

## К ПРОБЛЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Тхань Лонг Нгуен<sup>1</sup>, Н. А. Кузин<sup>2</sup>, Н. К. Юрков<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>2</sup> Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

<sup>1</sup>kipra@pngu.ru, <sup>2</sup>sputnik1985nk3y@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как отдельных изделий, так и в комплексе решения сложной многоцелевой задачи обеспечивается развитием техники и технологий. Однако именно множественность вариантов применения БПЛА порождает проблему формирования не избыточной, но достаточной конфигурации каждого отдельного изделия, что связано с проблемой формирования так называемого облика перспективных БПЛА. В работе с учетом принятых начальных условий, ограничений и допущений решена задача оптимизации выбора облика многоцелевой системы БПЛА по признаку стоимости выполнения целевых задач, решаемых в ходе эксплуатации БПЛА. Дается определение базового варианта многоцелевой системы БПЛА в виде набора (вектора) проектных параметров БПЛА, входящих в состав системы. *Материалы и методы.* Поставленная задача относится к классу задач многокритериальной многопараметрической многофакторной идентификации показателей и характеристик сложных организационно-технических систем и их структурно-параметрической оптимизации. Задача решается на основе системного анализа условий функционирования БПЛА методом математического моделирования (в том числе имитационного). Проводятся обоснование и выбор облика проектных векторов параметров и определение ключевых характеристик (вариантов) создания (модернизации) многоцелевой системы БПЛА в условиях многомерного неоднородного множества целевых народно-хозяйственных задач. *Результаты.* Выбор вектора проектных параметров многоцелевой системы БПЛА двойного назначения (ДН) позволяет определить модификацию каждого отдельного типа БПЛА, а именно конструктивные особенности и тактико-технические характеристики БПЛА ДН. *Выводы.* На основе анализа функционирования системы из нескольких типов БПЛА, предназначенной для обслуживания множества целей, определена конфигурация (облик) данной системы, позволяющая в условиях принятых допущений и начальных условий функционирования решить целевые задачи с максимальной вероятностью и минимальной стоимостью. Задача решена с учетом структурных особенностей, конструктивных и функциональных ограничений на параметры применяемых БПЛА.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, базовый вариант многоцелевой системы, функция распределения целевых задач, целеуказание, начальные условия, ограничения, допущения, стоимость целевых задач

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>

**Для цитирования:** Нгуен Тхань Лонг, Кузин Н. А., Юрков Н. К. К проблеме формирования облика перспективных беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 55–66. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-7

## ON THE PROBLEM OF FORMING THE APPEARANCE OF PROMISING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Thanh Long Nguyen<sup>1</sup>, N.A. Kuzin<sup>2</sup>, N.K. Yurkov<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>2</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

<sup>1</sup>kipra@pngu.ru, <sup>2</sup>sputnik1985nk3y@mail.ru, <sup>3</sup>yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The widespread use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as individual products, and especially in the complex solution of a complex multi-purpose task, is provided by the development of technology and technology. However, it is the multiplicity of options for the use of UAVs that gives rise to the problem of forming a not redundant, but sufficient configuration of each individual product, which is associated with the problem of forming the so-called appearance of promising UAVs. In the work, taking into account the accepted initial conditions, restrictions and assumptions, the problem of optimizing the choice of the appearance of a multi-purpose UAV system

was solved on the basis of the cost of fulfilling the target tasks that are solved during the operation of the UAV. The definition of the basic version of the multi-purpose UAV system is given in the form of a set (vector) of UAV design parameters that are part of the system. *Materials and methods.* The problem posed belongs to the class of problems of multi-criteria multi-parametric multi-factor identification of indicators and characteristics of complex organizational and technical systems and their structural and parametric optimization. The problem is solved on the basis of a system analysis of the operating conditions of the UAV by the method of mathematical modeling (including simulation). The substantiation and choice of the appearance of design vectors of parameters and the definition of key characteristics (options) for the creation (modernization) of a multi-purpose UAV system in the conditions of a multidimensional heterogeneous set of target national economic tasks are carried out. *Results.* The choice of the vector of design parameters of the multi-purpose dual-purpose UAV (DN) system makes it possible to determine the modification of each individual type of UAV, namely the design features and performance characteristics of the UAV DN. *Conclusions.* Based on the analysis of the functioning of a system of several types of UAVs designed to serve a variety of purposes, the configuration (appearance) of this system is determined, which, under the conditions of the assumptions made and the initial conditions of operation, allows solving target tasks with maximum probability and minimum cost. The problem is solved taking into account the structural features, design and functional restrictions on the parameters of the UAVs used.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, basic variant of a multi-purpose system, target task distribution function, target designation, initial conditions, restrictions, assumptions, cost of target tasks

