

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 519.816: 338.332

JEL C 65, D81

DOI 10.26425/2658-3445-2026-9-2-23-38

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭКОНОМИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОМОТОРНЫХ ГРУПП ДЛЯ БПЛА МАЛОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ



Ссылка на статью

Терелянский Павел Васильевич

Д-р экон. наук, канд. техн. наук, проф.¹

ORCID 0000-0003-0642-2901

E-mail: tereliensky@mail.ru

Дубров Алексей Александрович

Зам. директора Центра «Проектный офис молодежной деятельности»¹

ORCID 0009-0008-4573-6392

E-mail: dubrov.aa@rea.ru

Кузнецов Сергей Юрьевич

Канд. экон. наук, доц. каф. информационных систем в экономике²

ORCID 0000-0002-0046-3190

E-mail: floyd_80@mail.ru

Рогачев Алексей Фруминович

Д-р техн. наук, проф. каф. прикладной математики и основ научных исследований³

ORCID: 0000-0002-3077-6622

E-mail: rafr@mail.ru

¹Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия²Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия³Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлена комплексная методика оценки и выбора оптимальных винтомоторных групп для беспилотных авиационных систем (далее — БПЛА) малой грузоподъемности, а также экономическая оценка полученных конструкторских решений. Авторами проведен цикл натурных испытаний на современном тягоизмерительном стенде Mayatech MT10, что позволило получить экспериментальные данные по энергетической эффективности различных комбинаций бесщеточных электродвигателей и формфакторов пропеллеров.

В рамках исследования на основе морфологического анализа вариантов приведен детальный пример выбора оптимальных конфигураций. При разработке методики расчета экономико-энергетических параметров винтомоторных групп для БПЛА малой грузоподъемности применены методы теории принятия решений и непараметрической экспертизы, что обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов. Особое внимание уделено экономической составляющей оптимальности. Авторами предложен расчет приведенных эксплуатационных затрат, включающий стоимость приобретения, амортизационные отчисления, расходы на ремонт и обслуживание, а также энергопотребление исследуемых винтомоторных групп. Методика поиска оптимальной винтомоторной группы по критерию средневзвешенной эффективности и экономическим показателям позволяет выделить наиболее рациональные комбинации для БПЛА массой до десяти кг. Разработка автоматизированной цифровой методики анализа оптимальности рассчитано на повышение конкурентоспособности отечественных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, снижение производственных и эксплуатационных издержек, а также на ускорение процесса внедрения новых моделей беспилотников в гражданский, военный и коммерческий секторы.

В качестве практического результата авторами разработан специализированный программный комплекс для автоматизированного анализа спроектированных силовых установок. Этот инструмент предназначен для формирования научно обоснованных рекомендаций промышленным предприятиям, конструкторским бюро и разработчикам в сфере малой беспилотной авиации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

БПЛА, винтомоторная группа, экономическая эффективность, непараметрическая экспертиза, теория принятия решений, цифровизация НИОКР, оптимизация конструкций, эксплуатационные затраты



ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ

11.03.2026



ДОРАБОТАНА

06.05.2026



ПРИНЯТА К ПУБЛИКАЦИИ

14.05.2026



КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без спонсорской поддержки



ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Терелянский П.В., Дубров А.А., Кузнецов С.Ю., Рогачев А.Ф. Методика расчета экономико-энергетических параметров винтомоторных групп для БПЛА малой грузоподъемности // E-Management. 2026. Т. 9, № 2. С. 23–38.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Терелянский П.В., Дубров А.А., Кузнецов С.Ю., Рогачев А.Ф., 2026.

INSTRUMENTAL AND MATHEMATICAL METHODS IN MANAGEMENT PROCESSES

SCIENTIFIC ARTICLE

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ECONOMIC-ENERGY PARAMETERS OF WINCH MOTOR GROUPS FOR LOW LOAD UAV



Link to the article

Pavel V. Tereliansky

Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engr.), Prof.¹
ORCID 0000-0003-0642-2901
e-mail: tereliansky@mail.ru

Alexey A. Dubrov

Deputy Director of the Center «Project office of youth Activity»¹
ORCID 0009-0008-4573-6392
e-mail: dubrov.aa@rea.ru

Sergey Yu. Kuznetsov

Cand. Sci. (Econ.), Assoc. Prof. at the Information Systems in the Economy
Department²
ORCID 0000-0002-0046-3190
e-mail: floyd_80@mail.ru

Alexey Fr. Rogachev

Dr. Sci. (Engr.), Prof. at the Department of Applied Mathematics and
Fundamentals of Scientific Research³
ORCID: 0000-0002-3077-6622
e-mail: rafr@mail.ru

¹ Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

³ Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

ABSTRACT

The article presents a comprehensive methodology for evaluating and selecting optimal propeller-motor groups (PMGs) for small-lift unmanned aerial systems (UAS), as well as an economic assessment of the resulting design solutions. The authors conducted a series of field tests using the Mayatech MT10 modern traction testing stand, which allowed them to obtain experimental data on the energy efficiency of various combinations of brushless electric motors and propeller form factors. The study provides a detailed example of selecting optimal configurations based on morphological analysis of options. When developing a methodology for calculating the economic and energy parameters of propeller groups for small-capacity UAVs, methods of decision theory and non-parametric expertise were used, which ensures the objectivity and reproducibility of the results.

Special attention is paid to the economic component of optimality. The authors propose a calculation of the reduced operating costs, which includes the cost of acquisition, depreciation, repair and maintenance costs, as well as the energy consumption of the studied propeller groups. The method of finding the optimal propeller group based on the criterion of weighted average efficiency and economic indicators allows us to identify the most rational combinations for UAVs weighing up to 10 kg. The development of an automated digital methodology for optimality analysis is designed to increase the competitiveness of domestic R&D, reduce production and operating costs, and accelerate the process of introducing new drone models in the civilian, military, and commercial sectors.

As a practical result, the authors have developed a specialized software package for automated analysis of designed propulsion systems. This tool is designed to provide scientifically based recommendations to industrial enterprises, design bureaus and developers in the field of small unmanned aviation.

KEYWORDS

UAVs (unmanned aerial systems), propeller-motor groups (PMGs), economic efficiency, non-parametric expertise, decision theory, digitalization of R&D, optimization of designs, and operating costs



RECEIVED

11.03.2026



REVISED

06.05.2026



ACCEPTED

14.05.2026



CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest



FINANCING

The study was carried out without sponsorship



FOR CITATION

Tereliansky P.V., Dubrov A.A., Kuznetsov S.Yu, Rogachev A.Fr. (2026) Methodology for calculating the economic-energy parameters of winch motor groups for low load UAV. E-Management, vol. 9, no. 2, pp. 23–38. DOI: 10.26425/2658-3445-2026-9-2-23-38



This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Tereliansky P.V., Dubrov A.A., Kuznetsov S.Yu, Rogachev A.Fr., 2026.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Развитие беспилотных авиационных систем (далее — БПЛА) в Российской Федерации (далее — РФ, Россия) поддерживается целым рядом государственных инициатив и программ, нацеленных на продвижение технологий и расширение возможностей их применения. Для решения вопросов правового регулирования и содействия внедрению новых технологий беспилотников разработана национальная технологическая инициатива «Аэронет»¹. Её основной задачей является формирование комфортных условий для внедрения дронов в повседневную жизнь россиян, включая использование коммерческих и гражданских услуг, обеспечиваемых дронами. Государством предусмотрены меры поддержки предприятий, разрабатывающих новые технологии в области аэрокосмической индустрии. Отрасль беспилотной авиации в России активно развивается благодаря ряду факторов, подчеркивающих уникальные возможности беспилотных авиационных систем (далее — БАС), отраженных в Распоряжении Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р². В Распоряжении отмечается (реферативно), что:

- 1) широкий диапазон размеров и вариантов применения БАС должен обеспечить гибкость их адаптации практически во всех сферах экономики и общественной жизни;
- 2) универсальность конструкций и легкость изменения назначений должны оперативно менять профиль использования, адаптируясь к различным задачам и условиям эксплуатации: необходимо проводить оптимизацию конструкций с целью повышения полезной нагрузки при компактных размерах и весе, что существенно улучшает эксплуатационные характеристики БАС по сравнению с традиционными пилотируемыми самолетами;
- 3) экономичность и скорость производства БАС должны сокращать затраты на транспортировку полезной нагрузки, снижая расходы на содержание парка и ремонт оборудования;
- 4) простота освоения персоналом операций управления беспилотниками снижает требования к квалификации операторов и ускоряет процесс подготовки кадров.

