



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 623.746.4:519:004.89

ВОЗДУШНОЕ СУДНО С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ТЯГОЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА

Сёмин Н.А.,¹ Валиев А.И., Ахметшарипов Р.Р., Низамутдинов Р.И.

ФГБОУ ВО «КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА – КАИ», Казань, Россия (420111, Республика Татарстан, город Казань, ул. Карла Маркса, д. 10), e-mail: ¹ tatcomposite@mail.ru

В работе рассмотрена концепция малого воздушного судна вертикального взлёта и посадки, в котором для перехода между режимами полёта используется программно-управляемое перераспределение тяги между стационарно закреплёнными электродвигателями. Проведен анализ основных классов подобных летательных аппаратов, предложено принципиально новое решение, в котором отсутствует механические приводы поворота силовых установок и сложных трансмиссий, приводящих к снижению массы конструкции, повышению её надёжности и уменьшению энергопотребления в крейсерском режиме. Описана архитектура системы управления, алгоритм перехода между режимами полёта и этапы экспериментальной отработки. Выявлено, что ключевым элементом разработки является интеллектуальный алгоритм управления, который плавно изменяет ориентацию аппарата и перераспределяет тягу двигателей, обеспечивая устойчивый переход. В крейсерском режиме основная нагрузка ложится на крыло, а двигатели работают на минимуме. Экспериментально показано, что использование программного распределения тяги обеспечивает плавный переход, высокую устойчивость и снижение энергетических потерь по сравнению с традиционными решениями. Предложен подход, в котором отказ от сложной механики в пользу интеллектуального программного управления открывает путь к созданию лёгких, надежных и энергоэффективных аппаратов.

Ключевые слова: Беспилотный летательный аппарат, распределение тяги, программное управление, стационарные двигатели, переходный режим, система управления.

THRUST VECTOR CONTROL AIRCRAFT BASED ON A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM

Semin N.A.,¹ Valiev A.I., Akhmetsharipov R.R., Nizamutdinov R.I.

KAZAN NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY A.N. TUPOLEVA – KAI", Kazan, Russia (420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx st., 10), e-mail: ¹ tatcomposite@mail.ru

The paper examines the concept of a small vertical take-off and landing (VTOL) aircraft, which uses software-controlled thrust redistribution between fixed-mounted electric motors for transition between flight modes. An analysis of the main classes of such aircraft was conducted, and a fundamentally new solution was proposed. This solution eliminates mechanical actuators for rotating powerplants and complex transmissions, leading to a reduction in structural mass, an increase in its reliability, and a decrease in energy consumption in cruise mode. The architecture of the control system, the algorithm for transition between flight modes, and the stages of experimental testing are described. It was found that the key element of the development is an intelligent control algorithm, which smoothly changes the vehicle's orientation and redistributes engine thrust, ensuring a stable transition. In cruise mode, the main load is borne by the wing, while the engines operate at a minimum. Experiments demonstrated that the use of software-based thrust distribution ensures a smooth transition, high stability, and reduced energy losses compared to traditional solutions. The proposed approach, which abandons complex mechanics in favor of intelligent software control, paves the way for the creation of lightweight, reliable, and energy-efficient aircraft.

Keywords: unmanned aerial vehicle, thrust distribution, software control, stationary engines, transient mode, control system.

Введение

VTOL (Vertical Take-Off and Landing) — это технология, позволяющая летательному аппарату взлетать и садиться вертикально, без необходимости в протяжённой взлётно-посадочной полосе. Эта способность сочетает в себе маневренность вертолёта со скоростью и эффективностью самолёта, открывая новые горизонты для авиации. Значительный рост интереса к малым летательным аппаратам типа VTOL обусловлен их уникальной способностью совмещать маневренность мультироторных систем в режиме висения с энергоэффективностью самолётной схемы в горизонтальном полёте [1, 2]. Подобные аппараты находят широкое применение в мониторинге, картографии, доставке грузов и поисково-спасательных операциях, формируя устойчивый спрос на компактные и надёжные платформы [3].

