



Научная статья / Original Article

УДК 621.397.442

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188120>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WNAOOR>

МЕТОДИКА РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ ДЛЯ БПЛА FPV-ТИПА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЛАТЕНТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

А.В. Ананьев^{1,2}, Н.Ф. Кузьяров²✉, С.И. Моисеев³, С.П. Пилкин⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,
г. Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных Сил «Военно-Воздушная Академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

⁴Акционерное общество «Эремекс», г. Москва, Россия

✉ Kuziyarov@mail.ru

Цитирование: Ананьев А.В., Кузьяров Н.Ф., Моисеев С.И., Пилкин С.П. Методика рационального выбора винтомоторной группы для бпла fpv-типа на основе теории латентных переменных // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188120>

Аннотация. Винтомоторная группа является базовой составляющей и важным функциональным компонентом беспилотного летательного аппарата FPV-типа, в связи с чем ее рациональный выбор при конструировании весьма актуален. В статье проведен анализ существующих подходов к выбору ВМГ для БПЛА мультироторного типа. По результатам проведенного анализа установлено, что выбор варианта исполнения винтомоторной группы затруднен проблемой разрешения совокупности противоречий между их отдельными техническими характеристиками. Для разрешения совокупности противоречивых требований, в статье предложено использовать метод латентных переменных. Метод латентных переменных позволяет оперативно оценивать альтернативы при выборе

беспилотного летательного аппарата по качественным критериям и имеет ряд преимуществ перед другими методами экспертного оценивания, что позволяет его использовать на практике при многокритериальном анализе технических решений на начальных этапах конструирования.

Авторы подчеркнули важность рационального выбора винтомоторной группы для обеспечения требуемой скорости, времени полета и способности обеспечить подъем необходимой целевой нагрузки. Осуществлен анализ каждого параметра винтомоторной группы методом анализа иерархий и методом латентных переменных, перечислены преимущества и недостатки данных методов.

Ключевые слова: винтомоторная группа; экспертное оценивание; метод парных сравнений; латентные переменные; параметры выбора винтомоторной группы.

METHODOLOGY FOR THE RATIONAL SELECTION OF A PROPELLER-MOTOR GROUP FOR FPV-TYPE UAV BASED ON LATENT VARIABLE THEORY

A.V. Ananjev^{1,2}, N.F. Kuziyarov²✉, S.I. Moiseev³, S.P. Pilkin⁴

¹Plekhanov Russian University of Economics, Voronezh, Russia

² MERC Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

³Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

⁴ Joint-stock company «EREMEX», Moscow, Russia

✉ Kuziyarov@mail.ru

Citation: Ananjev A.V., Kuziyarov N.F., Moiseev S.I., Pilkin S.P. Methodology for the rational selection of a propeller-motor group for fpv-type uav based on latent variable theory // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188120>

Abstract. The propeller-motor group is a fundamental component and an important functional element of FPV-type unmanned aerial vehicles making its rational selection during the design process highly relevant. The article analyzes existing approaches to the selection of propeller-motor group for multicopter unmanned aerial vehicles. Based on the results of the analysis, it was found that the choice of the propeller-motor group design option is complicated by the problem of resolving a set of contradictions between their

individual technical characteristics. To resolve a set of contradictory requirements, the article suggests using the latent variables method. The latent variable method allows you to quickly evaluate alternatives when choosing a unmanned aerial vehicles according to qualitative criteria and has many advantages over other expert assessment methods, which allows it to be used in practice in a multi-criteria analysis of technical solutions at the initial stages of design. The authors emphasized the importance of rationally selecting the propeller-motor group to ensure the required speed, flight time, and the ability to carry the necessary payload.

The analysis of each propeller-motor group parameter is carried out using the hierarchy analysis method and the latent variable method, and the advantages and disadvantages of these methods are listed.

The results of the research will help users of unmanned aerial vehicles make more rational decisions regarding the propulsion system, which, in turn, will enhance the efficiency and safety of unmanned aerial vehicles usage across various fields. By providing a structured approach to selecting the necessary equipment, users can ensure better performance and reliability in their operations. This thoughtful selection process is crucial for maximizing the potential of unmanned aerial vehicles technology.

Keywords: propulsion system; expert evaluation; pairwise comparison method; latent variables; selection parameters for the propulsion system.

Введение

В настоящее время наблюдается значительное увеличение интереса к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) FPV-типа, используемым в различных целях. Как правило, БПЛА FPV-типа поставляются в готовых сборках, так называемых Kit-комплектах (наборах), которые в зависимости от комплектации могут включать БПЛА в сборе частично или полностью, пульт управления, FPV-очки и дополнительные элементы, например, аккумуляторы и зарядные устройства. Комплектуя Kit-набор, производители ориентируются на собственное производство, а именно на выгодную и доступную для предприятия элементную базу, контрагентов-разработчиков оборудования и организации-партнеры по бизнесу, что зачастую ведет к некоторому усреднению и снижению

характеристик БПЛА в избранном форм-факторе.