**Acknowledgments.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318/>

**For citation:** Nguen Thanh Long, Kuzin N.A., Yurkov N.K. On the problem of forming the appearance of promising unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):55–66. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-7

## Введение

БПЛА обычно имеют те же элементы, что и системы на базе пилотируемых летательных аппаратов, но с бортовым элементом, т.е. летательные аппараты изначально проектируются для эксплуатации без экипажа на борту. Экипаж (как подсистема) с его интерфейсами с органами управления самолетом и его жилым помещением заменяется электронной подсистемой разведки и управления.

Другие элементы, т.е. запуск, посадка, восстановление, связь, поддержка и т.д., имеют свои эквиваленты как в пилотируемых, так и в беспилотных системах.

Беспилотный летательный аппарат должен будет летать вне поля зрения оператора, но у него будет нулевой интеллект, он просто будет запущен в заранее запрограммированную миссию по заранее запрограммированному курсу и вернется на базу. Он не общается и результаты миссии, т.е. фотографии, как правило, не получают от него, пока он не будет восстановлен на базе.

С другой стороны, БПЛА будет иметь большую или меньшую степень «автоматического интеллекта». Он сможет связываться со своим контроллером и возвращать данные о полезной нагрузке, такие как электрооптические или тепловизионные и/или телевизионные изображения, вместе с информацией о своем основном состоянии – положением, воздушной скоростью, курсом и высотой. Он также будет передавать информацию о своем состоянии, которую часто называют «служебными данными», включая такие аспекты, как количество топлива, температура компонентов и т.д. двигателей или электроники.

Разработка и эксплуатация беспилотных авиационных систем (БАС) как технологии быстро развивались за последние 30 лет, и, как и в случае со многими новыми технологиями, используемая терминология часто менялась в течение этого периода.

Инициалы RPV (*Remotely piloted vehicle*) дистанционно-пилотируемый аппарат первоначально использовались для обозначения беспилотных летательных аппаратов, но с появлением систем, развешиваемых на наземные или подводные транспортные средства, были приняты другие аббревиатуры или инициалы для уточнения ссылки на бортовые транспортные системы. В прошлом они включали UMA (*Unmanned air vehicle* – беспилотный летательный аппарат), но теперь аббревиатура UAV (*Unmanned (or uninhabited) aerial vehicle* – беспилотный летательный аппарат) обычно используется для обозначения авиационного элемента UAS (*Unmanned aircraft system* – беспилотный летательный аппарат). Однако БПЛА иногда интерпретируют как «необитаемый летательный аппарат».

К современным, а тем более, к перспективным системам беспилотной авиации предъявляются повышенные требования как по количеству, так и по качеству решаемых задач военного и/или гражданского назначения. Поскольку в общем случае все задачи, решаемые системами беспилотной авиации, можно свести к задаче доставки груза в заданную точку и благополучного возвращения на исходную позицию, то рассмотрим пример перспективных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представленный на рис. 1.

