

Научная статья



УДК 654.165

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42>

EDN:DDIGSG

Методика выбора платформы-носителя и оценки времени висения БПЛА для задач оперативного развертывания связи

✉ Вячеслав Сергеевич Иванов, Ivanovmirea1@yandex.ru

МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, 119454, Российская Федерация

Аннотация

Целью исследования является выбор и обоснование летно-технических характеристик беспилотной платформы для интеграции с портативной ретрансляционной станцией в целях создания мобильных сетей связи.

Актуальность задачи обусловлена растущей потребностью в надежных и гибких системах связи при ликвидации последствий широкого спектра чрезвычайных ситуаций, а также для обеспечения связью временных объектов, удаленных или труднодоступных районов. Скорость и автономность развертывания становятся критическими факторами эффективности действий аварийно-спасательных служб.

Методология работы включает сравнительный анализ рынка электрических БПЛА по критериям грузоподъемности и времени полета, а также детальный аэродинамический расчет времени висения с учетом массы, энергопотребления полезной нагрузки, температуры и ветра.

Результат. Установлено, что легкие коммерческие БПЛА не обладают необходимой грузоподъемностью для транспортировки стандартного ретрансляционного оборудования массой 3–10 кг. Показано, что наиболее подходящими носителями являются тяжелые сельскохозяйственные дроны. На основе проведенных расчетов выявлена и проанализирована нелинейная зависимость времени висения от массы полезной нагрузки, демонстрирующая ее критическое влияние на продолжительность работы комплекса. Главный вывод заключается в том, что для существенного увеличения времени работы и расширения операционных возможностей комплекса необходима целенаправленная миниатюризация и оптимизация энергопотребления ретрансляционного оборудования.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритмического подхода к формированию конфигурации мобильного ретрансляционного комплекса и установлении количественной нелинейной зависимости времени висения от массы полезной нагрузки для тяжелых сельскохозяйственных БПЛА.

Практическая значимость результатов исследования состоит в предоставлении инженерам и проектировщикам основанной методики для выбора конкретной платформы-носителя и совместного ретрансляционного оборудования. Разработанные рекомендации и алгоритм выбора позволяют сформировать работоспособный, экономически эффективный комплекс, готовый к оперативному развертыванию силами МЧС, служб охраны правопорядка и другими подразделениями, решающими задачи в условиях дефицита времени и разрушенной инфраструктуры.

Ключевые слова: БПЛА, ретранслятор, мобильная система связи, квадрокоптер, радиосвязь

Ссылка для цитирования: Иванов В.С. Методика выбора платформы-носителя и оценки времени висения БПЛА для задач оперативного развертывания связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 6. С. 34–42. DOI:[10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42](https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42). EDN:DDIGSG

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42>

EDN:DDIGSG

Methodology for Selecting a Carrier Platform and Estimating the Vertical Vision Time of an UAV for Operational Deployment of Communications

 Vyacheslav S. Ivanov, Ivanovmirea1@yandex.ru

MIREA – Russian Technological University,
Moscow, 119454, Russian Federation

Annotation

The purpose of the study is to select and justify the flight and technical characteristics of an unmanned platform for integration with a portable relay station in order to create mobile communication networks.

The relevance of this task is due to the need for prompt restoration of communication during the elimination of the consequences of emergencies, when the stationary infrastructure is damaged.

The methodology of the work includes a comparative analysis of the market of electric UAVs by the criteria of load-lifting and flight time, as well as a detailed aerodynamic calculation of the hovering time, taking into account the mass and energy consumption of the payload.

Results. It has been established that light commercial platforms do not have the necessary load capacity for standard repeaters. It has been shown that heavy agricultural UAVs are capable of carrying repeaters weighing up to 10 kg. Based on the analysis of the obtained non-linear dependence of flight time on load weight, it has been concluded that the miniaturization of repeaters is critical.

The scientific novelty of the work lies in the development of an algorithmic approach to configuring a mobile relay complex and establishing a quantitative non-linear dependence of the hovering time on the payload mass for heavy agricultural UAVs.

The practical significance of the results is to substantiate the choice of a specific carrier platform and relay equipment for creating an operational complex suitable for rapid deployment by emergency services and other forces.