В то же время современный рынок продажи в розницу функциональных узлов БПЛА FPV-типа позволяет осуществлять самостоятельные сборки. Самостоятельная сборка открывает возможность выбора отдельных устройств и функциональных узлов из состава БПЛА FPV-типа. Для того, чтобы получить эффект повышения технических показателей БПЛА при самостоятельной сборке необходимо объективно выбрать из существующего ряда вариантов исполнения наиболее рациональную альтернативу.

Так, например, одним из ключевых функциональных узлов БПЛА, является винтомоторная группа (ВМГ), которая обеспечивает необходимую подъемную силу, включая вес самого БПЛА. ВМГ включает в себя моторы и воздушные винты (пропеллеры). Моторы преобразуют электрическую энергию в механическую, а пропеллеры приводятся в движение с помощью моторов и создают подъемную силу.

Проведенный анализ существующих подходов к выбору ВМГ для БПЛА мультироторного типа показал следующее. Существуют работы [1-3] в которых в общих чертах описана разработка конструкции БПЛА мультироторного типа. Следует отметить, что в данных источниках [1-3] проведены качественные рассуждения, в то время как для выбора наилучшей альтернативы представляет интерес получения количественных оценок. Также рассмотрены исследования, в которых используется морфологический анализ компоновки технических устройств [4-9].

В свою очередь выбор ВМГ сопряжен с разрешением многокритериального противоречия группы показателей. В этом случае с позиций системного подхода наиболее объективен многокритериальный анализ. В отечественной практике основоположником многокритериального анализа радиотехнических систем различных классов можно считать Гуткина Льва Соломоновича [10, 11]. Однако, в настоящее время известны существенно упрощенные подходы к рациональному выбору технических решений [12], которые представляет интерес, и имеется возможность их применения для выбора ВМГ БПЛА FPV-типа, что и является целью статьи. Глобально в БПЛА мультироторного типа два вида моторов:

коллекторные и бесщеточные (бесколлекторные), достоинства и недостатки которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Достоинства и недостатки коллекторных и бесщеточных моторов

Вид моторов	Коллекторные	Бесщеточные (бесколлекторные)
Достоинства	доступность; простота конструкции; высокий крутящий момент; регулировка скорости в широком диапазоне; невысокие пусковая и пиковая нагрузки	регулировка скорости в широком диапазоне; высокая перегрузочная способность; надежность и повышенный ресурс работы; высокая мощность; простота настройки; меньший вес
Недостатки	громкий звук работы; необходимость частого обслуживания (износ щеток)	сложная система управления двигателем; высокая стоимость

Ключевым фактором, приведенным в таблице 1, является надежность, тишина работы двигателей и более высокая мощность, что обеспечит более высокие характеристики конструируемому БПЛА. В связи с этим для самостоятельной сборки далее ограничимся рассмотрением бесщеточных ВМГ.

Рассмотрим основные параметры, которые учитываются при выборе этого важного компонента для БПЛА FPV-типа:

1. Крутящий момент, кВ;
2. Тяга (грузоподъемность), г;
3. Мощность, Вт;
4. Вес мотора, г;
5. Размеры, мм;
6. Рекомендуемый регулятор оборотов, А;
7. Рекомендуемое напряжение, В;
8. Стоимость, руб.

По результатам формирования и усечения выборки ВМГ (по показателю тяга), находящихся в свободной продаже, сформирована таблица 2.

Перечень оставшихся ВМГ

Название	Крутящий момент	Тяга	Мощность	Вес одного мотора	Размеры (ш×в)	Рек. регулятор оборотов	Рек. напряжение	Стоимость (1 шт)
BrotherHobby Tornado T5 Pro 480KV	480	3413	728	110	31×15	50	25	4000
Flash Hobby A3115 900KV	900	4080	1592	113	31×15	70	25	5800
SURPASS HOBBY Bat B3115 900KV	900	3218	1005	112	31×15	40	20	2100
BrotherHobby Tornado T5 Pro 1050KV	1050	4449	1698	110	31×15	80	25	4000
GWRC 3115 900KV	900	3398	1312	112	31×15	60	20	2400

Известно [13], что для наиболее эффективного экспертного оценивания рационально использовать методы парных сравнений. Наиболее популярным среди указанных методов является метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати [14], который достаточно простой в реализации, но имеет ряд недостатков, которые будут перечислены ниже. С учетом важности поставленной проблемы оценивания ВМГ для БПЛА, было принято решение использовать более совершенную модель на классе методов парных сравнений, которая дает возможность получить более точные итоговые оценки ВМГ. В то же время в работе будут приведены также расчеты и итоговые оценки по МАИ, а точнее с использованием модификации этого метода – мультипликативного МАИ [15].

Для построения графиков и таблиц, введем обозначения выбранных ранее критериев:

K1 – крутящий момент, K2 – тяга, K3 – мощность, K4 – рекомендуемый регулятор оборотов, K5 – рекомендуемое напряжение, K6 – стоимость.