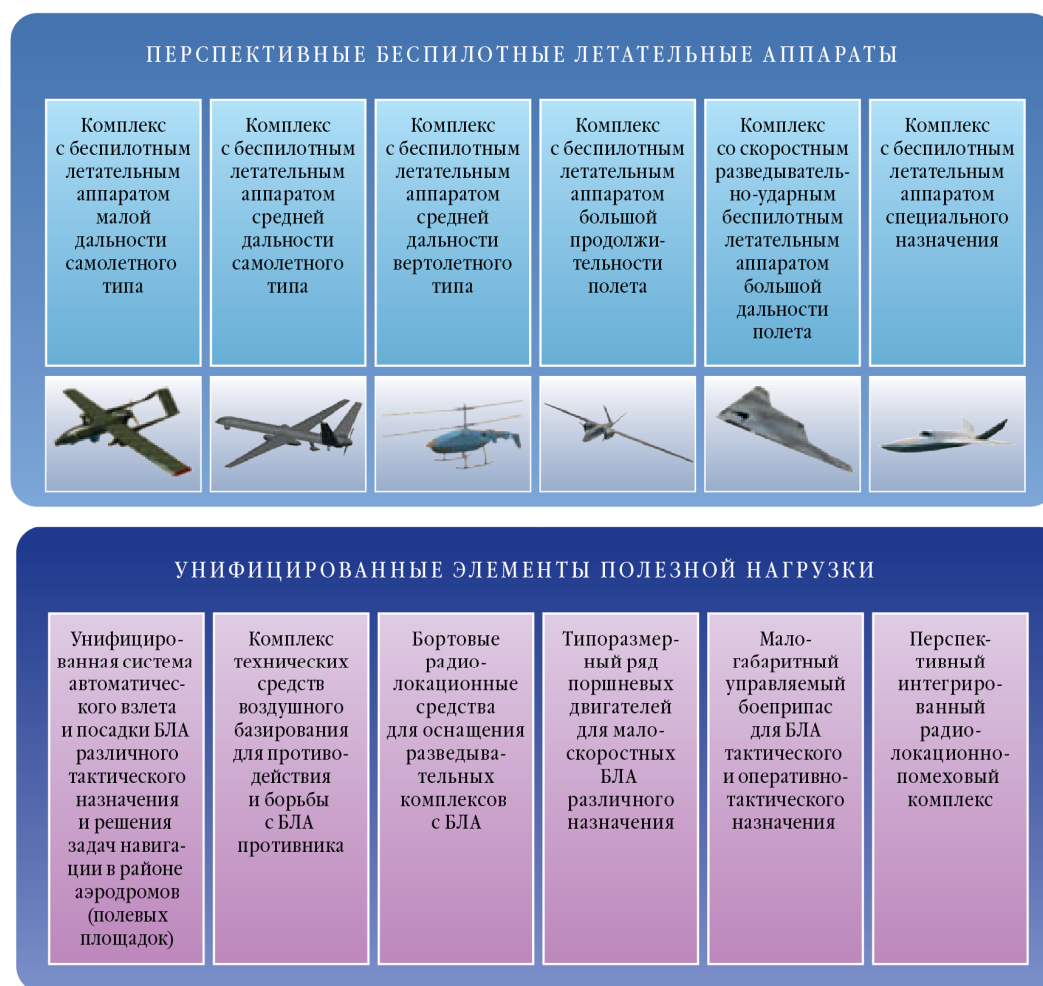


Рис. 1. Ряд перспективных БПЛА, разрабатываемых по заказу Управления перспективных межвидовых исследований и специальных проектов Минобороны России [1]

Даже краткий анализ указанных образцов дает нам право на разработку некоторой методики формирования облика (набора тактико-технических характеристик), который включает в себя большое количество параметров, лежащих в очень широких пределах. В математической постановке подобная проблема сводится к многопараметрической оптимизации динамических структур в условиях неопределенности.

### Постановка задачи

Беспилотный летательный аппарат (сокращенно БПЛА; также известный как дрон) – это любой летательный аппарат, на борту которого нет человека-пилота. БПЛА бывают разных размеров, конструкций и назначений. Первоначально БПЛА просто управлялись дистанционно; однако автономное управление становится все более широко используемым.

Отметим, что индуктивное сопротивление  $D$  крыла самолета зависит от квадрата нагрузки на размах (созданная подъемная сила,  $LN$ , деленная на длину размаха  $[b]$ ), обратной величины плотности воздуха  $\rho$  кг/м<sup>3</sup> и квадрата обратной

$$D_i = k_i (L/b)^2 / q\pi \quad \text{или} \quad D_i = k_i (L/b)^2 / \frac{1}{2} \rho \pi V^2, \quad (1)$$

где  $A_r$  – безразмерный коэффициент, больший единицы, который увеличивает сопротивление в зависимости от потери эффективности крыла из-за плохого распределения подъемной силы, т.е. от идеального эллиптического распределения;  $A$  обычно составляет порядка 1,1 (1);  $L/b$  – нагрузка на пролет в Н/м,  $q$  – аэродинамический напор:  $q = \frac{1}{2} \rho \pi V^2$ .