Ключевым технологическим вызовом при создании VTOL-аппаратов остается обеспечение плавного и устойчивого перехода между режимами[4]. Существующие решения, такие как мультироторные схемы, аппараты с поворотными двигателями/крыльями или сложной трансмиссией, обладают существенными недостатками: низкой крейсерской эффективностью, повышенной массой, сложностью конструкции и наличием «точек отказа» [5].

В данной статье рассматривается актуальная задача разработки VTOL-аппарата, в котором переход между режимами осуществляется бесприводным методом — исключительно за счёт интеллектуального программного регулирования тяги стационарных двигателей.

Целью исследования является разработка и экспериментальная проверка алгоритмической системы управления, обеспечивающей автоматический и устойчивый переход между режимами полёта. Критериями разработки являются: достижение оптимального коэффициента аэродинамического качества на крейсерском режиме, снижение массы силовой механической части по сравнению с решениями на поворотных механизмах, и обеспечение наработки на отказ за счет упрощения конструкции.

Материал и метод исследования.

Предлагаемый летательный аппарат реализует принципиально новый подход, основанный на алгоритмическом управлении стационарной силовой установкой.

Активный поиск оптимальной конструкции малых VTOL-аппаратов наталкивается на фундаментальные недостатки трёх доминирующих схем.

1. Мультикоптеры (Рисунок 1а). Обладая идеальной управляемостью в режиме висения, они оказываются крайне неэффективными в горизонтальном полёте. Высокое аэродинамическое сопротивление и постоянная работа всех винтов для создания подъёмной силы катастрофически снижают дальность и время полета, делая их непригодными для протяжённых миссий.

2. Аппараты с поворотными механизмами (двигателями или крыльями, Рисунок 1б). Эта схема решает проблему крейсерского полёта, но порождает новые. Сложные сервоприводы и подвижные узлы значительно утяжеляют конструкцию, снижают её надёжность и создают «единичные точки отказа», что недопустимо для беспилотных систем.

3. Аппараты с трансмиссией (Рисунок 1в). Использование единого двигателя и механической коробки передач для перераспределения мощности — ещё один путь, ведущий в тупик сложности. Такие системы получаются громоздкими, труднонастраиваемыми и часто демонстрируют нестабильность при переходе между режимами.

Анализ показывает: необходима конструкция, обеспечивающая устойчивый переход между режимами без механических преобразований, с максимальной надёжностью и минимальным весом.