Также введем обозначения альтернатив (ВМГ БПЛА):

A1 – BrotherHobby Tornado T5 Pro 480KV, A2 – Flash Hobby A3115 900KV, A3 – SURPASS HOBBY Bat B3115 900KV, A4 – BrotherHobby Tornado T5 Pro 1050KV, A5 –

Прежде чем приступим к экспертному оцениванию ВМГ БпЛА на основе методов парных сравнений, приведем теоретические основы указанных методов. МАИ широко описан в литературе [13-19], поэтому приведем только его основные недостатки:

1. Вербальная шкала сравнения ВМГ БпЛА (она указана в таблице 2), является субъективной, которая может по-разному интерпретироваться разными экспертами, что приводит к тому, что результаты экспертизы сильно зависят от индивидуальных особенностей экспертов.

2. Рассчитанные итоговые оценки не являются линейными, в частности, если один из объектов сравнения в паре в определенное число раз лучше другого объекта, то итоговое отношение оценок не укажет превосходства в это же число раз.

3. На рассчитанные интегральные оценки сравнения ВМГ БпЛА сильно влияет согласованность и качество оценок других ВМГ.

В какой-то мере сглаживает указанные недостатки иная модель оценивания привлекательности альтернатив по методике парных сравнений. Она основана на теории латентных переменных и базируется на модели Раша оценки латентных переменных, основанных на методе наименьших квадратов [20-24].

Модель оценивания ВМГ БпЛА по методу латентных переменных (МЛП), по своей сути похожа на МАИ, но отличается от него шкалой, используемой при парных сравнениях и порядком вычисления ненормированных весов ВМГ БпЛА. Данные различия позволяют повысить качество получаемых оценок.

В качестве результата парного сравнения двух ВМГ, согласно МЛП определяется некоторый вероятностный показатель p'_{ij} , $i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, N$, где N – число сравниваемых ВМГ, имеющий смысл вероятности выбора одной ВМГ для БпЛА по сравнению с другим с точки зрения каждого критерия. Иными словами, если первая в паре сравнений ВМГ на 70 % менее предпочтительный по критерию, чем вторая, то этот показатель для данной пары составит 0,7. В вероятностной интерпретации результатов сравнения в каждой паре, для ВМГ, равных по некоторому критерию, эту вероятность следует считать $p'_{ij} = 0,5$, а также в любой

паре сравниваемых ВМГ будут справедливы соотношения: $p'_{ij} = 1 - p'_{ji}$; $p'_{ii} = 0,5$.

Кроме того, так же как для МАИ можно использовать шкалу относительной разницы оценок по критерию для двух ВМГ БПЛА в каждой сравниваемой паре. Соответствие шкал МАИ и МЛП приведено в таблице 3 [25].

Таблица 3

Соответствие шкал превосходства первой ВМГ БПЛА над второй при методах парных сравнений

Уровень превосходства первой ВМГ над второй	Параметр относительной важности для МАИ	Вероятность p'_{ij} для МЛП
Одинаковая оценка	1	0,5
Очень слабое превосходство	2	0,55
Слабое превосходство	3	0,6
Небольшое превосходство	4	0,65
Умеренное превосходство	5	0,7
Значительное превосходство	6	0,75
Значительное превосходство	7	0,8
Большое превосходство	8	0,85
Очень большое превосходство	9	0,9
Однозначное превосходство	10	1

Для вычисления итоговых оценок предпочтения ВМГ для БПЛА в каждой сравниваемой паре, введем некоторое множество латентных переменных: β_i , $i=1, 2, \dots, N$, которое представляет собой интегральные оценки степени предпочтения i -ой ВМГ для БПЛА и несут такой же смысл, как и значения собственного вектора, определяемого в МАИ.

Согласно [25, 26] вероятность P_{ij} того, что ВМГ A_i , имеющая оценку предпочтения по критерию β_i , при сравнении имеет большую степень, чем ВМГ A_j , имеющая оценку степени предпочтения по критерию β_j , будет равна

$$P_{ij} = \frac{e^{\beta_i - \beta_j}}{1 + e^{\beta_i - \beta_j}}. \quad (1)$$

Согласно [22], для получения значений латентных показателей β_i необходимо решать нелинейную оптимизационную задачу вида:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(p'_{ij} - \frac{e^{\beta_i - \beta_j}}{1 + e^{\beta_i - \beta_j}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

и условиями нормировки

$$\beta_i \geq 0. \quad (3)$$

На заключительном этапе необходимо провести нормирование рассчитанных латентных переменных β_i на суммарную единицу, так же как это принято и в МАИ. Данные оценки будут обладать следующими преимуществами, по сравнению с аналогичными оценками, полученными по МАИ [26]:

итоговые оценки β_i ВМГ для БЛА являются уникальными характеристиками данного признака и не зависят от их количества, а также от индивидуальных особенностей экспертов;

оценки ВМГ для БЛА измеряются по линейной и безразмерной шкале, которую можно преобразовать с помощью линейных преобразований в любую другую оценочную шкалу;

МЛП нивелирует возможные ошибки эксперта при выставлении степеней превосходства в каждой паре, в частности, несогласованность частных оценок.