Keywords: UAV, repeater, mobile communication system, quadrocopter, radio communication

For citation: Ivanov V.S. Methodology for Selecting a Carrier Platform and Estimating the Vertical Vision Time of an UAV for Operational Deployment of Communications. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(6):34–42. (in Russ.) DOI:[10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42](https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-6-34-42). EDN:DDIGSG

Введение

Беспилотные летательные аппараты перестали быть узкоспециализированным инструментом и прочно вошли в арсенал современных технологий, трансформируя подходы к решению задач в самых разных отраслях. Сегодня с их помощью эффективно решаются задачи мониторинга сельскохозяйственных угодий, выполнения аэрофотосъемки и картографии, инспекции промышленных объектов, доставки грузов и проведения поисково-спасательных операций. Особое место занимает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сфере телекоммуникаций и радио-

связи. Возможность быстро поднять антенну или целый ретранслятор на значительную высоту делает их идеальным инструментом для создания мобильных сетей связи. Это критически важно при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (лесные пожары, наводнения, землетрясения), когда стационарная инфраструктура выведена из строя; для обеспечения связи на массовых мероприятиях или при проведении работ в удаленных районах, не охваченных стабильным покрытием. Ключевой проблемой при создании подобных комплексов является необходимость подъема полезной нагрузки (радиооборудования), обладаю-

щего значительным весом и энергопотреблением. Это выдвигает жесткие требования к грузоподъемности и времени полета платформы-носителя. Целью данной работы является выбор оптимальной летной платформы и расчет ее летно-технических характеристик для интеграции с портативной ретрансляционной станцией.

Потенциал БПЛА как платформ связь активно изучается как академическими учреждениями, так и коммерческими компаниями. В научной литературе рассматриваются различные аспекты этой задачи, включая оптимизацию размещения БПЛА-ретрансляторов для максимизации зоны покрытия [1], управление группировками дронов для создания устойчивых самоорганизующихся сетей [2] и проблемы энергоэффективности [3]. Известны практические реализации: например, проект Facebook Aquila был нацелен на создание высотного БПЛА на солнечной энергии для предоставления интернета в удаленных регионах. Компания Google Loon использовала стратостаты, однако концепция использования летательных аппаратов для связи схожа. В коммерческом сегменте компаний, такие как American Robotics и Sharper Shape, интегрируют модули связи в свои промышленные БПЛА для инспекции критической инфраструктуры. В начале марта 2025 г. чешская компания Primoco UAV SE представила беспилотный летательный аппарат с интегрированными мобильными базовыми станциями. Модель Primoco One 150 предназначена для создания временной зоны покрытия мобильной связи в труднодоступных районах, на массовых мероприятиях и в зонах чрезвычайных ситуаций (<https://clck.ru/3QkKev>). Существуют отечественные и зарубежные решения, основанные на «привязных» БПЛА, способных обеспечивать связь в заданном районе на протяжении суток. Ученые Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН разработали БПЛА «Альбатрос», который может находиться в воздухе 24 часа и поднимать 10 кг полезной нагрузки на высоту до 100 м [4]. В 2023 г. на выставке «Навигация и связь в особых условиях» компания «Беспилотные системы» представила дрон с оборудованием для доступа к сотовой связи. Заявлено, что беспилотник может подниматься на высоту около 100 м (питание он получает от источника по кабелю, поэтому в воздухе БПЛА может находиться днями и даже неделями), где принимает сигнал от удаленных базовых станций и ретранслирует его в радиусе до 100 км (<https://www.ixbt.com/news/2023/03/23/v-rossii-pokazali-letajushuju-bazovuju-stanciju-onamozhet-obespechit-dostup-k-mobilnoj-seti-v-radiusе-do-100-km.html>). DJI Matrice 600 использует сразу 6 интеллектуальных аккумуляторов и систему управления электропитанием, что обеспечивает быструю настройку и максимальную производи-

тельность платформы. БПЛА не может летать на большие расстояния во время сцепки с платформой питания, при этом он может автономно выполнять поставленные ему задачи на протяжении долгого времени (<https://www.karneev.com/staty/privayznye-bpla-vs-avtonomnye-bpla-sravnenie-tehnologiy-i-oblastery-primeneniya/?ysclid=mih9eh54b183032352>). Однако их применение все равно ограничено рельефом местности, так как система обеспечения питания находится на передвижной наземной станции [5].

В Российской Федерации интерес к подобным системам также высок, что связано с наличием обширных территорий со слаборазвитой телекоммуникационной инфраструктурой и потребностями силовых ведомств [6]. Ключевой проблемой, объединяющей все эти исследования и разработки, является необходимость подъема полезной нагрузки (радиооборудования), обладающего значительным весом и энергопотреблением. Это выдвигает жесткие требования к грузоподъемности и времени полета платформы-носителя, а также к оптимальному выбору и конфигурации целевого оборудования.

Мобильный комплекс оперативного развертывания системы связи состоит из четырех блоков (рисунок 1): несущей платформы, ретрансляционного блока, дополнительного оборудования, наземного сегмента.



Рис. 1. Структурная схема комплекса

Fig. 1. Block Diagram of the Complex

Несущая платформа – квадрокоптер с системой питания и полетным контроллером, необходимым для управления полетом с наземной станции.

Ретрансляционный блок – ретранслятор с антенной, обеспечивающий прием и передачу сигнала, а также микроконтроллер, который осуществляет сбор данных и переключение режимов работы ретранслятора.