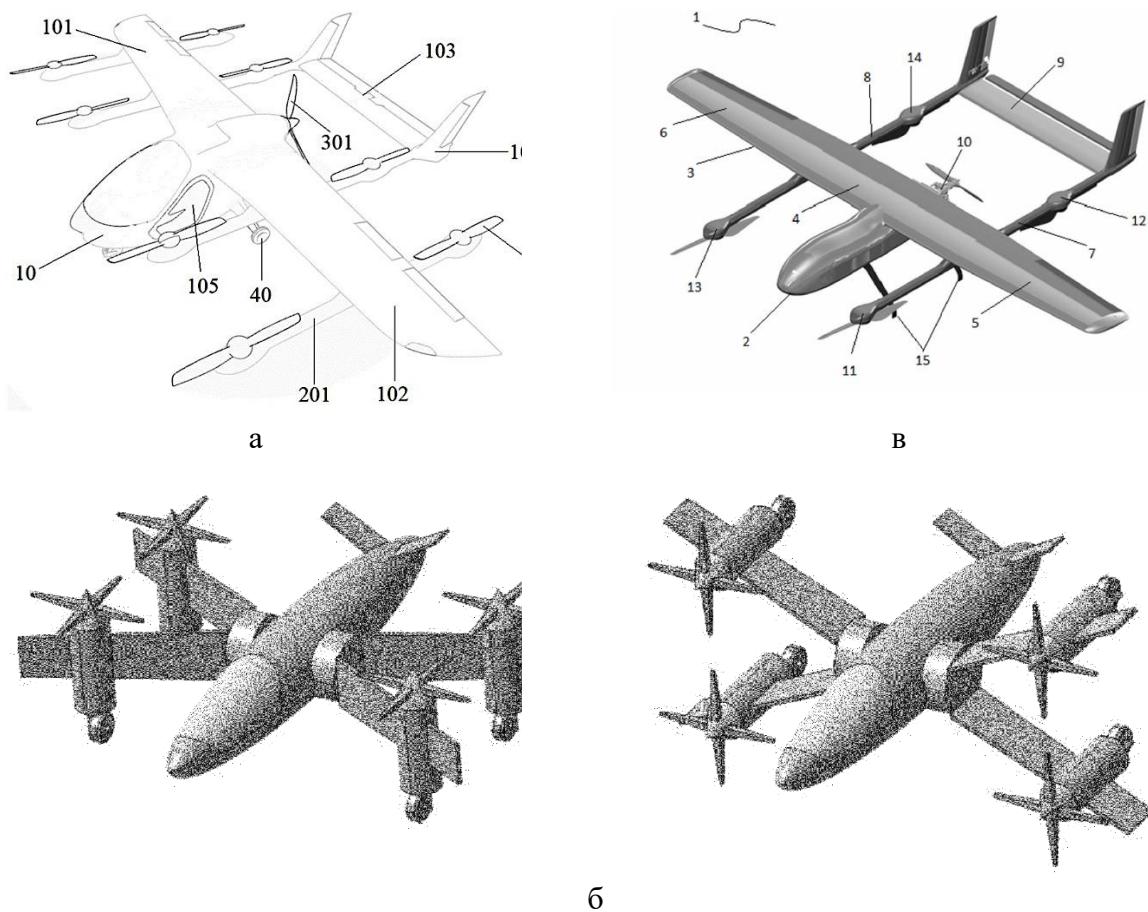


Рисунок 1 – а) конструкция мультироторного аппарата,
б) летательный аппарат с конструкцией поворотной рамы,
в) летательный аппарат с трансмиссией

Результаты исследования и их обсуждение.

В разработанном VTOL-аппарате переход между висением и горизонтальным полётом осуществляется исключительно за счёт программного перераспределения тяги между стационарно закреплёнными электродвигателями.

Ключевые компоненты конструкции:

- аэродинамический планер: Фюзеляж и крыло классической схемы, оптимизированные для полёта с высоким аэродинамическим качеством.
- статичная силовая установка: Четыре и более электродвигателя с винтами, жёстко закреплённые на фюзеляже симметрично относительно центра масс.

- интеллектуальная система управления: «Мозг» аппарата, включающий датчики (IMU, GPS), вычислительные модули и алгоритмы, которые в реальном времени управляют оборотами каждого двигателя.

Главное преимущество — полное отсутствие поворотных механизмов и трансмиссий.

Это радикально снижает массу, упрощает производство и повышает отказоустойчивость.

Управление построено на комбинации дифференциальной тяги двигателей и аэродинамических поверхностей. В режиме висения аппарат работает как классический квадрокоптер, но без физического наклона роторов. Наклон по крену и тангажу создаётся дисбалансом тяги противоположных двигателей, а поворот по рысканию — разницей в крутящем моменте между парами винтов, врачающихся в разных направлениях.

Общий вид реализованного летательного аппарата с программно-управляемым распределением тяги представлен на Рисунке 2.