Государственная поддержка БПЛА в России осуществляется на разных уровнях и охватывает широкий спектр мер, начиная от финансовой помощи и заканчивая разработкой нормативно-правовой базы. Все перечисленные программы направлены на устойчивый рост отрасли и достижение высоких позиций на международной арене. Развитие беспилотных авиационных систем в России сопровождается масштабной цифровизацией управленческих процессов, что позволяет рассматривать данную отрасль как один из ключевых объектов применения концепции E-management. Национальная технологическая инициатива «Аэронет» и сопутствующие государственные программы направлены не только на создание нормативной и технологической базы для внедрения дронов, но и на формирование электронных платформ для управления научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами (далее — НИОКР), интеграции цифровых сервисов и автоматизации бизнес-процессов на всем жизненном цикле БПЛА.

В условиях стремительного расширения сфер применения БПЛА особое значение приобретают задачи оптимизации конструкторских и эксплуатационных решений, а также оценки их экономической эффективности. Автоматизированные методики расчета параметров винтомоторных групп, цифровое моделирование, сбор и анализ экспериментальных данных с помощью современных стендов и программного обеспечения становятся неотъемлемой частью производственного менеджмента. Такой подход позволяет не только повысить конкурентоспособность отечественных разработок, но и обеспечить устойчивый рост отрасли за счет внедрения инновационных управленческих практик. Создание надежного и эффективного БПЛА, а также запуск его в производство крупными и средними сериями требует решения целого комплекса экономических и технических проблем. Одной из важнейших технических проблем является создание эффективной силовой установки, включающей двигатель и движитель (систему привода и винтовую группу) на основе оптимальной композиции доступных конструкторам комбинаций моторов и пропеллеров. Важнейшей проблемой менеджмента производства при запуске готовых конструкций в серию является оценка экономической эффективности полученных конструкций — винтомоторных групп (далее — ВМГ).

¹ Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2018 № 576-р (ред. от 16.09.2021) «Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации плана мероприятий («дорожной карты») Национальной технологической инициативы по направлению «Аэронет». Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_295241 (дата обращения: 04.03.2026).

² Распоряжение Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р «Об утверждении Стратегии развития беспилотной авиации РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г. и плана мероприятий по ее реализации». Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407003744/> (дата обращения: 04.03.2026).

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ / THE RELEVANCE OF RESEARCH

Особенности конструкции небольших беспилотных аппаратов накладывают особые требования на конструкцию винтомоторной группы для каждого типа БПЛА. Авторы предлагают к рассмотрению автоматизированную методику расчета экономико-энергетических параметров винтомоторных групп для БПЛА малой грузоподъемности (до десяти кг). Малая масса аппарата (силовой конструкции БПЛА, аккумуляторов, систем управления, навигации и дополнительного оборудования: камер, радаров, систем сброса и пр.) ограничивает возможности по установке тяжелых моторов и больших по размеру пропеллеров. При конструировании особое внимание уделяется выбору моторов и форм-фактора винтов (двигателей, пропеллеров), минимизации потерь мощности и максимальному увеличению коэффициента полезного действия всей двигательной установки.

Методика включает в себя четыре этапа:

- этап проведения натурных экспериментов на тяговых стендах;
- этап сбора данных об энергетической эффективности комбинаций ВМГ;
- этап выбора оптимальной энергетической комбинации ВМГ;
- этап расчета экономической эффективности полученных конструкторских решений с учетом выбранных оптимальных комбинаций ВМГ.

Экспериментальные замеры проводились на тягоизмерительном стенде Mayatech MT10 группой лаборантов студенческого конструкторского бюро (далее — СКБ) «ФИНИСТ» Т.М. Алтынбаевым, И.С. Астраханцевым, В.Б. Замкиным, Е.Е. Кораблевым, под руководством преподавателя Московского приборостроительного техникума И.И. Головина. Исследование оптимальности комбинации ВМГ проводилось с применением методов теории принятия решений и непараметрической экспертизы, предложенной профессором П.В. Терелянским в работах (А.В. Костикова, С.Ю. Кузнецов, П.В. Терелянский, 2023, А.В. Костикова, С.Ю. Кузнецов, П.В. Терелянский, 2024; П. В. Терелянский, 2009а, П. В. Терелянский, 2009b). Итоговые расчеты, оценка эффективности, подготовка отчетных материалов выполнены заместителем директора Центра разработки и развития беспилотных систем (учебно-производственной мастерской) Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова преподавателем А.А. Дубровым, ассистентом кафедры прикладной информатики и информационной безопасности К.Э. Чикуновым, лаборантом СКБ «ФИНИСТ» Н.А. Тарасовым, под руководством профессора П.В. Терелянского. Методика экономических расчетов эффективности предложена доцентом кафедры «Информационные системы в экономике» Волгоградского государственного технического университета С. Ю. Кузнецовым в соавторстве с профессором Волгоградского государственного аграрного университета А.Ф. Рогачевым (S.Y. Kuznetsov, 2019).

Актуальность темы исследования обусловлена интенсивным развитием отрасли БПЛА в России, стимулируемым государственной поддержкой в рамках Национальной технологической инициативы «Аэронет» и Распоряжением Правительства РФ № 1630-р. Широкое внедрение дронов в экономику требует решения комплекса управленческих и инженерных задач, ключевым элементом которых является создание эффективных силовых установок. Сегодня на многих специализированных предприятиях не существует методики ВМГ для аппаратов малой грузоподъемности. Постановка задач на проектирование и разработка параметров ВМГ в технических заданиях часто носят эмпирический характер. При этом не учитывается полный спектр эксплуатационных режимов и не интегрируется экономическая оценка, что и определяет научную и практическую значимость данной статьи.

Новизна предлагаемого подхода заключается в разработке комплексной методики, на основе которой будут развернуты дальнейшие работы по созданию аппаратно-программного комплекса, объединяющего натурный эксперимент на тягоизмерительном стенде, морфологический анализ, методы теории принятия решений и непараметрической экспертизы с многофакторным экономическим анализом. Данная методика позволяет оценивать не только энергетическую, но и экономическую эффективность ВМГ через расчет приведенных эксплуатационных затрат, что обеспечивает объективность и воспроизводимость выбора.

Целью работы, часть которой представлена в данной статье, является разработка и апробация методики расчета экономико-энергетических параметров винтомоторных групп для БПЛА малой грузоподъемности с целью обеспечения научно обоснованного выбора оптимальных конфигураций силовых установок. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- провести цикл натурных экспериментов на тягоизмерительном стенде Mayatech MT10 для сбора базы данных по энергетической эффективности различных комбинаций бесщеточных электродвигателей и пропеллеров;
- сформировать редуцированную морфологическую матрицу «мотор-типоразмер винта» с учетом прочностных характеристик компонентов;

- разработать алгоритм выбора оптимальной энергетической комбинации ВМГ на основе расчета средневзвешенной эффективности с учетом неравнозначности режимов эксплуатации БПЛА;
- выполнить расчет экономической эффективности полученных конструкторских решений, включая оценку приведенной цены и суммарных эксплуатационных затрат;
- разработать техническое задание на создание специализированного программно-аппаратного комплекса для автоматизации анализа характеристик проектируемых ВМГ.

