность;

аккумуляторная батарея: емкость, вес, входное напряжение;

видеопередатчик: выходная мощность, диапазон рабочих частот, количество каналов, разъем для антенны, наличие встроенного микрофона;

антенна: коэффициент усиления, совместимость, размеры;

радиоприемник: диапазон рабочих частот, частота обновления сигнала, вес, размер.

Далее, рассмотрим критерии или требования, которым должен удовлетворять БПЛА FPV-типа. Предположим, что таких критериев m и, что логично, они являются функциями от характеристик, обозначим их через $Q_j(\vec{X})$, где $j=1,2,\dots,m$, соответственно, базовое изделие имеет характеристики $Q_j(\vec{X}^0)$. Более подробно о критериях будет сказано в следующем разделе работы [19].

Ставится задача максимально увеличить некоторый критерий или требования к БПЛА FPV-типа так, чтобы остальные требования оставались в допустимых пределах.

Математическая модель задачи

Таким образом, для выполнения задачи использования БПЛА требуется максимально улучшить некоторый критерий изделия. В дальнейшем, данный критерий будет иметь первый индекс, то есть обозначим его через $Q_1(\vec{X})$. Также определим то, что данный критерий направлен на максимизацию, то есть чем он выше, тем лучше качество изделия по данному критерию. Если критерий на минимизацию, то достаточно его умножить на множитель (-1) .

Кроме этого, необходимо учитывать требование, чтобы остальные критерии оставались в допустимых пределах, что позволит функционально выполнить БПЛА требуемую задачу.

Для решения подобной задачи наиболее рационально использовать методику многокритериальной оптимизации [20-21], базирующуюся на методе критериальных

ограничений. Его суть заключается в переходе к однокритериальной задаче путем выделения одного критерия в качестве целевой функции и введением пороговых допустимых значений для остальных критериев. Для нашей задачи определяется основной критерий $Q_1(\vec{X})$, который становится целевой функцией:

$$Q_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max \quad (2)$$

Для всех остальных критериев определяются пороговые значения, хуже которых они не должны быть. Для упрощения формулировки задачи, будем считать, что все остальные критерии также направлены на максимизацию, если это не так, то достаточно его умножить на множитель (-1).

Введем некоторые минимальные допустимые значения остальных критериев, которые обозначим в виде: $Q_2^{\min}, Q_3^{\min}, \dots, Q_m^{\min}$. В этом случае появятся дополнительные ограничения в виде:

$$\begin{cases} Q_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_2^{\min}; \\ Q_3(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_3^{\min}; \\ \dots \\ Q_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_m^{\min}. \end{cases} \quad (3)$$

Если обобщить вышесказанное, то выбор наиболее оптимального БпЛА FPV-типа будет основан на решении однокритериальной задачи с целевой функцией (2) и ограничениями (3) и (1), а также неотрицательности значений факторов, и ее формулировка примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& Q_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max \\
& \left\{ \begin{aligned}
& Q_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_2^{\min}; \\
& Q_3(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_3^{\min}; \\
& \dots \\
& Q_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q_m^{\min}; \\
& \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_1; \\
& \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_2; \\
& \dots \\
& \varphi_K(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, \leq, = \} b_K,
\end{aligned} \right. \quad (4) \\
& x_{1,2,\dots,n} \geq 0.
\end{aligned}$$

Для пояснения данного подхода, приведем графическую интерпретацию решения для двух характеристик, что позволит использовать графическое решение на плоскости. В качестве примера возьмем четыре ограничения, первое будет оптимизироваться, а остальные представим в виде линейных ограничений. В результате решаем оптимизационную задачу (4), где $\varphi_k(x_1, x_2)$, $k=1,2,\dots,K$ - линейные функции. В этом случае задача будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
& Q_1(x_1, x_2) \rightarrow \max \\
& \left\{ \begin{aligned}
& Q_2(x_1, x_2) \geq Q_2^{\min}; \\
& Q_3(x_1, x_2) \geq Q_3^{\min}; \\
& Q_4(x_1, x_2) \geq Q_4^{\min}; \\
& D = \left\{ \begin{aligned}
& \varphi_1(x_1, x_2) \{ \geq, \leq, = \} b_1; \\
& \varphi_2(x_1, x_2) \{ \geq, \leq, = \} b_2; \\
& \dots \\
& \varphi_K(x_1, x_2) \{ \geq, \leq, = \} b_K,
\end{aligned} \right.
\end{aligned} \right. \\
& x_{1,2,\dots,n} \geq 0.
\end{aligned}$$