Другие факторы также создают сопротивление самолета. Эти другие источники сопротивления, которые можно вместе сгруппировать как «паразитное сопротивление», включают сопротивление поверхностного трения, сопротивление формы, интерференционное сопротивление, сопротивление импульса и сопротивление при охлаждении. Их происхождение подробно обсуждается в большинстве книг по аэродинамике самолетов. Необходимо сделать предварительную оценку полного лобового сопротивления самолета путем расчета лобового сопротивления составных частей и их суммирования.

Достаточно сказать, что паразитное сопротивление изменяется в первом порядке на самолете определенной конфигурации в зависимости от плотности воздуха и квадрата воздушной скорости.

На ранних этапах проектирования самолета его сопротивление, наряду с другими аэродинамическими характеристиками, будет измеряться в аэродинамической трубе.

То есть коэффициент паразитного лобового сопротивления  $C_{D_p} = D_p / \frac{1}{2} \rho V^2 S$  так, что паразитное лобовое сопротивление можно оценить для любых условий горизонтального полета с помощью выражения

$$D_p = q C_{D_p} S, \quad (2)$$

где  $S$  – площадь крыла,  $q$  – аэродинамический напор:  $q = \frac{1}{2} \rho V^2$ .

Однако существует еще один термин, который представляет собой повышенное сопротивление, возникающее в результате того, что крыло работает с более высоким углом падения. Этот срок обычно невелик до тех пор, пока крыло не приближается к сваливающемуся состоянию, когда оно становится чрезвычайно большим. Это вызвано повышенным поверхностным трением и сопротивлением формы по мере увеличения угла наклона крыла либо для увеличения подъемной силы, либо для более медленного полета. Увеличение обычно имеет тенденцию к зависимости от квадрата коэффициента подъемной силы  $C_L$ , так что уравнение паразитного сопротивления принимает следующий вид:

$$D_p = (C_{D_p} + C_L^2) q S. \quad (3)$$

Сочетание индуктивного сопротивления и паразитного сопротивления дает общее сопротивление самолета.

Учитывая, что для фиксированной конфигурации индуктивное сопротивление уменьшается пропорционально квадрату обратной величины скорости вращения, в то время как паразитное сопротивление изменяется пропорционально квадрату воздушной скорости, то для получения уменьшения индуктивного сопротивления самолет должен лететь быстрее, но при этом увеличивается паразитное сопротивление. Таким образом, существует промежуточная воздушная скорость, при которой индуктивное сопротивление равно паразитному сопротивлению, а полное сопротивление минимально. Мощность, используемая самолетом, равна произведению полного сопротивления на воздушную скорость, поэтому существует другая воздушная скорость, при которой используемая мощность минимальна.

Существует еще одна скорость полета, обычно превышающая любую из первых, при которой самолет наиболее экономичен с точки зрения расхода топлива на пройденное расстояние. Все эти значения различны на разных высотах и могут иметь большое значение при проектировании самолета в зависимости от его эксплуатационных функций и условий.

Два основных критерия полета с любой заданной воздушной скоростью заключаются в том, что крыло создает достаточную подъемную силу, чтобы противостоять весу самолета и что тяга двигателя (винтового или реактивного) равна или превышает полное сопротивление самолета. С неподвижным крылом, если есть скорость, ниже которой не выполняется ни один из этих критериев, самолет не может поддерживать полет. Эта скорость является абсолютной минимальной скоростью полета. Однако для самолета нецелесообразно пытаться лететь с этой абсолютно минимальной скоростью, поскольку любая турбулентность воздуха или маневр самолета могут увеличить лобовое сопротивление и/или уменьшить подъемную силу, что приведет к сваливанию самолета. Запас скорости выше этого необходим для определения практической минимальной скорости полета  $V_{\min}$ . Эта важная концепция минимальной скорости полета также будет определять скорость, необходимую для взлета или запуска самолета.