В соответствии с описанной выше методикой, приведем оценки весов критериев и выбранных ВМГ для БЛА по МЛП, а также покажем аналогичные оценки по МАИ. Экспертизу проводила группа экспертов, включающих инженеров по конструированию.

Результаты экспертного оценивания для сравнения критериев приведены в таблице 4 и на рисунке 1.

Таблица 4

Сравнение весов показателей (критериев)

Критерий	Метод латентных переменных							Метод анализа иерархий						
	К1	К2	К3	К4	К5	К6	Оценка	К1	К2	К3	К4	К5	К6	Оценка
К1	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,254	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,381
К2	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,219	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,252
К3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,184	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,160
К4	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,149	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,101
К5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,115	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,064
К6	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,079	0,17	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,043

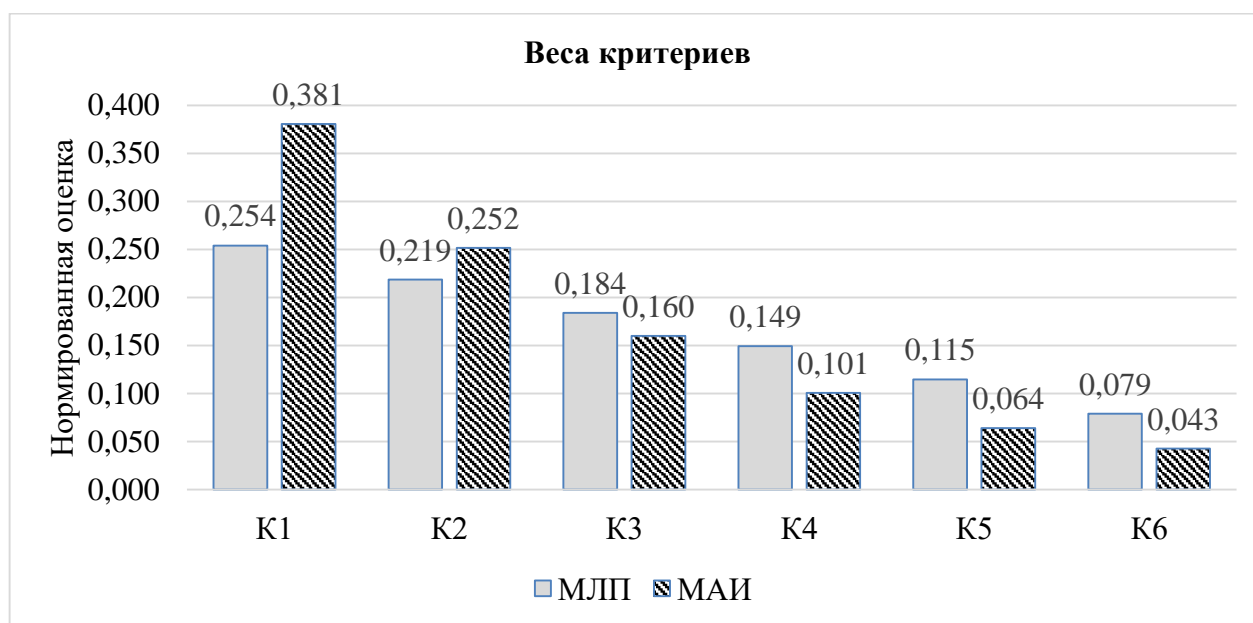


Рисунок 1 – Веса критериев, полученные разными методами

В ходе ранжирования (таблица 4) осуществлялся контроль качества принятых сравнений по основным показателям, принявшим следующие значения: собственное число $L_{\max} = 6,126$; индекс согласованности: $ИС = 0,025$; отношение согласованности $ОС = 2,027$. Полученные значения свидетельствуют о качественном и согласованном парном сравнении.

Как видно из таблицы 4 и рисунка 1, для рассматриваемого случая, а именно для БПЛА FPV-типа, предназначенного под целевую нагрузку, необходима в первую очередь тяга (грузоподъемность) – K1. Таким образом, тяга в нем имеет максимальную значимость относительно других критериев.

В результате присвоения значимостей и последующего сравнения, показатели (критерии) расположились следующим образом (в порядке убывания) как для МЛП, так и для МАИ:

1. Тяга;
2. Крутящий момент;
3. Мощность;
4. Рекомендуемый регулятор оборотов;
5. Рекомендуемое напряжение;
6. Стоимость.

Реализуя МЛП, проведем сравнения всех альтернатив по всей совокупности избранных показателей (критериев). В качестве примера в таблице 5 и на рисунке

2 приведены результаты экспертного оценивания для сравнения по критерию «тяга».