Дополнительное оборудование – кронштейны, предназначенные для крепления ретрансляционного блока, а также различные кабели: силовые, кабели данных, коаксиальные кабели.

Наземный сегмент – станция, управляющая полетом коптера и отслеживанием телеметрии, портативные и мобильные абонентские радиостанции.

Обзор и анализ электрических БПЛА

Для выбора оптимальной платформы был проведен анализ рынка российских и зарубежных электрических мультироторных БПЛА по следующим критериям: максимальная грузоподъемность (WLL, *аббр. от англ. Working Load Limit*), примерное время полета с максимальной нагрузкой (T_{\max}), надежность, доступность и стоимость (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Характеристики моделей коптеров компании

TABLE 1. Characteristics Copter Models

Модель БПЛА	Производитель	WLL, кг	T_{\max} , мин.	Цена, руб.
DJI Matrice 30	DJI (Китай)	1,6	~40	~700 000
DJI Matrice 350 RTK	DJI (Китай)	2,7	~55	~1350 000
DJI Agras T30	DJI (Китай)	30	~10	~1800 000
DJI Agras T40	DJI (Китай)	40	~12	~2400 000
Альбатрос D5	Альбатрос (Россия)	8	~15	~1800 000
Кошеч	Доминанта (Россия)	20	~10	~150 000
Агди 30	Агродинамика (Россия)	39	~15	~1500 000
VECTOR AGR HD 580	Агро Технологии (Россия)	80	~6,5	~3200 000

DJI Matrice 30 обеспечен складной конструкцией, позволяющей осуществить быстрое развертывание. К недостаткам можно отнести меньшее время полета по сравнению с M350 RTK. Используется для оперативных работ в сложных и чрезвычайных ситуациях: поисково-спасательные операции (ПСР), патрулирование, инспекции.

DJI Matrice 350 RTK отличается высочайшей надежностью и точностью за счет наличия RTK-модуля, который обеспечивает сантиметровую точность позиционирования. Из минусов можно отметить сравнительно невысокую грузоподъемность для своего класса. Применяется в задачах для картографии, топографии, инспекции объектов.

DJI Agras T30 отличается низкой стоимостью по сравнению с T40. При этом грузоподъемность и максимальное время полета также меньше – 10 мин. с полезной нагрузкой 30 кг. Используется для сельскохозяйственных работ на средних по площади полях. Оптимальен для фермерских хозяйств, где не требуется максимальная производительность T40.

DJI Agras T40 имеет большую грузоподъемность – 40 кг. Полностью защищен от воздействия агрес-

сивных химикатов. Из недостатков можно выделить очень короткое время полета на одной зарядке (10–12 мин.), большую массу. Применяется для высокоеффективного и точного внесения жидких и твердых средств защиты растений, удобрений на больших площадях в агробизнесе.

Альбатрос D5 отличается дальностью действия до 50 км и продолжительностью полета до 1 ч. Главная сфера применения – точная доставка специализированных модулей в заранее заданную точку в условиях, где критически важны оперативность развертывания, скрытность и минимальная зависимость от наземной инфраструктуры.

Кошеч выделяется в своем классе модульной архитектурой, заточенной под многоразовое использование. Основная сфера применения платформы – выполнение задач, где критически важна доставка специализированного модуля к заданным координатам с последующим возвратом базовой системы. Имеет невысокую стоимость и большую грузоподъемность для своего класса (20 кг).

Агди 30 – шестивинтовой гексакоптер, обеспеченный пропеллерами радиусом 22,5 дюйма, что обеспечивает высокую стабильность и подъемную силу. К недостаткам можно отнести значительное сокращение времени полета при увеличении полезной нагрузки. Используется для продолжительного мониторинга, аэрофотосъемки и наблюдения в условиях, где важна максимальная продолжительность полета без нагрузки.

Vector HD 580 – квадрокоптер с большими пропеллерами (31 дюйм), отличающийся высокой эффективностью и минимальным падением времени полета при увеличении нагрузки. К недостаткам можно отнести меньшее количество двигателей, что снижает резервирование системы по сравнению с гексакоптерами. Применяется для точных инспекционных работ, картографирования и задач, где важна стабильность полета при средней и высокой полезной нагрузке.

Исходя из проведенного анализа, необходимо определить требования, предъявляемые к выбору коптера:

- грузоподъемность (коптер должен поднять в воздух ретрансляционное оборудование и находиться с ним требуемое время в воздухе);

- время полета (целесообразно выбрать БПЛА, который сможет обеспечить связь продолжительное время);

- цена (наименьшая стоимость коптера, способного выполнить поставленные задачи, будет дополнительным плюсом).