Решение этих задач позволит перейти от интуитивного подбора компонентов к научно обоснованному процессу проектирования, что является прямым вкладом в цифровизацию НОКОР и концепцию E-management в беспилотной авиации.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА / DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL METHODOLOGY

В экспериментах использовался тягоизмерительный стенд Mayatech MT10 из семейства тестовых стендов для моторов Mayatech MT10/ MT10 Pro/ MT10 Pro Plus Culvert. Mayatech MT10 поддерживает измерение тяги до десяти кг. Это позволяет использовать стенд с различными моделями и двигателями. Устройство также может измерять скорость вращения пропеллеров, что помогает анализировать характеристики работы оборудования. Задачей полевых испытаний является выбор оптимальной винтовой группы по критерию средневзвешенной эффективности, учитывающей отношение тяги двигателя в г к потребляемой мощности в Вт для четырех основных режимов работы: 25 %, 50 %, 75 % и 100 % подаваемой мощности от источника питания (обозначено в таблицах как «Тяга, %»), а также среднее значение эффективности для всех режимов.

Режимы выбраны исходя из следующих циклов эксплуатации БПЛА:

- Режим от 0 до 25 % подаваемых на ВМГ мощности применяется для плавного снижения и парковки (приземления) БПЛА;
- Режим от 25 % до 50 % подаваемых на ВМГ мощности позволяет оператору осуществлять активные маневры по снижению БПЛА;
- Режим в 50 % подаваемых на ВМГ мощности является основным режимом эксплуатации БПЛА. Это режим висения, когда БПЛА оказывается способен сохранять заданное горизонтальное положение без положительного или отрицательного ускорения по вертикали в условиях отсутствия нисходящих и восходящих воздушных масс (конвективная турбулентность), а также в отсутствии механической и вихревой турбулентности;
- Режим от 50 % до 75 % подаваемых на ВМГ мощности применяется для плавного изменения вертикального ускорения при взлете и горизонтальных маневрах;
- Режим от 75 % до 100 % подаваемых на ВМГ мощности применяется для активного (форсаж) изменения вертикального ускорения при взлете и горизонтальных маневрах.

Среднее значение эффективности при реперных отсчетах мощности в 25 %, 50 %, 75 % и 100% подаваемых на ВМГ позволяет оценить общую эффективность исследуемой винтомоторной группы на всех режимах для всего цикла эксплуатации БПЛА.

Следовательно, в процессе эксперимента необходимо снять показатели эффективности в реперных режимах 25 %, 50 %, 75 % и 100 % подаваемых на ВМГ мощности, а также определить среднюю эффективность. При этом наличествуют четыре типа бесщеточных электродвигателей, пять типов (размеров) пропеллеров — шести, семи, восьми, десяти и двенадцати дюймов, два типа конфигурации лопастей — двухлопастная и трехлопастная конфигурации.

Выбор бесщеточных электродвигателей для создания винтомоторных групп для БПЛА весом до десяти кг мотивированы следующими утверждениями (А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов, С.А. Журавлев, 2024; О.В. Епифанов, 2011; А.Н. Решетников, 2014; Е.Г. Андреева, Н. В. Захарова, А.А. Татевосян 2023):

- уменьшение вероятности выхода из строя вследствие износа контактов,
- значительное уменьшение энергетических потерь,
- улучшенные показатели экологичности и комфорта использования,
- увеличенная удельная мощность при неизменных массогабаритных характеристиках,
- повышенная скрытность БПЛА для военных целей,
- увеличение комфортности гражданского применения из-за низкого уровня вибрации и шума.

Эти преимущества особенно важны для высоконагруженных, высокорисковых и высокоответственных задач, таких как различное военное применение данных БАС.

В эксперименте рассмотрена ограниченная номенклатура стоковых электродвигателей, которые не подпадают под санкционные ограничения, достаточно широко представлены на рынке, характеризуются возможностью оперативного обеспечения массового заказа производителями и являются одними из наиболее дешевых:

- Foxeer Black Hornet 2809 (в дальнейшем обозначаются как — FBH);
- BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro (BHT);
- Readytosky R2207 (RT);
- RaceStar BR3536 (RStar).

Количество экспериментов, которые необходимо провести согласно морфологической матрице комбинаций «мотор-типоразмер винта» составляет 40. Однако для некоторых типоразмеров пропеллеров диаметр посадочного отверстия винта оказался меньше диаметра вала мотора (шпинделя). Рассверловка посадочного отверстия пропеллера существенно понизит прочность пропеллера, поэтому для таких комбинаций экспериментальные замеры не проводились. Кроме того, использование шести дюймового двухлопастного винта в связке с мотором BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro (BHT), авторы считают нецелесообразным из-за предварительных теоретических расчетов в сравнении между тягой семи дюймового и восьми дюймового трехлопастных винтов, т.к. при сравнении их тяги теряется ~550 г, а при установке шестидюймового двухлопастного винта на мотор BHT, потенциально потеряется еще больше тяги. На рисунке представлен фрагмент примера предварительного расчета ВМГ для БПЛА с использованием онлайн-калькулятора «xcopterCalc — Калькулятор для Мультикоптеров»³. Матрица комбинаций приняла следующий вид (табл. 1), а количество экспериментов сократилось до 22 замеров.

Таблица 1. Редуцированная трехмерная морфологическая матрица комбинаций «мотор-типоразмер винта» с учетом прочностных характеристик пропеллера

Table 1. Reduced three-dimensional morphological “motor-propellor type-size” matrix, after analysis the strength characteristics of the propellers

Модель мотора	6"		7"		8"		10"		12"		Размер лопастей, дюймы
FBH	2	-	-	3	-	3	-	3	2	-	Количество лопастей
BHT	2	-	-	3	-	3	-	3	2	-	
RT	2	3	-	3	-	3	-	3	2	-	
RStar	2	-	-	3	-	3	-	3	2	3	

Количество лопастей

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

ЭТАП ПРОВЕДЕНИЯ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТЯГОВЫХ СТЕНДАХ / THE STAGE OF CONDUCTING FIELD EXPERIMENTS ON TOWING BENCHES

Подготовка стенда к измерениям включает подключение питания стенда и юстировку датчиков согласно инструкции стенда. Для снятия показателей каждой винтомоторной группы следует укрепить мотор на стенде согласно инструкции по креплению мотора к стенду.

Для каждого двигателя необходимо выполнить следующее:

- 1) установить винт (пропеллер) на вал мотора;
- 2) повернуть пропеллер до щелчка по часовой стрелке (если на винте метка CW или A) или против часовой стрелки (если на винте метка CCW или B), в зависимости от направления вращения двигателя;
- 3) надеть и закрутить на установленный пропеллер кок-гайку (фиксатор);
- 4) проверить стабильность установки: удерживая двигатель, вращать пропеллер по часовой и против часовой стрелки на полный оборот вала. Если винт вращается свободно, затянуть гайку чуть сильнее, пока винт не встанет на место;
- 5) в табл. 2 занести значение диаметра винта в дюймах (столбец 1);
- 6) подключить питание стенда;
- 7) подключить питание мотора;
- 8) в табл. 2 занести номинальное значение напряжения питания в вольтах (столбец 2), указанное в характеристиках аккумуляторной батареи. При проведении экспериментов следует учитывать изменение характеристик АКБ вследствие естественного износа аккумулятора (исчерпание ресурса аккумулятора, «усталости» АКБ);

³ Сайт «xcopterCalc – Калькулятор для Мультикоптеров». Режим рецензирования: <https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php> (дата обращения: 04.03.2026).

9) при помощи микроконтроллера подавать восьмибитный ШИМ от 0 до 255 на ESC двигателя в процентном выражении для 25 %, 50 %, 75 % и 100 % мощности.

10) снять показатели тока нагрузки в амперах для каждого уровня мощности, результаты измерений занести в табл. 2, столбец 4;

11) снять показатели тяги в граммах для каждого уровня мощности стенда, результаты измерений занести в табл. 2, столбец 5;

12) снять показатели мощности в ваттах для каждого уровня мощности, результаты измерений занести в табл. 2, столбец 6;

13) отключить питание мотора;

14) отключить питание стенда;

15) открутить и снять с установленного пропеллера кок-гайку (фиксатор);

16) снять установленный винт (пропеллер) с вала мотора;

17) повторить действия 1–16 для всех исследуемых типоразмеров винтов (пропеллеров) согласно табл. 1 (Редуцированная трехмерная морфологическая матрица комбинаций «мотор-типоразмер винта» с учетом прочностных характеристик пропеллера).