Таблица 5

Сравнение ВМГ по критерию «Тяга»

Альтернативы	Метод латентных переменных						Метод анализа иерархий					
	A1	A2	A3	A4	A5	Оценка	A1	A2	A3	A4	A5	Оценка
A1	0,5	0,45	0,6	0,4	0,55	0,175	1	0,5	3	0,33	2	0,160
A2	0,55	0,5	0,65	0,45	0,6	0,220	2	1	4	0,5	3	0,264
A3	0,7	0,35	0,5	0,3	0,45	0,144	0,33	0,25	1	0,2	0,5	0,061
A4	0,6	0,55	0,7	0,5	0,65	0,282	3	2	5	1	4	0,418
A5	0,45	0,65	0,55	0,35	0,5	0,180	0,5	0,33	2	0,25	1	0,097

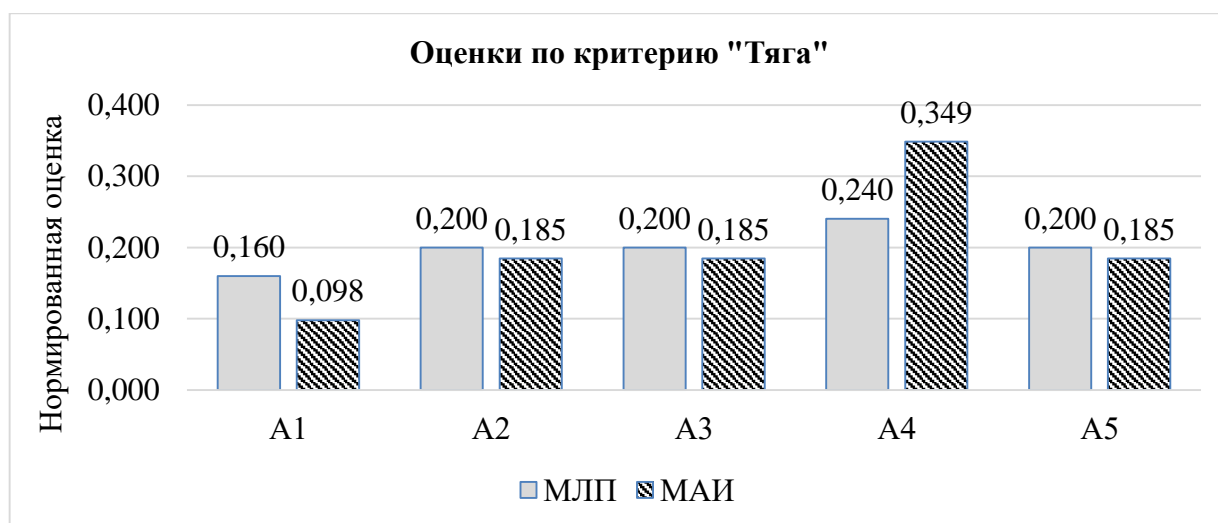


Рисунок 2 – Оценки передатчиков по критерию «Тяга», полученные разными методами

Показатели согласованности мнений эксперта для МАИ составили: собственное число $L_{\max} = 5,069$; индекс согласованности: $ИС = 0,017$; отношение согласованности $ОС = 0,551$.

На основании приведенных выше данных, рассчитаем итоговые показатели результатов оценивания ВМГ для БЛА, полученные по МЛП и МАИ. Окончательные результаты оценивания приведены в таблице 6 и на рисунке 3.

Таблица 6

Итоговые оценки ВМГ по всем критериям, рассчитанные разными методами

Альтернативы	Метод латентных переменных							Метод анализа иерархий						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Итог	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Итог
A1	0,175	0,160	0,117	0,159	0,184	0,184	0,160	0,160	0,097	0,062	0,097	0,143	0,137	0,120
A2	0,220	0,200	0,241	0,241	0,184	0,143	0,212	0,263	0,185	0,263	0,263	0,143	0,079	0,228
A3	0,144	0,200	0,159	0,117	0,224	0,265	0,174	0,062	0,185	0,097	0,062	0,286	0,402	0,127
A4	0,282	0,240	0,283	0,283	0,224	0,184	0,259	0,417	0,349	0,417	0,417	0,286	0,137	0,380
A5	0,180	0,200	0,200	0,200	0,184	0,224	0,195	0,097	0,185	0,160	0,160	0,143	0,245	0,145