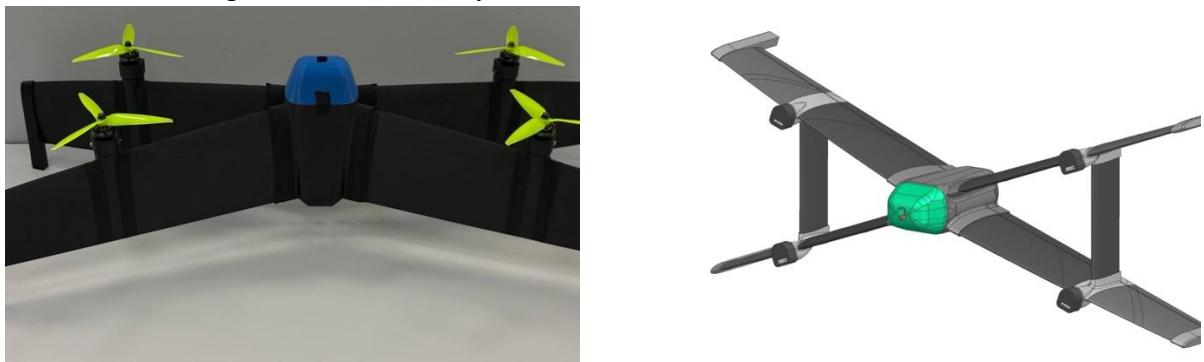


Рисунок 2 - Летательный аппарат с программно-управляемым распределением тяги вертикального взлёта и посадки

Ключевой этап — переходный режим. Именно здесь проявляется мощь программного подхода. Алгоритм плавно выполняет четыре фазы:

1. Инициирование: система слегка наклоняет аппарат, увеличивая тягу задних двигателей.
2. Разгон: появившаяся горизонтальная составляющая тяги разгоняет аппарат.
3. Перераспределение нагрузки: с ростом скорости крыло начинает создавать подъёмную силу. Алгоритм, отслеживая это, плавно снижает тягу двигателей, экономя энергию.
4. Крейсерский полёт: в горизонтальном полёте двигатели работают на минимуме, а управление осуществляется в основном аэродинамическими рулями. Двигатели используются для тонкой коррекции.

Обратный переход для посадки происходит симметрично: снижение скорости, увеличение тяги двигателей для компенсации потери подъёмной силы крыла и вывод аппарата в вертикальное положение.

Разработка велась итеративно, через серию усложняющихся прототипов:

- наземный демонстратор подтвердил саму возможность стабилизации и управления только за счёт дифференциальной тяги.
- летающий прототип без крыла выявил проблему высокого сопротивления.
- прототип с крылом столкнулся с неустойчивостью из-за разного обтекания передних и задних винтов.

- оптимизированная версия, где двигатели были перенесены ближе к центру масс на фюзеляж, окончательно решила проблему. Это обеспечило равные условия их обтекания и сделало переход стабильным и предсказуемым.

Перенос двигателей на фюзеляж не только решил проблему устойчивости, но и позволил исследовать эффекты аэродинамической интерференции.

В режиме висения поток от винтов, обтекающий центральную часть фюзеляжа, создаёт дополнительную «виртуальную подушку», несколько повышая статическую устойчивость.

На переходном режиме было зафиксировано явление взаимного влияния передних и задних винтов: при определённых углах атаки задние винты попадали в частично закрученный поток от передних. Разработанный алгоритм был доработан для учёта этого эффекта через предиктивную коррекцию оборотов задних двигателей на основе текущего угла тангажа и режима работы передних.

В крейсерском режиме расположение винтов в одной плоскости с фюзеляжем позволило добиться эффекта аэродинамической «маскировки»: мотогондолы выполняют роль своеобразных наплыпов, улучшая обтекание хвостовой части и снижая общее сопротивление.

Выходы:

Представленная концепция VTOL-аппарата с программным управлением тягой доказывает свою состоятельность:

1. Отказ от механических систем наклона позволил создать лёгкую, надежную и энергоэффективную платформу, потребляющую в крейсерском режиме меньше количества энергии.
2. Перспективы развития лежат в области совершенствования интеллекта системы. Следующим шагом станет внедрение аддитивных и нелинейных алгоритмов управления, которые позволяют аппарату уверенно противостоять сильной турбулентности и порывистому боковому ветру, открывая дорогу для его применения в самых сложных условиях.