Для выбора платформы-носителя необходимо определиться с целевой нагрузкой – ретранслятором УКВ-диапазона (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Сравнительные характеристики портативных ретрансляторов УКВ-диапазона
TABLE 2. Comparative Characteristics of Portable VHF Repeaters

Модель	Производитель	Диапазон частот, МГц	Выходная мощность, Вт	Масса, кг	Потребляемый ток (в режиме передачи), А	Стандарт защиты
Motorola SLR 1000	Motorola Solutions (США)	136–174 / 400–527	5 / 10 (выбор)	4,5	~1,5	IP 57
Kirisun DR700	Kirisun (Китай)	136–174 / 400–470	5 / 10 (выбор)	~3,0	~1,7	IP 55
Terек PT-2800 DMR	ИШМ (Россия)	136–174 / 400–470	10	~8,5	~2,5	IP 67
Hytera HR-655	Hytera (Китай)	136–174 / 400–470	5 / 10 / 15 (выбор)	~4,5	~2,8	IP 54

К данному оборудованию предъявляется ряд жестких требований, обусловленных спецификой применения на БПЛА [7]:

– масса и габариты (оборудование должно быть максимально легким и компактным, чтобы не превышать лимиты полезной нагрузки дрона и не ухудшать его аэродинамику);

– энергопотребление (ретранслятор должен потреблять минимальную мощность, так как он питается от бортовых аккумуляторов БПЛА, что напрямую влияет на время полета);

– надежность и автономность (аппаратура должна быть рассчитана на работу в широком диапазоне температур, вибрационных нагрузках и не требовать постоянного вмешательства оператора);

– функциональность (достаточная выходная мощность (5–10 Вт) для создания зоны покрытия приемлемого радиуса и поддержка необходимых функций).

Kirisun DR700 имеет важное преимущество – масса составляет всего 3 кг. При этом корпус устойчив к дождю, ветру и влажности. Терек PT-2800 DMR обладает наивысшей степенью защиты среди рассматриваемых моделей, однако большая масса затрудняет его использование. Motorola SLR 1000 и Hytera HR-655 не отличаются друг от друга по весу, однако имеют разные степени защиты, первая модель тут предпочтительнее. Исходя из выбранных ретрансляторов, можно сделать вывод, что БПЛА DJI Matrice 350 RTK и DJI Matrice 30 не подходят для решения поставленной задачи из-за малой грузоподъемности. Проведем более подробный сравнительный анализ характеристик и теоретический расчет времени висения четырех моделей, имеющих наибольшую грузоподъемность: БПЛА DJI Agras T30, DJI Agras T40, Агди 30, Vector HD 580, а также рассмотрим характеристики полезной нагрузки (таблица 3).

ТАБЛИЦА 3. Характеристики платформ-носителей

TABLE 3. Characteristics of Platforms

Параметры/платформы-носители	DJI Agras		Агди 30	Vector HD580
	T30	T40		
Максимальная взлетная масса, кг	76,5	101	67	150

Параметры/платформы-носители	DJI Agras		Агди 30	Vector HD580
	T30	T40		
Собственная масса (без АКБ), кг	26,4	38	27,5	41
Масса двух аккумуляторов, кг	20,2 (аккумуляторы BAX501)	24 (аккумуляторы BAX601)	18,2 (аккумуляторы tattu 14S)	27 (аккумуляторы 18S)
Максимальная полезная нагрузка, кг	30	40	30	80
Емкость АКБ, мАч	29000	30000	28000	30000
Напряжение АКБ, В	51,8	52,2	53,2	68,4
Энергия АКБ, Вт*ч	3004	3132	2979,2	4104

Примечание: АКБ – аккумуляторная батарея

Расчет времени висения

Рассмотрим ключевые характеристики потенциальных платформ-носителей:

Расчет энергии аккумуляторных батарей проводится по формуле:

$$E = \frac{C * V}{1000}, \quad (1)$$

где C – емкость АКБ (мАч); V – напряжение АКБ (мАч).

Время нахождения коптера в воздухе зависит от множества технических и внешних параметров и состоит из времени, затраченного на взлет и посадку, перелет и маневры. К внешним параметрам относятся:

– погодные условия (ветер, температура воздуха, осадки);

– рельеф и высота полета (высота над уровнем моря и турбулентность);

– режим полета (скорость полета, динамика маневров, полет до точки или висение в точке).

Расчет мощности, потребляемой для создания подъемной силы, основан на фундаментальных аэродинамических соотношениях для роторных систем [8]. Общий подход к энергетическому балансу и оценке времени полета электрических БПЛА подробно рассмотрен в [9]. Методика учета

разрядных характеристик литий-полимерных аккумуляторов соответствует принципам, изложенным в современных исследованиях.

Проведем расчет времени висения коптера в точке без учета времени, затраченного на взлет и посадку, перелет и маневры. Подробно опишем расчет для коптера DJI Agras T30, ретранслятора Motorola SLR 1000.