18) по завершению снятия замеров следует снять исследуемый мотор и заменить его на другой исследуемый, согласно следующей строке табл. 1.

Таблица 2. Образец заполненного шаблона для ВМГ на основе мотора Foxeer Black Hornet 2809 (фрагмент)

Table 2. Sample of a completed template for a VTOL system based on the Foxeer Black Hornet 2809 motor (excerpt)

Диаметр винта, дюймы, число лопастей	Напряжение, В	Тяга, %	Ток нагрузки, А	Тяга, г	Мощность, Вт	Эффективность, г/Вт
6, двухлопастной	12	25 %	1,86	100	22,50	4,444
		50 %	4,43	237	53,50	4,429
		75 %	6,33	344	75,80	4,538
		100 %	8,85	500	105,40	4,743
		Средняя	5,3675	295,25	64,3	4,5385
...	...	...	...	...	...	...
7, трехлопастной	12	25 %	1,75	122	21,3	5,727
		50 %	5,47	306	65,8	4,65
		75 %	8,33	463	91,4	5,065
		100 %	14,13	753	166,4	4,525
		Средняя	7,42	411	86,225	4,99175

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Этап сбора данных об энергетической эффективности комбинаций ВМГ.

Данный этап включает расчет показателей эффективности на основе полученных на предыдущем этапе экспериментальных данных. Для этого следует:

1) для каждого уровня мощности рассчитать эффективность как отношения тяги в граммах (столбец 5) к мощности в Вт (столбец 6). Результаты занести в соответствующие ячейки столбца 7 табл. 2;

2) Рассчитать средние значения для столбцов 4–7 и занести результаты в строку «Средняя».

Пример результатов расчетов на основе снятых экспериментальных данных в рамках предлагаемой методики для двухлопастного шестидюймового винта и трехлопастного семидюймового винта с мотором Foxeer Black Hornet 2809 приведены в табл. 2 (фрагмент).

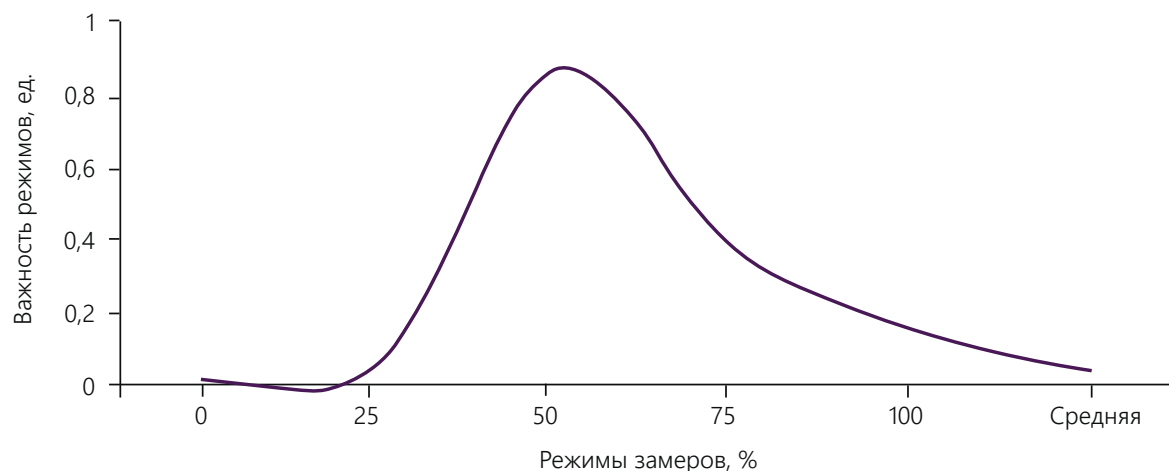
ЭТАП ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМБИНАЦИИ ВМГ / STAGE OF SELECTION OF THE OPTIMAL ENERGY COMBINATION OF HGM

Как отмечалось выше, БПЛА эксплуатируются в пяти основных режимах:

- режим плавного снижения и парковки (приземления) БПЛА;
- режим активных маневров по снижению БПЛА;
- режим висения, который является основным и самым продолжительным режимом работы БПЛА;
- режим плавного изменения вертикального ускорения при взлете и горизонтальных маневрах;
- режим активного (форсаж) изменения вертикального ускорения при взлете и горизонтальных маневрах.

Эти режимы не являются равноважными в цикле эксплуатации БПЛА. Наиболее значимым для эксплуатанта становится режим висения, далее по важности следует режим плавного изменения вертикального ускорения при взлете и горизонтальных маневрах. Режим форсажа, а также режим плавного снижения и парковки не являются особенно значимыми, но учитываются при эксплуатации. Режим активных маневров как правило исключается из рассмотрения, т.к. он является частью режима снижения и парковки. Следовательно, эффективность этих режимов является для эксплуатанта также неравноважной. Среднее значение эффективности при реперных отсчетах мощности в 25 %, 50 %, 75 % и 100 %, подаваемых на ВМГ, позволяет оценить общую эффективность исследуемой винтомоторной группы на всех режимах для всего цикла эксплуатации БПЛА.

Экспертная оценка важности режимов может быть задана функцией принадлежности нечеткому множеству «Важность режимов», где по оси ординат величина важности μ , а по оси абсцисс дискретные градации четырех реперов «25 %, 50 %, 75 % и 100 %», отражающие линейное возрастание мощности, подаваемых на ВМГ, плюс репер «Среднее значение эффективности» (рис. 1) (В. П. Терелянский, 2009а).



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Рис. 1. Нечеткое множество «Важность режимов эксплуатации»

Fig. 1. The fuzzy set "Importance of Operating Modes"

Уточнение относительной важности для дискретных значений реперов велось на основе расчета матриц парных сравнений, по определенной методике на основе приближенного расчета правого собственного вектора квадратной обратносимметричной матрицы экспертных оценок (В.П. Терелянский, 2009а; В.П. Терелянский, 2009b). Оценки проставлялись согласно данной методике, с использованием ранговой шкалы Т. Саати (В.П. Терелянский, 2009а; Т. Саати, 2008).

Приближенный расчет правого собственного вектора квадратной обратносимметричной матрицы основывается на вычислении максимального собственного значения матрицы $\lambda_{\max}$. Для расчетов сначала суммируется каждый столбец суждений, затем сумма первого столбца умножается на величину первой компоненты нормализованного вектора приоритетов, сумма второго столбца — на вторую компоненту и т. д. Затем полученные числа суммируются. Так можно получить величину, обозначаемую $\lambda_{\max}$:

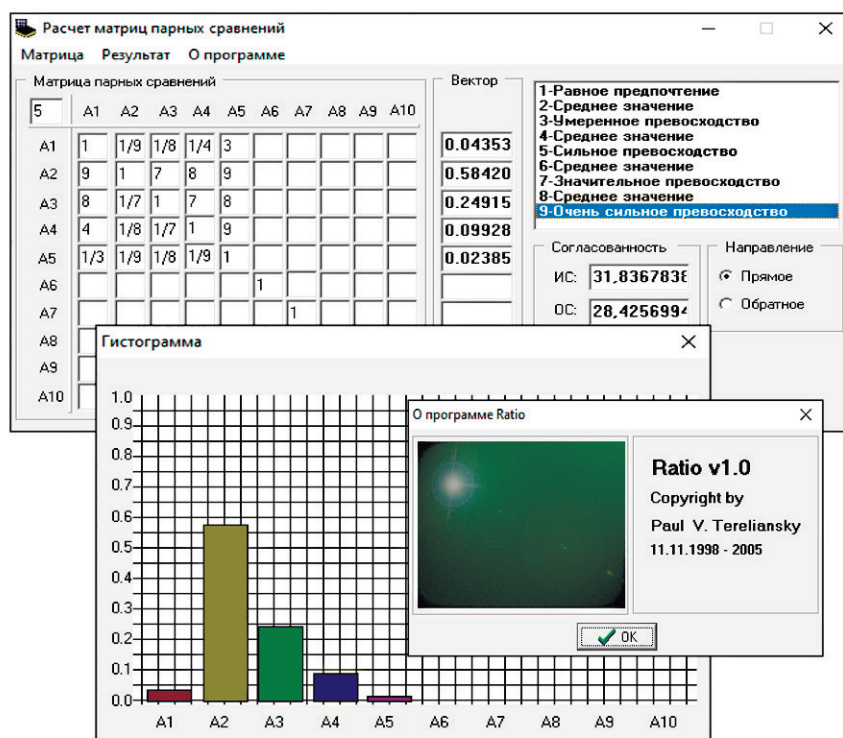
$$S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

$$\lambda_{\max} = S_1 \cdot w_1 + S_2 \cdot w_2 + \dots + S_n \cdot w_n \quad (2)$$

где w_i — элементы нормализованного вектора приоритетов, a_{ij} — элементы матрицы парных сравнений, n — размерность матрицы, S_i — сумма i -го столбца.