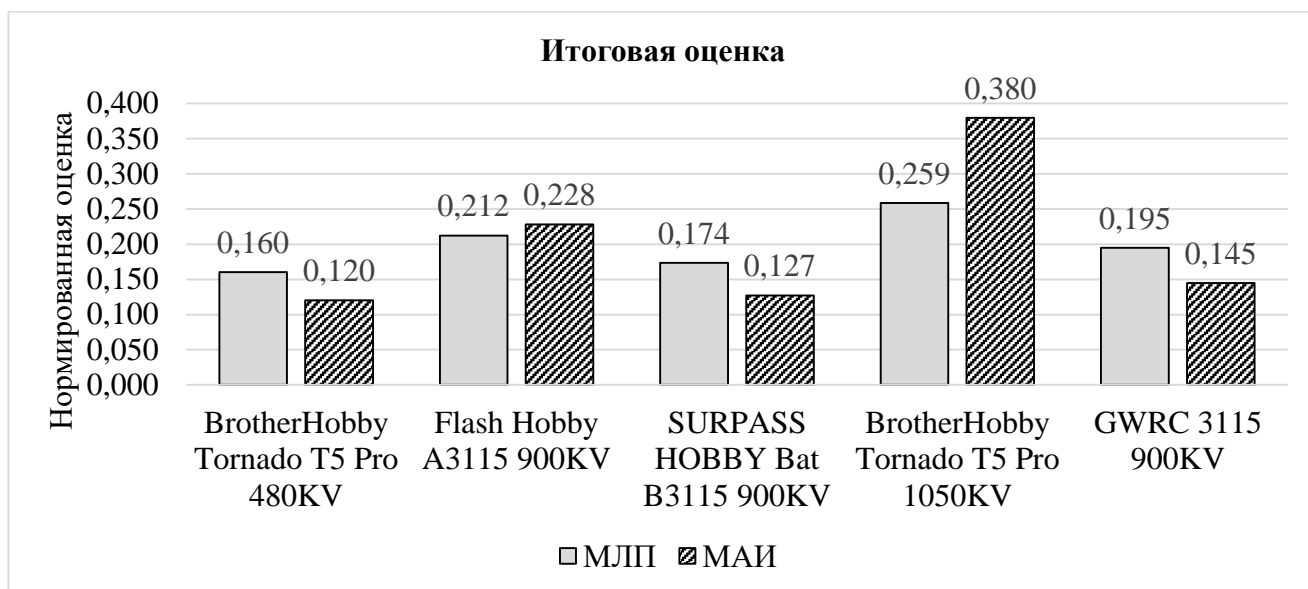


Рисунок 3 – Итоговые оценки ВМГ, полученные разными методами

После сравнения ВМГ по всем показателям (критериям) и согласно значениям векторов приоритета, получаем самые подходящие ВМГ в порядке убывания:

1. BrotherHobby Tornado T5 Pro 1050KV;
2. Flash Hobby A3115 900KV;
3. GWRC 3115 900KV;
4. SURPASS HOBBY Bat B3115 900KV;
5. BrotherHobby Tornado T5 Pro 480KV.

Выводы

В результате проведенного анализа существующих ВМГ на рынке, определения основных параметров, которые необходимо учитывать при выборе, мы определили наилучший вариант ВМГ для БПЛА FPV-типа по избранным критериям.

Как видно из таблицы 6 и рисунка 3, итоговые показатели ВМГ по разным методам имеют одно и то же ранжирование, хотя их значения отличаются, и в некоторых случаях довольно значительно. Коэффициент корреляции между оценками, полученными разными методами, составляет 0,969. Это позволяет сделать следующие выводы, касающиеся методики применения предлагаемого МЛП [27]:

1. ввиду высокой корреляции результатов по сравнению с апробированным

и надежным МАИ, можно сказать, что МЛП дает адекватные результаты, которые можно применять в практической деятельности;

2. МЛП рационально использовать для решения задач подобного рода ввиду того, что он уточняет оценки альтернатив, полученные по МАИ хотя бы в том, что позволяет использовать более объективную оценку альтернатив при парном сравнении, используя наглядную и физически обоснованную вероятностную шкалу, не отменяя лингвистическую шкалу, применяемую при МАИ;

3. предложенный метод оценивания альтернатив позволяет получать оценки альтернатив по линейной шкале, что дает важные преимущества при их дальнейшей обработке;

4. МЛП в какой-то степени нивелирует несогласованность экспертного мнения, что следует из работ [25-27], в то время как для МАИ она может привести к значительному смещению результатов оценивания.

Если говорить относительно области применения экспертных методов для рационального выбора винтомоторной группы БпЛА FPV-типа, то следует отметить, что экспертные методы рационально применять на начальных этапах конструирования и в тех случаях, когда критерии оценивания качественные и нет возможности получения объективных количественных оценок по критериям. Кроме этого, экспертные методы обеспечивают формирование начального представления о принимаемом решении, которое в дальнейшем может быть скорректировано на основании дополнительных критериев и требований в результате групповых консультаций и обсуждений.

Заключение

Разработанная методика выбора ВМГ на основе теории латентных переменных показала свою высокую эффективность. В результате исследования были выявлены ключевые характеристики, значимо влияющие на выбор ВМГ, такие как крутящий момент, тяга, мощность, вес, размеры, рекомендуемый регулятор оборотов, рекомендуемое напряжение и стоимость. Методика может быть успешно применена не только для выбора ВМГ, но и для оптимизации других компонентов БпЛА, что сильно повысит общую эффективность систем передачи данных и управления БпЛА.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

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 кафедры автоматки и промышленной электроники Российского государственного университета им. А.Н. Косыгина. Москва, 2024. С. 179-186.

2. Петров Г.М., Тарасов Н.В. Аппаратные компоненты для передачи информационных потоков беспилотных систем // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Сборник статей VI Международного форума. Санкт-Петербург, 2024. С. 191-192.

3. Забеньков И.И., Апанасян М.И. Моделирование цифровой радиосистемы передачи видеоданных с беспилотного летательного аппарата // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2011. № 6 (60). С. 74-78.