1) Расчет полной массы:

$$m = m_b + m_r + m_k = 46,6 + 4,5 + 0,5 = 51,6 \text{ кг}, \quad (2)$$

где m_b – масса БПЛА и аккумуляторов (кг); m_r – масса ретранслятора и антенны (кг); m_k – масса крепежной системы (кронштейн, кабели) $\sim 0,5$ кг.

2) Расчет требуемой тяги и мощности. В режиме висения тяга равна весу аппарата (<https://clck.ru/3QkKev>):

$$T = m * g = 51,6 * 9,8 = 505,6 \text{ Н}, \quad (3)$$

где m – полная масса (кг); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

Мощность, которую двигатели должны передать воздуху, можно рассчитать по формуле:

$$P_m = \frac{T^{3/2}}{\sqrt{2 * \rho * S * \eta_v}} \frac{11405,5}{2 * 1,225 * 0,729 * 6 * 0,7} = 4960 \text{ Вт}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$); η_v – коэффициент полезного действия винтов $\sim 0,7$; S – площадь, ометаемая пропеллерами (м^2):

$$S = \pi * R^2 = 3,14 * 0,4822 = 0,729, \quad (5)$$

где R – радиус одного винта; если винтов несколько, учитывается суммарная площадь.

3) Электрическая мощность, потребляемая от аккумулятора (Вт):

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_d * \eta_e} = \frac{4960}{0,7} = 7086, \quad (6)$$

где η_d – коэффициент полезного действия (КПД) двигателей; η_e – КПД регуляторов оборотов (ESC, *аббр. от англ. Electronic Speed Controller*); общий КПД системы (двигатель + ESC) часто находится в диапазоне 60–75 % (0,6–0,75).

4) Общая электрическая мощность с учетом полезной нагрузки (Вт):

$$P_{\text{общ}} = P_e + P_h = 7086 + 100 = 7186, \quad (7)$$

где P_h – мощность, потребляемая полезной нагрузкой (Вт).

5) Расчет среднего тока потребления (А):

$$I = \frac{P_{\text{общ}}}{U} = \frac{7186}{51,8} = 138,7 = 7186, \quad (8)$$

где U – номинальное напряжение аккумуляторной батареи (В).

6) Расчет времени висения в точке:

$$t = \frac{C * \kappa}{I} * 60 = \frac{58000 * 0,8}{1387800} * 60 = 20,06 \text{ мин.}, \quad (9)$$

где C – емкость аккумулятора (мАч); κ – коэффициент разряда аккумулятора $\sim 0,8$; I – средний ток потребления (мА).

Проведем дополнительный расчет, учитываящий влияние внешних факторов на БПЛА, а именно температуры и ветра. Температура, в первую очередь, влияет на плотность воздуха и на эффективность аккумуляторов.

Плотность воздуха рассчитаем по формуле:

$$\rho = \frac{P}{R * T}, \quad (10)$$

где P – атмосферное давление (Па); R – удельная газовая постоянная для сухого воздуха, равная 287,05 Дж/(кг·К); T – абсолютная температура в Кельвинах ($T = t^\circ\text{C} + 273,15$).

В таблице 4 приведены расчеты времени висения, мощности, передаваемой воздуху двигателями, электрической мощности и общей электрической мощности с учетом полезной нагрузки, а также теоретические значения температурного коэффициента, снижаемого емкость аккумуляторов. Температурный коэффициент емкости k_t – это безразмерный параметр, характеризующий относительное изменение доступной электрической емкости электрохимического источника тока при отклонении температуры от номинального значения. Значения температурного коэффициента взяты из экспериментальных данных для литий-ионных аккумуляторов [10]. При снижении температуры до -20°C доступная емкость падает до 60–65 % от номинальной, при 0°C составляет 80–85 %, а при повышенных температурах ($+45^\circ\text{C}$) наблюдается незначительное снижение – до 95–98 %.

ТАБЛИЦА 4. Значения времени висения при разных температурах

TABLE 4. Hanging Time Values at Different Temperatures

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	τ	$P_m, \text{Вт}$	$t_\theta, \text{мин.}$	$t^*, \%$
-30	1,453	0,5	4554	10,91	-45,1
-20	1,395	0,6	4648	12,83	-35,5
-10	1,342	0,7	4739	14,69	-26,1
0	1,293	0,8	4828	16,48	-17,1
10	1,247	0,9	4916	18,21	-8,44
20	1,204	1	5003	19,89	0
30	1,164	1	5089	19,56	-1,65

Условные обозначения: t – температура; ρ – плотность воздуха; τ – температурный коэффициент; P_m – мощность, передаваемая воздуху двигателями; t_θ – время висения; t^* – изменение относительно значений при температуре 20°C

Формула расчета времени висения, учитывая температурный коэффициент, имеет вид:

$$t = \frac{C * k * k_t}{I} * 60. \quad (11)$$

Для расчета времени висения БПЛА с учетом встречного ветра необходимо рассчитать индуцированную скорость:

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2 * \rho * S}}. \quad (12)$$

Это скорость воздуха при прохождении через несущий винт, которая изменяется на диске винта в зависимости от условий полета.