Точное значение правого собственного вектора W положительной обратносимметричной квадратной матрицы $[A]$ находится через решение уравнения, приведенное итерационным алгоритмом (Т. Саати, 2008, В.П. Терелянский, 2009а). Однако подобная точность не имеет особого смысла из-за общей неточности входных значений, которые являются по сути вербальными субъективными заявлениями экспертов. Отметим также, что числа из табл. 6 не являются объектами числовой природы, а служат идентификаторами ранговой оценки вариантов.

Итоговый приближенный правый собственный вектор матрицы парных сравнений рассчитывался с использованием программного средства «Расчет вектора приоритетов на основе приближенного расчета правого собственного вектора квадратной обратносимметричной матрицы», разработанного профессором В.П. Терелянским (В. П. Терелянский, 2009с, 2009d) (рис. 2).



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Рис. 2. Скриншот работы программы для расчета вектора приоритетов на основе приближенного расчета правого собственного вектора квадратной обратносимметричной матрицы

Fig. 2. Screenshot of the priority vector calculating program the based on the approximate calculation of the right eigenvector of a square inverse-symmetric matrix

Заполненная экспертами матрица парных сравнений для оценки важности режимов эксплуатации выглядит следующим образом (табл. 3). В столбце 7 находится нормированный вектор приоритетов, который и будет представлять собой вектор весовых коэффициентов. Экспертная процедура состояла в опросе и консолидации мнений представителей эксплуатантов и компании-производителей БПЛА подобного типа с исследуемой номенклатурой ВМГ. В зависимости от конкретных условий эксплуатации, условий производства и специальных требований к изделиям, возможен пересмотр весовых коэффициентов, которые могут быть применены в дальнейших расчетах.

Таблица 3. Матрица парных сравнений для оценки важности режимов эксплуатации

Table 3. Pairwise comparison matrix for evaluating the importance of operating modes

Тяга (%)	25 %	50 %	75 %	100 %	Среднее	Вектор	Вектор, %
1	2	3	4	5	6	7	8
5	1	1/9	1/8	1/4	3	0,04353	4
50	9	1	7	8	9	0,5842	59
75	8	1/7	1	7	8	0,24915	25
100	4	1/8	1/7	1	9	0,09928	10
Среднее	1/3	1/9	1/8	1/9	1	0,02385	2

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Значения нормированного вектора приоритетов будут использованы для «взвешивания» (умножения на весовой коэффициент) показателей «Эффективность (г/Вт)» из столбцов 7 табл. 2.

Таблица 4. Расчет взвешенной эффективности

Table 4. Calculation of reduced efficiency

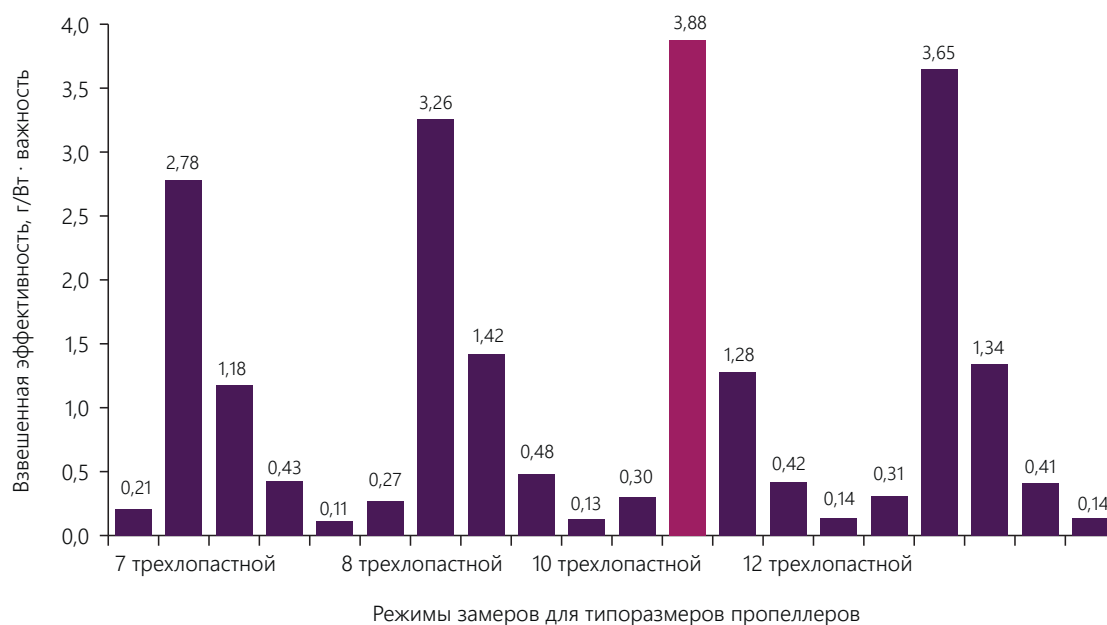
Диаметр винта (дюймы), количество лопастей	Тяга (%)	Вектор	Эффективность, г/Вт	Взвешенная эффективность
7, трехлопастной	25 %	0,04353	Значения из столбцов 7 табл. 2	Значение столбца 4 умножить на соответствующее значение строки из столбца 3
	50 %	0,5842		
	75 %	0,24915		
	100 %	0,09928		
	Средняя	0,02385		

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Из столбца 5 табл. 4 выбираются максимальные значения взвешенной эффективности для исследуемого мотора и пропеллера. Это будет ВМГ с максимальной эффективностью данной комбинации «мотор-типоразмер винта». Максимум значений всех комбинаций ВМГ позволит осуществить выбор оптимальной винтовой группы по критерию средневзвешенной эффективности, учитывающей отношение тяги двигателя в г к потребляемой мощности в Вт для четырех основных режимов работы: 25 %, 50 %, 75 % и 100 % подаваемой мощности от источника питания, а также среднее значение эффективности для всех режимов. Расчет итоговых таблиц на начальных этапах разработки методики проводился в табличном процессоре Microsoft Excel.

В дальнейшем, группой инженеров под руководством А.А. Дуброва разработана программа «КАЛЬКУЛЯТОР ВМГ» (А.А. Дубров, К.Э. Чикунов, Н.А. Тарасов и др., 2026). Программа предназначена для автоматизированного проектирования силовых установок БПЛА массой до десяти кг и реализована на языке Python для персональных компьютеров под управлением операционной системы Windows. Функциональные возможности программы включают оценку тяги и потребляемой электрической мощности воздушно-моторной группы в четырех фиксированных режимах подачи мощности: 25 %, 50 %, 75 % и 100 % от максимальной. В качестве настроечных параметров в базу данных программы вводятся заданные экспертами весовые коэффициенты, отражающие значимость различных режимов полета, что позволяет адаптировать подбор компонентов под конкретные эксплуатационные и конструкторские задачи. На основе полученных данных осуществляется расчет эффективности для каждого режима как отношения тяги к мощности (г/Вт), а затем вычисляется средневзвешенная эффективность по заданным экспертным весам. Пример результатов расчетов

приведен на рис. 3. По оси ординат указана взвешенная эффективность (безразмерная величина), по оси абсцисс — значения, соответствующие измеряемой мощности, сгруппированные по типоразмеру пропеллера. В настоящее время ведется работа по сопряжению программного интерфейса с аппаратной частью тягоизмерительного стенда Mayatech MT10 с целью создания единого программно-аппаратного комплекса.