4. Гоголев А.А. Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: www.mai.ru/science/trudy/

5. Гусейнова Р.О., Гумбатов Д.А. Оптимизация концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: www.mai.ru/science/trudy/

6. Зайцева Н.И., Погарская Т.А. Разработка программного комплекса для анализа и оптимизации сборочного процесса в авиастроении // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: www.mai.ru/science/trudy/

7. Бодрышев А.В., Куприков М.Ю. Выбор компоновочного решения при отсутствии явного прототипа с применением коэффициента конкордации // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: www.mai.ru/science/trudy/

8. Гусейнов А.Б. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивно-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: www.mai.ru/science/trudy/
9. Ильин В.Н., Лепехин А.В. Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: www.mai.ru/science/trudy/
10. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: учебное пособие для радиотехнических вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.: ил.; 22.
11. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – Москва: Сов. радио, 1975. – 367 с.: граф.; 22.
12. Ананьев А.В., Змий Б.Ф., Кащенко Г.А. Модернизация бортовых приемо-передающих систем беспилотных летательных аппаратов на основе эволюционного подхода // Радиотехника, 2016. – № 8. – С. 46–49.
13. Гуцыкова С.В. Метод экспертных оценок. Теория и практика. - М.: Когито-Центр, 2011. - 888 с.
14. Саати Т., Кернс К.М. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. / М.: Радио и связь. 1991. 224 с.
15. Lootsma, F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // F.A. Lootsma. -J. Multi-Criteria Decision Analysis. V.2, 1993.
16. Ниу Х., Корчагина Е.В. Economic efficiency of digital technology application in energy companies: an analysis based on the analytic hierarchy process // Research Result. Business and Service Technologies. 2024. Т. 10. № 2. С. 175-184.
17. Поспехов Г.Б., Савон Ю., Мосекин В.В. Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process: a case study of Guantanamo province // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2024. № 1. С. 125-145.
18. Крайняк М. Analytic hierarchy process in Czech taxpayers' decision-making regarding their tax liability // Journal of Tax Reform. 2020. Т. 6. № 2. С. 142-156.
19. Клименко И.С. The method of hierarchy analysis in modeling the strategy of formation of innovative potential // Modern Science and Innovations. 2024. № 2 (46). С. 17-25.

20. Маслак А.А., Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства. Монография // Воронеж: НПЦ «Научная книга», 2016. – 177 с.
21. Моисеев С.И., Киреев Ю.В., Гончаров С.В. Модель оценки латентных переменных с непрерывными множествами исходных данных и ее приложения // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3.1. С. 161-167.
22. Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных, основанная на методе наименьших квадратов // Экономика и менеджмент систем управления. 2015. № 2.1 (16). С. 166-172.
23. Маслак А.А. Investigation of measurement precision of latent variables depending on the noise test results // В сборнике: Society, integration, education. Proceedings of the International Scientific Conference. Rezekne Academy of Technology zglitibas, valodu un dizaina fakultate. 2019. С. 422-429.
24. Маслак А.А. Measurement of latent variable «creative self-efficacy» of students of chapter of Kuban State University at Slavyansk-on-Kuban // Journal Plus Education. 2019. Т. 24. С. 62-66.
25. Баркалов С.А., Карпович М.А., Моисеев С.И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22. № 2. С. 58-66.
26. Ананьев А.В., Иванников К.С., Моисеев С.И. Применение теории латентных переменных для анализа элементного базиса устройств обработки сигналов на основе метода парных сравнений // Системы управления и информационные технологии. 2022. № 3 (89). С. 35-38.
27. 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.

References

1. Efremov I.S., Strahova A.O., Ryzhkova E.A. *On the Development of the Design of Multirotor-Type Unmanned Aerial Vehicles*, Sbornik nauchnyh trudov kafedry avtomatiki i promyshlennoj jelektroniki Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta im.

A.N. Kosygina. Moskva, 2024, pp. 179-186.

2. Petrov G.M., Tarasov N.V. *Hardware Components for Transmitting Information Streams of Unmanned Systems*, Metrologicheskoe obespechenie innovacionnyh tehnologij. Sbornik statej VI Mezhdunarodnogo foruma, Sankt-Peterburg, 2024, pp. 191-192.
3. Zaben'kov I.I., Apanasjan M.I. *Modeling a Digital Radio System for Transmitting Video Data from Unmanned Aerial Vehicles*, Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki, 2011, № 6 (60), pp. 74-78.
4. Gogolev A.A. *Semi-Natural Simulation of Multicopter-Type Unmanned Aerial Vehicles*, Trudy MAI, 2017, № 92, at: www.mai.ru/science/trudy/
5. Gusejnova R.O., Gumbatov D.A. *Optimization of the conceptual design of unmanned aerial vehicles*, Trudy MAI, 2024, № 136, at: www.mai.ru/science/trudy/
6. Zajceva N.I., Pogarskaja T.A. *Development of a Software Suite for Analyzing and Optimizing the Assembly Process in Aerospace Engineering*, Trudy MAI, 2011, № 47, at: www.mai.ru/science/trudy/
7. Bodryshev A.V., Kuprikov M.Ju. *Selection of layout solutions in the absence of a clear prototype using the concordance coefficient*, Trudy MAI, 2011, № 47, at: www.mai.ru/science/trudy/
8. Gusejnov A.B. *Methodology for structural-parametric synthesis of the design layout of an unmanned aerial vehicle*, Trudy MAI, 2011, № 49. at: www.mai.ru/science/trudy/
9. Il'in V.N., Lepehin A.V. *Technology for automating structural-parametric synthesis based on the morphological box method*, Trudy MAI, 2011, № 46. at: www.mai.ru/science/trudy/
10. Gutkin L.S. *Design of Radio Systems and Radio Devices: A Textbook for Radio Engineering Universities*, M.: Radio i svjaz', 1986, pp. 288: il.; 22.
11. Gutkin L.S. *Optimization of Radioelectronic Devices Based on a Set of Quality Indicators*, Moskva: Sov. radio, 1975, pp. 367: graf.; 22.
12. Anan'ev A.V., Zmij B.F., Kashhenko G.A. *Modernization of Onboard Transceiver Systems for Unmanned Aerial Vehicles Based on an Evolutionary Approach*, Radiotekhnika, 2016, № 8, pp. 46-49, at: <https://mydrone.ru/fpv->