Затем проводится расчет мощности, требуемой для висения в ветровых условиях:

$$P_B = P_m \sqrt{1 + \frac{v^2}{v_i^2}}; v_i = \sqrt{\frac{T}{2 * \rho * S}}, \quad (13)$$

где v – скорость встречного ветра (м/с).

Формула для расчета электрической мощности примет вид:

$$P_3 = \frac{P_B}{\eta_d * \eta_e}. \quad (14)$$

В таблице 5 приведены расчеты времени висения и мощности, необходимой для висения в воздухе.

ТАБЛИЦА 5. Значения времени висения при различных скоростях ветра

TABLE 5. Values of Hovering Time at Different Wind Speeds

v , м/с	P_B , Вт	t_B , мин	t^{**} , %
0	4960	20,06	0
5	5175	19,24	-12,86
10	5771	17,28	-13,85
15	6646	15,02	-25,1

Условные обозначения: v – скорость ветра; P_B – мощность, требуемая для висения; t^{**} – изменение относительно значений при ветре 0 м/с, °С

Расчеты демонстрируют, что время висения БПЛА с ретранслятором существенно зависит от внешних условий. Для надежного планирования миссий необходимо учитывать как температурные условия (особенно в холодном климате), так и ветровую обстановку. Также важно принимать во внимание, что приведенные расчеты верны для случаев, когда БПЛА достиг заданной точки. Расчет максимального времени полета с учетом перемещения до точки маневров остался за рамками данной статьи.

В рамках исследования предложен алгоритмический подход к формированию конфигурации мобильного ретрансляционного комплекса (рисунок 2). Процедура выбора начинается с определения системных требований: целевой продолжительности работы в воздухе и объема финансирования

вания. На основе этих данных производится предварительный отбор кандидатов – платформы-носителя и целевой нагрузки. Критическим шагом является верификация соответствия массы оборудования грузоподъемности БПЛА; в случае ее превышения рассматриваются либо облегченные аналоги нагрузки, либо более мощные носители. После этого выполняется расчет теоретического времени висения. Если результат не удовлетворяет техническому заданию, цикл подбора повторяется. Финальным этапом является экономическая валидация выбранной конфигурации на предмет соответствия бюджетным ограничениям.

Проведен расчет зависимости времени висения БПЛА от массы полезной нагрузки. На рисунке 3 видно, что для задач с малой нагрузкой (до 15 кг) экономически целесообразно использовать модель Агди 30. Для работ с средней и высокой нагрузкой (15–30 кг) оптимальным выбором является Vector HD 580 благодаря его устойчивости к увеличению массы. Agras T30 может быть компромиссным решением для смешанных задач при ограниченном бюджете, Agravas T40 не показывает достаточного преимущества в продолжительности полета при полной загрузке для оправдания более высокой стоимости.

Таким образом, миниатюризация полезной нагрузки остается критически важным фактором для увеличения эффективности любой из рассмотренных платформ. Поэтому при выборе платформы-носителя необходимо выбрать решение, которое будет удовлетворять с точки зрения стоимости и доступности на рынке.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает практическую целесообразность использования тяжелых сельскохозяйственных БПЛА: DJI Agras T30, Agras T40, Агди 30 и Vector HG 580 для оперативного развертывания узлов радиосвязи. В отличие от более легких платформ, они способны нести ретрансляционное оборудование массой до 8–10 кг без критического сокращения времени работы.

Расчеты показали, что комплекс на базе модели DJI Agras T30 и ретранслятора массой 4,5 кг способен обеспечить работу в режиме висения в течение 20 мин. С учетом энергозатрат на перелет до точки, практическое время работы составит 11–15 мин., что достаточно для решения ключевых задач в зоне чрезвычайной ситуации.

Безусловно, для практической реализации подобных комплексов необходимо выполнить ряд задач:

- подбор полезной нагрузки, исходя из минимальной массы и энергопотребления;

- закрепление нагрузки так, чтобы не смещать центр тяжести БПЛА за допустимые пределы; крепление должно гасить вибрации от двигателей;