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Рис. 3. Максимум средневзвешенной эффективности винтомоторных групп для мотора BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro (BHT)

Fig. 3. Maximax average weighted efficiency of the VMG for the BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro motor (BHT)

Максимум значений всех комбинаций ВМГ на основе анализа заполненных таблиц с учетом предоставленных ограничений на номенклатуру комбинаций ВМГ позволяет осуществить выбор оптимальной винтовой группы по критерию средневзвешенной эффективности, учитывающей отношение тяги двигателя в граммах к потребляемой мощности в Вт для четырех основных режимов работы: 25 %, 50 %, 75 % и 100 % подаваемой мощности от источника питания, а также среднее значение эффективности для всех режимов позволяет сделать следующие выводы:

- на первом месте будет ВМГ BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro 10 дюймов трехлопастной (средневзвешенная эффективность — 3,88);
- на втором месте, практически без отрыва, будет ВМГ RaceStar BR3536 12 дюймов двухлопастной (средневзвешенная эффективность — 3,83);
- на третьем месте будет ВМГ Foxeer Black Hornet 2809 10 дюймов трехлопастной (средневзвешенная эффективность — 3,22);
- на четвертом месте с большим отрывом будет находиться ВМГ Readytosky R2207 6 дюймов двухлопастной (средневзвешенная эффективность — 2,39).

При исследовании доступной конструкторской группе номенклатуры моторов и пропеллеров лучшей комбинацией ВМГ признаны с небольшим отрывом две комбинации — ВМГ BrotherHobby Tornado T5 3115 Pro 10 дюймов трехлопастной (средневзвешенная эффективность — 3,88) и ВМГ RaceStar BR3536 12 дюймов двухлопастной (средневзвешенная эффективность — 3,83).

ЭТАП РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЫБРАННЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ КОМБИНАЦИЙ ВМГ / COST-EFFECTIVENESS CALCULATION PHASE OF THE RESULTING DESIGN SOLUTIONS TAKING INTO ACCOUNT THE SELECTED OPTIMAL HGM COMBINATIONS

Проведенные выше стендовые исследования выявили оптимальные варианты компоновки электродвигателей пропеллерами различных типоразмеров. Критерием оптимальности выступил показатель эффективности, определяемый как отношение развиваемой ВМГ тяги к затрачиваемой мощности двигателя. Расчеты позволили определить

оптимальную комбинацию для каждой из четырех предварительно отобранных моделей двигателей, и соответственно проранжировать четыре варианта ВМГ по уровню эффективности. В ходе дальнейшего анализа мы можем учесть стоимостной фактор для получения более полной информации, с целью дальнейшего принятия обоснованных решений. Введем дополнительный показатель «Приведенная цена», как отношение цены объекта к величине его эксплуатационной эффективности. Результат расчетов приведены в табл. 5. Цена электромоторов взята усредненная на основе анализа 12 сайтов, предлагавших данную номенклатуру товаров на 20.04.2026 г.^{4,5,6}

Заявленный срок службы усреднен на основе анализа гарантий, предоставляемых производителями дронов с подобной номенклатурой моторов на 20.04.2026 г.^{7,8,9}

Таблица 5. Расчет приведенной цены по маркам изделий

Table 5. Calculation of the reduced price by product brand

Марка мотора	Мощность, Вт	Цена, руб.	Эффективность	Приведенная цена, руб.	Заявленный срок службы, лет	Амортизационные отчисления, руб.
Приведенная цена по маркам изделий				Амортизационные отчисления		
Readytosky R2207	78	1580	2,39	661,1	2	790,0
Foxeer Black Hornet 2809	95	3800	3,22	1180,1	3	1266,7
Brotherhobby Tornado T5 3115	130	4900	3,88	1262,9	4	1225,0
Racestar BR3536	102	4200	3,83	1096,6	3	1400,0

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Чем ниже значение данного показателя, тем предпочтительнее для дальнейшей конструкторской проработки соответствующая модель изделия. Расчеты показывают, что наименее эффективная по критерию «Тяга / Мощность» модель — Readytosky R2207 по стоимостному критерию оказывается наиболее предпочтительной. С моделью двигателя Brotherhobby Tornado T5 ситуация обратная.

Однако использование только такого показателя, как цена изделия, представляется недостаточным для полноты формулируемых выводов. Необходимо учесть показатель «Эксплуатационные затраты», которые будут связаны с фактическим производственным использованием исследуемых моделей двигателей. Как правило, они рассчитываются на год.

Эксплуатационные затраты в нашем случае складываются из следующих элементов:

- амортизационные отчисления;
- затраты на ремонт и обслуживание;
- стоимость потребляемой энергии.

Амортизационные отчисления рассчитываются исходя из принятого в расчетах (заявленного) срока эксплуатации объекта. В рамках данного исследования заявленный срок службы для каждого из рассмотренных бесщеточных электродвигателей определен на основе анализа гарантийных обязательств и технической документации, предоставляемой производителями и дистрибьюторами на электронных торговых площадках. Для обеспечения репрезентативности и объективности данных проведен анализ предложений от 12 различных поставщиков, реализующих данную номенклатуру товаров на 20 апреля 2026 г. Поскольку производители не всегда указывают срок службы в явном виде, в качестве его эквивалента использовалась гарантийная наработка или гарантийный срок, в течение которого производитель обязуется бесплатно устранять производственные дефекты. В случаях, когда точная информация отсутствовала, заявленный срок службы присваивался исходя из принадлежности мотора к определенному классу (например, «для гоночных дронов»,

⁴ Geekstore3d. Режим доступа: <https://geekstore3d.ru/> (дата обращения: 04.03.2026).

⁵ Farshop. Режим доступа: <https://www.farshop.ru/> (дата обращения: 04.03.2026).

⁶ Sporthobby. Режим доступа: <https://sporthobby.ru/zapchasti-dlya-kvadrokopterov> (дата обращения: 04.03.2026).

⁷ Foxeer. Режим доступа: <https://www.foxeer.com/foxeer-black-hornet-2809-motor-g-523> (дата обращения: 04.03.2026).

⁸ Readytosky. Режим доступа: <https://readytosky.com> (дата обращения: 04.03.2026).

⁹ Brotherhobby. Режим доступа: <https://brotherhobby.com/tornado-t5-3115-pro-motor-p00158p1.html> (дата обращения: 04.03.2026).

«для фристайла», «универсальный»), для которого по остальным моделям уже были установлены усредненные значения. Полученные значения были усреднены для каждой конкретной модели мотора, что позволило сформировать единую базу для дальнейших экономических расчетов, в частности, для определения годовых амортизационных отчислений. Такой подход, основанный на анализе рыночных данных и методе аналогии, является общепринятым в экономическом анализе при отсутствии прямых нормативов на новую или узкоспециализированную технику и позволяет обеспечить достаточную степень достоверности и сопоставимости результатов оценки приведенных эксплуатационных затрат. Соответствующие расчеты приведены в табл. 5, столбцы 6,7.