Список литературы

1. Пат. 214190098U КНДР. Самолёт с вертикальным взлётом и посадкой / Хуан Цзяцзи, Хуан Юэ Вэй, Цзян Яньмин [и др.], заявитель и патентообладатель Hubei Jili Taili Flying Car Co ltd, Zhejiang Geely Holding Group Co Ltd — № 202022260455, заявл. 10.12.2020, опубл. 14.09.2021. — 12 с.
2. Пат. US20200156785A1 Соединенные Штаты Америки. Модульный летательный аппарат вертикального взлёта и посадки с дистанционным управлением и реконфигурируемой системой / Jeffrey Kyle G., Pranay Sinha заявитель и патентообладатель Delhivery Robotics LLC. — № 16/524 008, заявл. 27.07.2019, опубл. 16.08.2022. — 18 с.
3. Пат. 2462542 С2 Российская Федерация. Установка для получения ленты из расправляемого армирующего жгута / К. А. Бабаев, С. Н. Деб, И. Л. Машковцев [и др.], заявитель и патентообладатель Российский университет дружбы народов (РУДН). — № 2011102077/12, заявл. 20.01.2011, опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28. — 7 с.
4. Пат. 20110097543 A1 Соединенные Штаты Америки. Многослойные нетканые материалы и способ их изготовления / Arora Kedar S., McAmish Larry C., Tan Lihua [и

- др.]; заявитель и патентообладатель Fiberweb, Inc. — № 12/664,418 , заявл. 15.12.2008, опубл. 28.04.2011. — 25 с.
5. Пат. 2008045623 А Япония. Установка для расправления углеродного жгута / С. Н. Деб, И. Л. Машковцев, Ю. В. Бельчаков [и др.], заявитель и патентообладатель Российский университет дружбы народов (РУДН). — № 2008-45623, заявл. 20.02.2007, опубл. 28.02.2008. — 8 с.

References

1. Patent 214190098U DPRK. Vertical takeoff and landing aircraft / Huang Jiaji, Huang Yue Wei, Jiang Yanming [et al.]; applicant and patent holder Hubei Jili Taili Flying Car Co ltd, Zhejiang Geely Holding Group Co Ltd — No. 202022260455; filed 10.12.2020; published 14.09.2021. — p.12
 2. Patent US20200156785A1 United States of America. Modular vertical takeoff and landing aircraft with remote control and a reconfigurable system / Jeffrey Kyle G., Pranay Sinha, applicant and patent holder Delhivery Robotics LLC. — No. 16/524 008; declared 27.07.2019; published 16.08.2022. — p.18
 3. Patent. 2462542 C2 Russian Federation. Installation for producing tape from straightened reinforcing tow / K. A. Babaev, S. N. Deb, I. L. Mashkovtsev [et al.]; applicant and patent holder Peoples' Friendship University of Russia (RUDN). — No. 2011102077/12; declared 20.01.2011; published 10.10.2012, Bulletin No. 28. — p.7
 4. Patent. 20110097543 A1 United States of America. Multilayer nonwoven materials and the method of manufacturing them / Arora Kedar S., McAmish Larry C., Tan Lihua [et al.]; applicant and patent holder Fiberweb, Inc. — No. 12/664,418; declared 15.12.2008; published 28.04.2011. — p.25
 5. Patent. 2008045623 A Japan. Installation for straightening carbon tow / S. N. Deb, I. L. Mashkovtsev, Yu. V. Belchakov [et al.]; applicant and patent holder Peoples' Friendship University of Russia (RUDN). — No. 2008-45623; declared 20.02.2007; published 28.02.2008. — p.8.
-