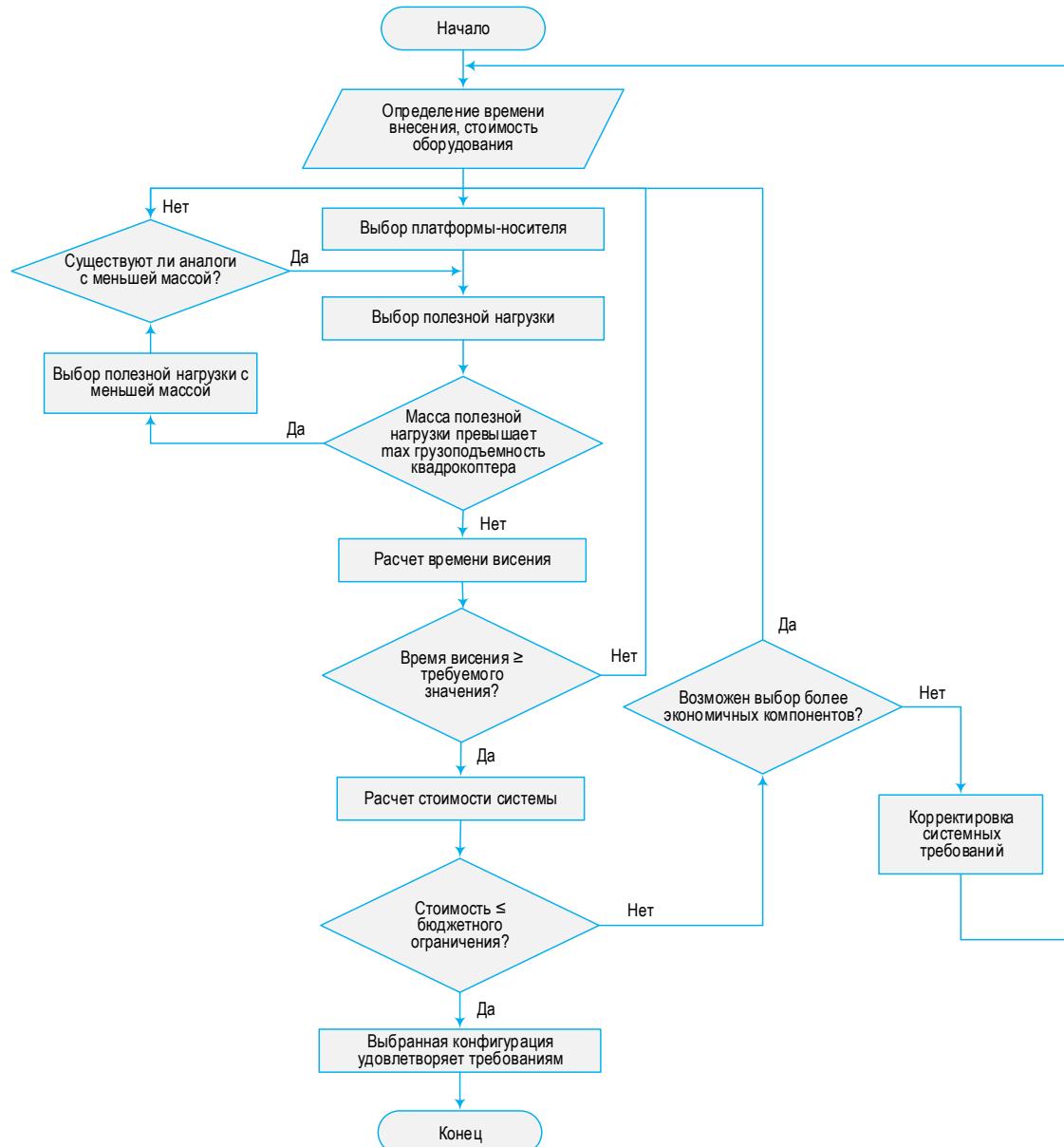


Рис. 2. Алгоритм формирования конфигурации мобильного ретрансляционного комплекса

Fig. 2. Algorithm for Configuring a Mobile Relay Complex

– точное соответствие диапазона частот ре-транслируемым каналам связи, правильно подобрана антенна (коэффициент стоячей волны, диаграмма направленности антенны);

– обеспечение эффективного теплоотвода для ретрансляционного блока; в замкнутом корпусе БПЛА при отсутствии обдува это приводит к перегреву, тепловому пробою и деградации компонентов;

– ретранслятор должен быть экранирован от БПЛА; помехи от регуляторов оборотов могут полностью исказить чувствительный вход приемника УКВ, сделав систему неработоспособной; мощный передатчик УКВ может создавать наводки в цепях управления и питания, вызывая сбои в работе автопилота.

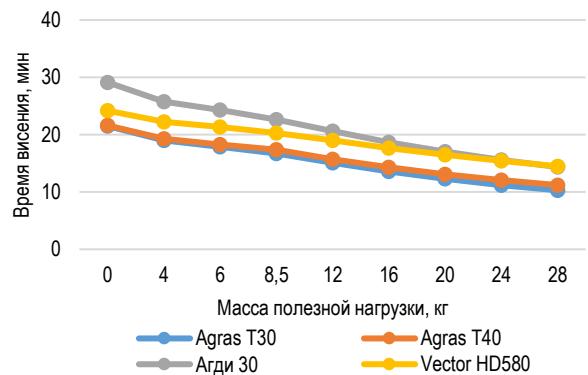


Рис. 3. График зависимости времени висения БПЛА от массы полезной нагрузки

Fig. 3. Graph of UAV Hovering Time Versus Payload Weight

Развитие алгоритмов автономного полета и управления ретрансляцией позволит развертывать сеть связи с минимальным участием оператора, что критически важно в условиях чрезвычайной ситуации. Таким образом, представленное решение расчета времени висения мобильного

ретранслятора является работоспособным и может быть эффективно использовано силами МЧС, охраны правопорядка и другими службами, требующими быстрого развертывания мобильной и гибкой сети связи.