Данная интерпретация метода представлена на рисунке 1. Обозначим на рисунке 1 через $\mathbf{q}_i = \vec{q}_i(x_1, x_2)$ - направление вектора оптимизации для каждого

критерия, $i = 1, 2, 3, 4$, то есть направление, в котором данный критерий улучшается, через $Q_k(x_1, x_2) = Q_k^{min}$, $k=2, 3, 4$, обозначим границу области минимально допустимого значения критерия (противоположно вектору), жирная пунктирная линия ограничивает область D согласно (1), оптимальное решение задачи обозначено точкой $\bar{X}^* = (x_1^*, x_2^*)$.

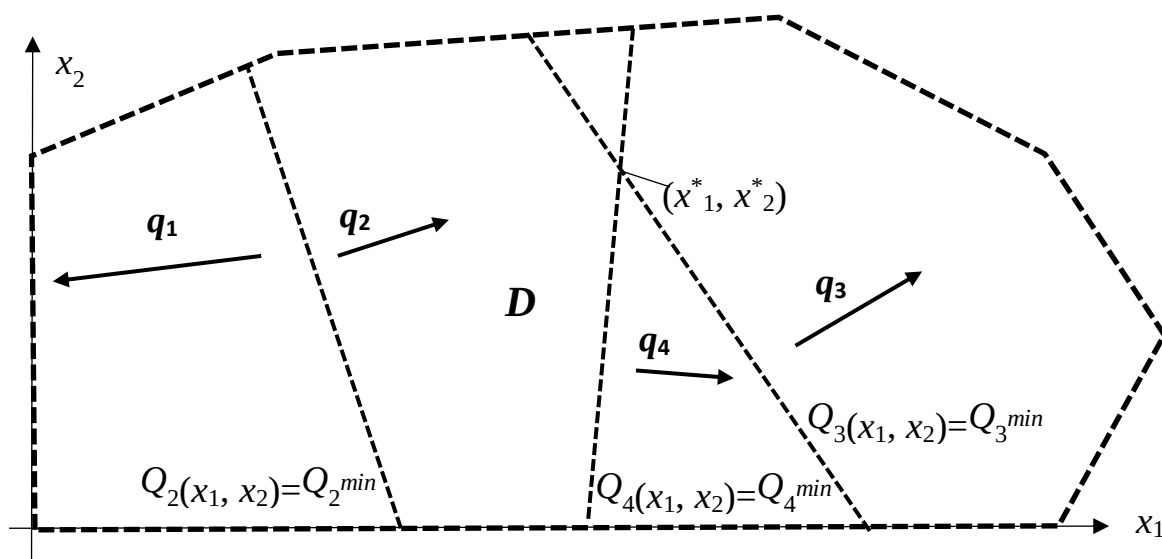


Рисунок 1 – Графическая интерпретация метода

Данный подход имеет достаточно высокую устойчивость к внешним воздействиям и низкую сложность организации численных расчетов. В качестве недостатка можно указать то, что предлагаемая модель не всегда позволяет найти абсолютно оптимальное решение по всем критериям, а лишь его некоторое приближение. Это связано с тем, что оптимизация проводится только по одному критерию, а по остальным осуществляется лишь контроль за нахождением на определенном уровне. Однако, данный недостаток можно устранить, если выделить несколько критериев и выполнять последовательную оптимизацию по каждому из них.

Выбор критериев

В данном разделе приведем описание рекомендуемых критериев или требований, которые чаще всего учитываются при разработке БПЛА FPV-типа. Они являются рекомендательными и влияют на производительность изделия, его функциональность и соответствие конкретным задачам, обеспечивают его безопасность, надежность и эффективность.

1. Назначение и применение – цели использования, необходимость в полезной нагрузке.

2. Размер и вес – габариты БПЛА, максимальная взлетная масса (определяет, сколько веса БПЛА может нести, включая полезную нагрузку).

3. Системы управления – тип контроллера полета, характеристики системы GPS для навигации, поддержка различных режимов полета (автономный, ручной, возврат на в место взлета и др.).

4. Системы связи – диапазон рабочих частот, дальность связи.

5. Камера и видеосистема – разрешение и качество камеры, угол обзора камеры, параметры передачи видео.

6. Аккумулятор и время полета – емкость аккумулятора, время полета на одной зарядке.

7. Скорость и маневренность.