Затраты на ремонт и обслуживание связаны с стоимостью запасных частей, расходных материалов и собственно работ. Примем укрупненно величину этих затрат в размере 20 % от цены изделия согласно методическим указаниям (см. табл.1, строка 10 Приказа)¹⁰. Величина в 20 % выбрана исходя из смыслового объединения самоходных машин с электроприводом и самоходных машин с двигателями внутреннего сгорания в одной категории в табл. 1 норм, что зафиксировано в Приказе Минстроя России от 4 сентября 2019 г. №513/пр «Об утверждении Методических рекомендаций по определению сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов». В разделе, где перечислены типоразмерные группы машин и соответствующие им нормы годовых затрат на ремонт и техническое обслуживание (Нр), самоходные машины с двигателями внутреннего сгорания (буровая и сваебойная техника, проходческие комбайны, автогудронаторы, автотранспортные средства и т. д.) указаны в п. 10. При этом в перечне примеров таких машин косвенно упоминаются и машины с электроприводом, хотя прямо это не оговаривается, но фактически они включены в эту категорию по смыслу перечня примеров. Это подтверждается тем, что в более поздних нормативных актах (например, в Методике определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов от 13 декабря 2021 г. №916/пр) эта категория явно обозначена как «самоходные машины с двигателями внутреннего сгорания и (или) с электроприводом»¹¹.

Кроме того, повышенный коэффициент в 20 % (характерный для районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к ним) выбран исходя из следующих соображений:- предполагаемой универсальности применения проектируемых ВМГ;

- возможности, изменения величины коэффициента в конкретных расчетах, уточняемых в процессе согласования ТЗ на разрабатываемую ВМГ;
- повышенных требованиях к условиям эксплуатации для изделий двойного назначения, для расчетов которых, собственно, и создавалась методика.

Стоимость электроэнергии, потребляемой двигателем, определяется по формуле:

$$С_{эн} = M / \eta_{акк} \cdot T_{экспл} \cdot C_{эн}, \quad (3)$$

где M — мощность двигателя, кВт; $\eta_{акк}$ — коэффициент эффективности аккумулятора (коэффициент отдачи по мощности), в данных исследованиях $\eta_{акк} = 1$; $T_{экспл}$ — время эксплуатации, час; $C_{эн}$ — стоимость 1 кВт-часа электроэнергии, руб. 6,7 руб.

Следует отметить, что в настоящий момент не существует открытых нормативов на эксплуатацию БПЛА именно с такими ВМГ. Эти нормативы определяются внутренними регламентами производителя по согласованию с эксплуатантами конечного изделия. Поэтому в зависимости от конкретных условий эксплуатации, условий производства и специальных требований к изделиям, возможен пересмотр норматива в 20 %, который может быть применен в дальнейших расчетах при производстве данных изделий.

Мощности двигателей мы берем из вышеприведенных таблиц для самого распространенного режима нагрузки — 50 %. Коэффициент эффективности аккумулятора (коэффициент отдачи по мощности) в данных исследованиях не учитывался, поскольку исследовалась только группа «винт-мотор». Тем не менее, данный коэффициент введен в расчеты для учета затрат на оплату электроэнергии, идущей на зарядку аккумуляторов при массовом использовании БПЛА конечными эксплуатантами. Дальнейшие исследования предполагают расширение методики расчетов для групп «винт-мотор-АКБ-масса конструкции-полезная нагрузка». Время эксплуатации БПЛА принимается из расчета эксплуатации от пяти (Д.А. Ивлеев, 2023) до десяти (В.П.Ларченков, 2017) часов в день (в данном исследовании принято среднее — пять часов), пять дней в неделю для коммерческой эксплуатации. Эксплуатация в условиях боевых действий в данном исследовании не рассматривалась, поскольку является более напряженной, но значительно более кратковременной.

¹⁰ Приказ от 4 сентября 2019 г. № 513/пр № «Об утверждении методических рекомендаций по определению сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов» Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?module=1&documentId=412362> (дата обращения: 04.03.2026).

¹¹ Методика определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов от 13 декабря 2021 года №916/пр. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minstroja-rossii-ot-13122021-n-916pr-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 04.03.2026).

Оставляя расчеты в стороне, приведем итоговые значения эксплуатационных затрат для исследуемых моделей двигателей в табл. 6 (столбцы 2—4). Теперь можно определить значения суммарных эксплуатационных затрат по моделям двигателей, и рассчитать соответственно приведенные затраты, с последующим ранжированием моделей (табл. 6, столбцы 5—7).

Таблица 6. Значения эксплуатационных затрат по элементам, рублей (в расчете на год)

Table 6. Operating cost values by element, rubles (per year)

Марка мотора	Амортизационные отчисления	Ремонт и обслуживание	Затраты на энергию	Суммарные эксплуатационные затраты	Эффективность	Приведенные эксплуатационные затраты
	Расчет эксплуатационных затрат, руб. (в расчете на год)			Расчет эксплуатационных затрат, руб.		
Readytosky R2207	790,0	316,0	692,4	1798,4	2,39	752,5
Foxeer Black Hornet 2809	1266,7	760,0	843,4	2870,0	3,22	891,3
Brotherhobby Tornado T5 3115	1225,0	980,0	1154,1	3359,1	3,88	865,7
Racestar BR3536	1400,0	840,0	905,5	3145,5	3,83	821,3

Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

Как видно по значению приведенных эксплуатационных затрат к значению эффективности рассматриваемых альтернативных вариантов лидерство сохраняет модель Readytosky R2207. При этом следует отметить, что разброс в значениях данного показателя оказался значительно меньше, чем при расчете «Приведенной цены». Очевидно, что использование подхода с позиций эксплуатационных затрат позволяет принимать более взвешенные итоговые решения. Также следует отметить, что модель двигателя Readytosky R2207 по совокупности используемых критериев оценки заметно отличается от остальных моделей. Вероятно, следует выделить ее из группы сравниваемых объектов как представляющую другой подкласс электродвигателей, несопоставимый с остальными, по крайней мере в рамках данного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Широкое использование БПЛА в России в соответствии с государственной концепцией «Аэронет» — это не только технологический, но и управленческий вызов, требующий комплексного подхода на всех этапах жизненного цикла: от научных исследований и НИОКР до штучного, мелко- и крупносерийного производства, эксплуатации и сервисного обслуживания. Массовое внедрение беспилотников невозможно без цифровизации менеджмента на всех уровнях: от этапов НИР, НИОКР и производства до коммерческой и военной эксплуатации. Новые методики, в том числе и относящиеся к направлению E-management, становятся фундаментом для эффективного и устойчивого роста отрасли беспилотной авиации, обеспечивая интеграцию инновационных технологий в экономику и сферу безопасности государства. В условиях масштабной цифровизации отрасли и реализации государственной концепции «Аэронет» особую значимость приобретают методики, позволяющие не только повысить экономическую и энергетическую эффективность силовых установок, но и обеспечить интеграцию цифровых сервисов, автоматизацию бизнес-процессов и формирование единой информационной среды для всех участников рынка. Предлагаемая авторской группой методика расчета экономико-энергетических параметров винтомоторных групп для БПЛА малой грузоподъемности представляет собой многоэтапный процесс, включающий экспериментальные замеры на тягоизмерительных стендах, морфологический анализ вариантов, применение методов теории принятия решений и непараметрической экспертизы. Такой подход обеспечивает объективность, воспроизводимость и прозрачность получаемых результатов, что особенно важно для отечественных разработчиков в условиях санкционных ограничений и необходимости импортозамещения.

Практическая реализация методики позволила сделать первый шаг к проектированию специализированного программно-аппаратного комплекса для автоматизированного анализа силовых установок на стадии отбора образцов при проектировании БПЛА. Этот инструмент не только ускоряет процесс выбора оптимальных конфигураций ВМГ,

но и формирует научно обоснованные рекомендации для промышленных предприятий, конструкторских бюро и разработчиков беспилотных систем. Внедрение цифровых платформ и автоматизированных систем анализа способствует ускорению инновационного цикла, снижению производственных и эксплуатационных издержек, а также повышению конкурентоспособности отечественных решений на внутреннем и внешнем рынках.