Список источников

1. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage // IEEE Wireless Communications Letters. 2014. Vol. 3. Iss. 6. PP. 569–572. DOI:10.1109/LWC.2014.2342736
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 11. PP. 7574–7589. DOI:10.1109/TWC.2017.2751045
3. Lyu J., Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations // IEEE Communications Letters. 2016. Vol. 21. Iss. 3. PP. 604–607. DOI:10.1109/LCOMM.2016.2633248
4. Бурмистров А. Беспилотник на поводке. Профессор Владимир Вишневский о привязных высотных платформах // Научная Россия. 2024. URL: <https://scientificrussia.ru/articles/bespilotnik-na-povodke-professor-vladimir-visnevskij-o-privaznyh-vysotnyh-platformah> (дата обращения 29.12.2024)
5. Ozdemir U., Aktas Y.O., Vuruskan A., Dereli Y., Tarhan A.F., Demirbag K., et al. Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2014. Vol. 74. PP. 371–393. DOI:10.1007/s10846-013-9900-0. EDN:ZSTJLI
6. Давлюд И.И. Расчет основных эксплуатационных характеристик привязной высотной системы корабельного базирования // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 4. С. 40–50. DOI:10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50. EDN:ECAQGY
7. Чан Т.З., Кучеряный А.Е. Оптимизация использования ресурсов воздушных базовых станций на основе методов искусственного интеллекта // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 1. С. 62–68. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-62-68. EDN:RVENVC
8. Джонсон У. Теория вертолета. Пер. с англ. М.: Издательство «Курьер», 2012. 784 с.
9. Nonami K., Kendoul F., Suzuki S., Wang W., Nakazawa D. Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles. Springer, 2010. 329 p.
10. Wang J., Liu P., Hicks-Garner J., Sherman E., Soukiazian S., Verbrugge M., et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells // Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196. Iss. 8. PP. 3942–3948. DOI:10.1016/j.jpowsour.2010.11.134

References

1. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2014;3(6):569–572. DOI:10.1109/LWC.2014.2342736.
2. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Energy-Efficient Internet of Things Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(11):7574–7589. DOI:10.1109/TWC.2017.2751045
3. Lyu J., Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Placement Optimization of UAV-Mounted Mobile Base Stations. *IEEE Communications Letters*. 2016;21(3):604–607. DOI:10.1109/LCOMM.2016.2633248
4. Burmistrov A. A Drone on a Leash. Professor Vladimir Vishnevsky on Tethered High-Altitude Platforms. *Nauchnaya Rossiya*. 2024. (in Russ.) URL: <https://scientificrussia.ru/articles/bespilotnik-na-povodke-professor-vladimir-visnevskij-o-privaznyh-vysotnyh-platformah> [Accessed 29.12.2024]
5. Ozdemir U., Aktas Y.O., Vuruskan A., Dereli Y., Tarhan A.F., Demirbag K., et al. Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2014;74:371–393. DOI:10.1007/s10846-013-9900-0. EDN:ZSTJLI
6. Davlyud I.I. Calculation of the Main Performance Characteristics of a Tethered High-Altitude Ship-Based System. *Russian Technological Journal*. 2024;12(4):40–50. DOI:10.32362/2500-316X-2024-12-4-40-50. EDN:ECAQGY
7. Tran T.D., Kucheryavy A.E. Resource Optimization of Airborne Base Stations Using Artificial Intelligence Methods. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(1):62–68. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-1-62-68. EDN:RVENVC
8. Johnson W. *Helicopter Theory*. New York: Dover Publications; 1994.
9. Nonami K., Kendoul F., Suzuki S., Wang W., Nakazawa D. *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*. Springer; 2010. 329 p.
10. Wang J., Liu P., Hicks-Garner J., Sherman E., Soukiazian S., Verbrugge M., et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources*. 2011;196(8):3942–3948. DOI:10.1016/j.jpowsour.2010.11.134

Статья поступила в редакцию 07.10.2025; одобрена после рецензирования 05.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

The article was submitted 07.10.2025; approved after reviewing 05.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.

Информация об авторе:

ИВАНОВ Вячеслав Сергеевич	кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств МИРЭА – Российский технологический университет  https://orcid.org/0000-0001-9827-1690
--------------------------------------	--

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.