8. Безопасность и надежность – дополнительные датчики и функции (барометр, гироскоп и др.).

9. Цена и доступность.

10. Качество компонентов.

Практическая реализация прототипа

Для практической реализации разработанной методики авторами совместно со специалистами ООО «Радиоизмерения» был разработан прототип, представляющий собой учебную платформу FPV-LAB, представленную на рисунке 2.



Рисунок 2 – Прототип базовой модели БпЛА

Основной идеей прототипа является возможность исследования радио и электротехнических процессов в БпЛА FPV-типа. Платформа позволяет осуществлять оперативную замену компонентов и как следствие быстро проводить анализ характеристик исследуемой конфигурации. Высокая оперативность изменения конфигурации достигается за счет использования «быстрых» контактов.

Выводы. Метод критериальных ограничений в задаче многокритериальной оптимизации для методики разработки БпЛА с заданными характеристиками позволяет получить из многокритериальной задачи однокритериальную, что позволяет использовать стандартные аналитические и численные методы поиска оптимальных решений. Однако такой особенностью обладают и другие методы

многокритериальной оптимизации, например метод обобщенной целевой функции, метод последовательных уступок и другие.

Использование именно метода критериальных ограничений прежде всего обусловлено тем, что он позволяет задавать жесткие ограничения по каждому критерию, отличающемуся от улучшаемого. Например, метод последовательных уступок решает подобную задачу, возможно более гибко, но он не позволяет гарантировать достижения заданных требований, просто оптимизируя их. В результате требования по критериям могут быть оптимальными, но ниже допустимых значений.

Также следует отметить то, что поставленные задачи и полученные решения наглядны и легко воспринимаются разработчиками изделий. Важным аргументом в выборе данного метода является гибкость метода и возможности быстрых изменений конфигурации изделия в зависимости от изменяющихся условий или ввода новых данных. Кроме этого, метод можно применять последовательно несколько раз, позволяя улучшать необходимые характеристики изделия за счет компромиссных решений при наличии конфликтующих критериев.

Созданный прототип позволяет проверить основные функциональные характеристики и работоспособность системы, выявить возможные ошибки и недочеты до начала его использования для требуемых задач.

Список источников

1. Ефремов И.С., Страхова А.О., Рыжкова Е.А. К вопросу о разработке конструкции беспилотного летательного аппарата мультироторного типа: сборник научных

трудов. - М.: Изд-во Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина, 2024. С. 179-186.

2. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90439>

3. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=26769>

4. Гоголев А.А. Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер // Труды МАИ. 2017. № 92. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=77238>

5. Трохов Д.А., Туркин И.К. К вопросу проектирования беспилотного летательного аппарата для решения разведывательных задач на море // Труды МАИ. 2014. № 78.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53735>

6. Гусейнова Р.О., Гумбатов Д.А. Оптимизация концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 136. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=180684>

7. Гусейнов О.А., Фатуллаев А.А. Вопросы проектирования узлов электропитания мультикоптеров // Труды МАИ. 2024. № 138. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=182666>

8. Зайцева Н.И., Погарская Т.А. Разработка программного комплекса для анализа и оптимизации сборочного процесса в авиастроении // Труды МАИ. 2011. № 124. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=167106>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-23)

9. Бодрышев А.В., Куприков М.Ю. Выбор компоновочного решения при отсутствии явного прототипа с применением коэффициента конкордации // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26805>
10. Гусейнов А.Б. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=28120>
11. Ильин В.Н., Лепехин А.В. Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26008>
12. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: учебное пособие для радиотехнических вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
13. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Советское радио, 1975. – 367 с.
14. Ананьев А.В., Змий Б.Ф., Кащенко Г.А. Модернизация бортовых приемопередающих систем беспилотных летательных аппаратов на основе эволюционного подхода // Радиотехника. 2016. № 8. С. 46–49.
15. Kuzmenko R.V., Moiseev S.I., Stepanov L.V., Sysoeva T.P., Lukin A.N. Modeling the Solution of some Management Problems Using Latent Variables // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1902, P. 012076. DOI: [10.1088/1742-6596/1902/1/012076](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012076)
16. Маслак А.А., Моисеев С.И., Осипов С.А. Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 58-66.

17. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
18. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 250 с.
19. Азарнова Т.В., Баркалов С.А., Бондаренко Ю.В. и др. Математические методы принятия решений. Классические подходы и их развитие: монография. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. - 205 с.
20. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 124 с.
21. Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. – М.: Наука, 1986. – 140 с.