13. Gucykova S.V. *Expert Evaluation Method*. Teorija i praktika, M.: Kogito-Centr, 2011, pp. 888.
14. Saati T., Kerns K.M. *Analytical Planning. System Organization*. Organizacija sistem: Per. s angl., M.: Radio i svjaz', 1991, pp. 224.
15. Lootsma, F.A. *Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART*, F.A. Lootsma. -J. Multi-Criteria Decision Analysis, V.2, 1993.
16. Niu H., Korchagina E.V. *Economic efficiency of digital technology application in energy companies: an analysis based on the analytic hierarchy process*, Research Result. Business and Service Technologies, 2024, T. 10, № 2, pp. 175-184.
17. Posphehov G.B., Savon Ju., Mosekin V.V. *Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process: a case study of Guantanamo province*, Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal), 2024, № 1, pp. 125-145.
18. Krajnjak M. *Analytic hierarchy process in Czech taxpayers' decision-making regarding their tax liability*, Journal of Tax Reform, 2020, T. 6, № 2, pp. 142-156.
19. Klimenko I.S. *The method of hierarchy analysis in modeling the strategy of formation of innovative potential*, Modern Science and Innovations, 2024, № 2 (46), pp. 17-25.
20. Maslak A.A., Moiseev S.I. *Rasch Model for Latent Variable Estimation and Its Properties. Monograph*, Monografija, Voronezh: NPC «Nauchnaja kniga», 2016. pp. 177.
21. Moiseev S.I., Kireev Ju.V., Goncharov S.V. *Latent Variable Estimation Model with Continuous Sets of Input Data and Its Applications*, Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii, 2014, T. 57, № 3.1. pp. 161-167.
22. Moiseev S.I. *Rasch Model for Latent Variable Estimation Based on the Least Squares Method*, Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija, 2015, № 2.1 (16), pp. 166-172.
23. Maslak A.A. *Investigation of measurement precision of latent variables depending on the noise test results*, V sbornike: Society, integration, education.

Proceedings of the International Scientific Conference. Rezekne Academy of Technology zglitibas, valodu un dizaina fakultate, 2019, pp. 422-429.

24. Maslak A.A. *Measurement of latent variable «creative self-efficacy» of students of chapter of Kuban State University at Slavyansk-on-Kuban*, Journal Plus Education, 2019, T. 24, pp. 62-66.

25. Barkalov S.A., Karpovich M.A., Moiseev S.I. *Analytic Hierarchy Process: An Approach Based on Latent Variable Theory*, Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Komp'yuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika, 2022, T. 22, № 2, pp. 58-66.

26. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S., Moiseev S.I. *Application of Latent Variable Theory for Analyzing the Elemental Basis of Signal Processing Devices Using the Pairwise Comparison Method*, Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii, 2022, № 3 (89), pp. 35-38.

27. 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 upravlenija, 2015, № 5. pp. 58-66.

Информация об авторах

Александр Владиславович Ананьев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, г. Воронеж, Россия; профессор кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия;
e-mail: Ananyev-Alexandr@yandex.ru

Наиль Фаритович Кузьяров, адъюнкт кафедры ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия;
e-mail: Kuziyarov@mail.ru

Сергей Игоревич Моисеев, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры управления Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Сергей Павлович Пилкин, генеральный директор АО «Эремекс», г. Москва, Россия.

Information about the authors

Alexander V. Ananjev, Doctor of Technical Sciences, Plekhanov Russian University of Economics, Voronezh, Russia; MERC AF «AFA named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russia; e-mail: Ananyev-Alexandr@yandex.ru

Nail F. Kuziyarov, MERC AF «AFA named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin», Voronezh, Russia; e-mail: Kuziyarov@mail.ru

Sergey I. Moiseev, Voronezh state technical university, Voronezh, Russia.

Sergey P. Pilkin, JSC «EREMEX», Moscow, Russia.

Получено 30 января 2026 ● Принято к публикации 12 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 30 January 2026 ● Accepted 12 March 2026 ● Published 30 April 2026