В перспективе развитие данной методики ориентировано на расширение области исследований за счет интеграции расчетов по всей цепочке «винт-мотор-аккумулятор-масса конструкции-полезная нагрузка», что позволит более точно прогнозировать эксплуатационные характеристики и экономические показатели БПЛА на уровне математических моделей, без возможных затрат на создание опытных образцов «в металле». Кроме того, дальнейшее совершенствование сетевых (распределенных) цифровых коммуникаций между участниками НИОКР обеспечит поддержку коллективной работы над проектами, обмен данными между конструкторами, а также внедрение современных инструментов управления проектами и жизненным циклом изделий. Использование разрабатываемых цифровых платформ направлено не только на оптимизацию процессов НИОКР, но и стратегически — на оптимизацию управления проектами, обмена данными, совместной разработки и тестирования новых конструкций, обеспечивающих ускорение инновационного цикла и повышение эффективности взаимодействия участников исследовательских, производственных процессов и конечных эксплуатантов БПЛА. Такой комплексный подход станет основой для устойчивого роста отрасли беспилотной авиации, повышения ее роли в экономике и обеспечении национальной безопасности России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева, Е. Г. Оптимизационные задачи и алгоритм проектирования конструкций тихоходных синхронных машин с постоянными магнитами / Е. Г. Андреева, Н. В. Захарова, А. А. Татевосян // Промышленная энергетика. — 2023. — № 7. — С. 2–12. — DOI 10.34831/EP.2023.28.57.001. — EDN AAURGG.
- Дубров, А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2026611056 (Патент) от 16.01.2026 / А.А. Дубров, К.Э. Чикунов, Н.А. Тарасов [и др.]. — 2026.
- Епифанов, О. В. Управление трехфазной синхронной машиной с постоянными магнитами в режиме вентильного двигателя с двухфазным усилительно-преобразовательным устройством / О. В. Епифанов, С. С. Жуков, А. Г. Микеров // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2011. — № 7. — С. 81–87. — EDN OEYSEZ.
- Захаров, А.В. Опыт разработки синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов / А. В. Захаров, А. С. Кобелев, С. В. Кудряшов, С. А. Журавлев // Электротехника. — 2024. — № 1. — С. 50–54. — DOI 10.53891/00135860_2024_1_50. — EDN GRGQRO.
- Ивлев, Д. А. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в современных боевых условиях / Д. А. Ивлев // Актуальные исследования. — 2023. — № 48-1(178). — С. 27–30. — EDN DTUJDN.
- Костикова, А. В. Применение теории нечетких множеств в задаче оценки конкурентоспособности продукции / А. В. Костикова, С. Ю. Кузнецов, П. В. Терелянский // E-Management. — 2023. — Т. 6, № 2. — С. 37–48. — DOI 10.26425/2658-3445-2023-6-2-37-48. — EDN CIIKPX.
- Костикова, А. В. Разработка методического инструментария оценки эффективности организационно-технического уровня управления / А. В. Костикова, С. Ю. Кузнецов, П. В. Терелянский // Друкерровский вестник. — 2024. — № 3(59). — С. 5–14. — DOI 10.17213/2312-6469-2024-3-5-14. — EDN WITUNW.
- Ларченков, В. П. Конструктивно-технические аспекты беспилотных летательных аппаратов, влияющие на подготовку и ведение противовоздушной обороны в условиях современного общевойскового боя / В. П. Ларченков, В. М. Сергеев // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. — 2017. — № 4(136). — С. 20–25. — EDN ZVHHGX.
- Решетников, А. Н. Управление синхронной электрической машиной с возбуждением от постоянных магнитов в стартер-генераторной установке / А. Н. Решетников, С. А. Харитонов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2014. — № 2(55). — С. 52–59. — EDN SMYRMB.
- Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Л. Саати. — Москва: Издательство ЛКИ, 2008. — С. 360. — ISBN 978-5-382-00422-8
- Терелянский, П.В. Непараметрическая экспертиза объектов сложной структуры: монография / П.В. Терелянский. — Изд.-торговая корпорация «Дашков и К°». — Москва: Дашков и К°, 2009а. — ISBN 978-5-394-00606-7
- Терелянский, П.В. Построение функции «цена-качество» на основе анкетных опросов экспертов / П.В. Терелянский // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. — 2009б. — № 3(37). — С. 92–96

Терелянский, П.В. Система поддержки принятия решений, реализующая анализ матриц парных сравнений экспертных суждений на основе метода анализа иерархий. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611488 (Патент) от 16.01.2026 / П.В. Терелянский. — Москва: РОСПАТЕНТ, 2009 с.

Терелянский, П.В. Расчет вектора приоритетов на основе приближенного расчета правого собственного вектора квадратной обратносимметричной матрицы. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009611495 (Патент) / П.В. Терелянский. — Москва: РОСПАТЕНТ, 2009д

Kuznetsov, S.Y. Hierarchical analysis in optimization of enterprise units / S.Y. Kuznetsov, P.V. Tereliansky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The I International Scientific Practical Conference "Breakthrough Technologies and Communications in Industry", 2019. — Vol. 483. DOI: 10.1088/1757-899X/483/1/012092. — EDN: MPELCC.

REFERENCES

- Andreeva, E.G., Zakharova N.V., Tatevosyan, A.A (2023). Optimization Tasks and Design Algorithm for Low-Speed Synchronous Machines with Permanent Magnets. *Industrial Power Engineering*, 7, 2–12. (In Russian). <https://doi.org/10.34831/EP.2023.28.57.001>
- Dubrov, A.A., Chikunov, K.E., Tarasov, N.A., [et al.] (2026). VMG Calculator. RU2026611056. (Patent). (In Russian).
- Epifanov, O.V., Zhukov, S. S., Mikerov, A. G. (2011). Control of a three-phase synchronous machine with permanent magnets in the mode of a brushless motor with a two-phase amplifier-converter device. *Izvestiya SPbGETU LETI*, 7, 81–87. (In Russian).
- Ivlev, D.A. (2023). Analysis of the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Modern Combat Conditions. *Current Research*, 48–1(178), 27–30. (In Russian).
- Kostikova, A.V., Kuznetsov, S.Yu., Tereliansky, P.V. (2023). Application of fuzzy set theory in the task of assessing product competitiveness. *E-Management*, 6(2), 37–48. (In Russian). <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2023-6-2-37-48>
- Kostikova, A.V., Kuznetsov, S.Yu., Tereliansky, P.V. (2024). Development of Methodological Tools for Assessing the Effectiveness of Organizational and Technical Management. *Drukerovsky Bulletin*, 3(59), 5–14. (In Russian). <https://doi.org/10.17213/2312-6469-2024-3-5-14>
- Kuznetsov, S.Y., Tereliansky, P.V. (2019). *Hierarchical analysis in optimization of enterprise units*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The I International Scientific Practical Conference "Breakthrough Technologies and Communications in Industry". (In Russian).
- Larchykov, V.P., Sergeenkov, V.M. (2017). Design and technical aspects of unmanned aerial vehicles affecting the preparation and conduct of air defense in the conditions of modern combined arms combat. *Defense complex — to the scientific and technical progress of Russia*, 4(136), 20–25. (In Russian).
- Reshetnikov, A.N., Kharitonov, S. A. (2014). Control of a synchronous electric machine with excitation from permanent magnets in a starter-generator unit. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2(55), 52–59.
- Saati, T. L. (2008). *Decision-making with dependencies and feedbacks: Analytical networks*. Moscow: LKI Publishing House.
- Tereliansky, P.V. Building a Price-Quality Function Based on Expert Estimations. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*, 3(37), 92–96.
- Tereliansky, P.V. Nonparametric Expertise of Complex Structures: A Monograph. Publishing and Trading Corporation Dashkov and Moscow: Dashkov and K°, 2009b. – ISBN 978-5-394-00606-7
- Tereliansky, P.V. (2009). Decision support system that implements the analysis of matrices of paired comparisons of expert judgments based on the hierarchy analysis method. RU2009611488. Moscow: ROSPATENT. (Patent). (In Russian).
- Tereliansky, P.V. Calculation of the priority vector based on an approximate calculation of the right eigenvector of a square inversely symmetric matrix. RU2009611495. Moscow: ROSPATENT. (Patent). (In Russian).
- Zakharov, A.V., Kobelev, A. S., Kudryashov, S. V., Zhuravlev, S. A. (2024). Experience in developing a synchronous electric motor with excitation from permanent magnets. *Electrical Engineering*, 1, 50–54. https://doi.org/53891/00135860_2024_1_50