References

1. Efremov I.S., Strakhova A.O., Ryzhkova E.A. *K voprosu o razrabotke konstruksii bespilotnogo letatel'nogo apparata mul'tirotnogo tipa* (On the Development of the Design of Multicopter-Type Unmanned Aerial Vehicles): *sbornik nauchnykh trudov*. Moscow: Izd-vo Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.N. Kosygina Publ., 2024. P. 179-186.
2. Ronzhin A.L., Nguen V.V., Solenaya O.Ya. Analysis of the problems of unmanned flying manipulators development and UAV physical interaction with ground objects. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90439>
3. Karimov A.KH. Design features of new generation unmanned aerial vehicles (UAVs). *Trudy MAI*. 2011. No. 47. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26769>

4. Gogolev A.A. Semi-natural modelling of unmanned aerial vehicles like multicopter. *Trudy MAI*. 2017. No. 92. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77238>
5. Trokhov D.A., Turkin I.K. On unmanned aircraft for reconnaissance missions performance upon the sea design procedure. *Trudy MAI*. 2014. No. 78. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53735>
6. Guseinova R.O., Gumbatov D.A. Optimization of the conceptual development of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180684>
7. Guseinov O.A., Fatullaev A.A. Issues of designing power supply units for multicopters. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182666>
8. Zaitseva N.I., Pogarskaya T.A. Development of software complex for analysis and optimization of the aircraft assembly process. *Trudy MAI*. 2011. No. 124. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167106>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-23)
9. Bodryshev A.V., Kuprikov M.Yu. Choice of the layout decision in the absence of an obvious prototype with factor application konkordacii. *Trudy MAI*. 2011. No. 47. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26805>
10. Guseinov A.B. Methods of structural and parametric synthesis of structural and layout image UAV. *Trudy MAI*. 2011. No. 49. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28120>
11. Il'in V.N., Lepekhin A.V. Technology of automation of structurally-parametrical synthesis on the basis of a method of a morphological box. *Trudy MAI*. 2011. No. 46. (In

Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26008>

12. Gutkin L.S. *Proektirovanie radiosistem i radioustroystv: uchebnoe posobie dlya radiotekhnicheskikh vuzov* (Design of Radio Systems and Radio Devices: A Textbook for Radio Engineering Universities). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1986. 288 p.
13. Gutkin L.S. *Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva* (Optimization of Radioelectronic Devices Based on a Set of Quality Indicators). Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1975. 367 p.
14. Anan'ev A.V., Zmii B.F., Kashchenko G.A. Modernization of Onboard Transceiver Systems for Unmanned Aerial Vehicles Based on an Evolutionary Approach. *Radiotekhnika*. 2016. No. 8. P. 46–49. (In Russ.)
15. Kuzmenko R.V., Moiseev S.I., Stepanov L.V., Sysoeva T.P., Lukin A.N. Modeling the Solution of some Management Problems Using Latent Variables. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1902, P. 012076. DOI: [10.1088/1742-6596/1902/1/012076](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012076)
16. Maslak A.A., Moiseev S.I., Osipov S.A. Comparative Analysis of Parameter Estimates of the Rasch Model Obtained by Maximum Likelihood and Least Squares Methods. *Problemy upravleniya*. 2015. No. 5. P. 58-66. (In Russ.)
17. Shtoiar R. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya: teoriya, vychisleniya i prilozheniya* (Multi-Criteria Optimization: Theory, Computations, and Applications). Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1992. 504 p.
18. Podinovskii V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* (Pareto-optimal solutions of multi-criteria problems). Moscow: Nauka Publ., 1982. 250 p.
19. Azarnova T.V., Barkalov S.A., Bondarenko Yu.V. et al. *Matematicheskie metody*

prinyatiya reshenii. Klassicheskie podkhody i ikh razvitie: monografiya (Mathematical Methods for Decision Making. Classical Approaches and Their Development: monograph). Rostov-na-Donu: DGTU Publ., 2024. 205 p.

20. Khomenyuk V.V. *Elementy teorii mnogotsелеvoi optimizatsii* (Elements of multi-objective optimization theory). Moscow: Nauka Publ., 1983. 124 p.

21. Mashunin Yu.K. *Metody i modeli vektornoй optimizatsii* (Methods and models of vector optimization). Moscow: Nauka Publ., 1986. 140 p.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025

Одобрена после рецензирования 28.02.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 14.02.2025; approved after reviewing on 28.02.2025; accepted for publication on 25.06.2025