Подъемная сила, создаваемая крылом, определяется уравнением

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L, \quad (4)$$

где  $C_L$  – коэффициент, определяющий способность крыла площадью  $S$  отклонять воздушный поток. Этот коэффициент сам по себе является функцией конструкции сечения крыла, числа Рейнольдса, при котором оно работает, и угла наклона крыла, увеличиваясь по значению с углом наклона и достигая пика при значении  $C_{L_{\max}}$ , выше которого он резко возрастает.

Значение абсолютной минимальной скорости полета получается путем преобразования уравнения (4) в виде

$$V = (2L / \rho S C_{L_{\max}})^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

но это не дает запаса, как обсуждалось выше. Более реалистичное значение  $V_{\min}$  может быть определено либо путем предоставления запаса по скорости, либо по коэффициенту подъемной силы. Последний подход принят автором:

$$V = (2L / \rho S C_{L_0})^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Другие факторы также создают сопротивление самолета. Эти другие источники сопротивления, которые можно вместе сгруппировать как «паразитное сопротивление», включают сопротивление поверхностного трения, сопротивление формы, интерференционное сопротивление, сопротивление импульса и сопротивление при охлаждении. Их происхождение подробно обсуждается в большинстве книг по аэродинамике самолетов.

Проекты создания перспективных мини- и микро-БПЛА требуют решения следующих основных проблем [2]:

а) физического комплексирования: многие из функций системы будут обеспечиваться микроэлектроникой и компонентами на основе МЭМС-технологий.

Перспективные электронные технологии позволяют скомплексировать бортовой процессор и линии связи как ядро системы, которое обеспечивает основные (критические) связи между бортовыми датчиками и наземной станцией, а также с системой управления двигателем. Многофункциональные возможности, потребность в которых определяется ограничениями веса и мощности, могут быть достигнуты только высоко интегрированной конструкцией с физическими компонентами, выполняющими многие функции. Например, крыло может служить в качестве антенны или апертуры датчика. Источник питания может быть интегрирован с конструкцией фюзеляжа и т.д. Подобная степень конструктивной синергетики ранее не требовалась в конструкции традиционных летательных аппаратов;

б) устойчивого управляемого полета – главная технологическая проблема с большим числом неизвестных для проектировщиков малоразмерных БПЛА.

Относительно большие аэродинамические силы и моменты, создаваемые в полете, трудно предсказуемы, но существенны для обеспечения устойчивого полета. Неустойчивые потоки как результат атмосферных порывов или маневрирования аппарата особенно сильно проявляются для летательных аппаратов масштаба мини и микро с несущественным моментом инерции и малой нагрузкой на крыло. Для малогабаритных БПЛА требуется полностью учитывать трехмерную аэродинамику обтекания при более низких числах Рейнольдса, отличную от двумерного обтекания пластины. Интересно отметить, что естественные «летуны» того же масштаба используют другой источник неустойчивой аэродинамики – машущие крылья для создания подъемной силы и тяги.

Стабилизация и управление такими аппаратами требуют быстродействующих автономных систем управления;

в) высокого КПД двигательной установки.

Двигательные установки малого масштаба должны удовлетворять экстраординарным требованиям по энергетической емкости и удельной мощности [3].

Низкие числа Рейнольдса приводят к низкому аэродинамическому качеству, что увеличивает требуемую мощность и снижает КПД винта. При этом необходима высокая энергоемкость источников питания. Потребуется нетрадиционные технологии топливных элементов. Кроме того, для гарантирования скрытности должны быть разработаны акустически тихие двигатели;



требованием при проектировании универсальных многоцелевых систем БПЛА является выбор такого проектного решения, которое дает варианты системы БПЛА, наиболее полно удовлетворяющие требованиям различных целевых задач комплексов. Удовлетворение этих требований достигается на основе проведения системного анализа условий функционирования БПЛА в различных вариантах применения, использования процедур математического моделирования (в том числе и имитационного моделирования), в обосновании и выборе такого проектного решения, которое в наибольшей степени удовлетворяет всем возможным вариантам применения БПЛА и условиям их реального функционирования [9].

Основным преимуществом многоцелевых систем является способность системы БПЛА ДН гибко реагировать на изменение тактической ситуации и компенсировать имеющуюся неопределенность характеристик конкретных целевых заданий. Выигрыш в эффективности достигается при массовом применении многоцелевых систем БПЛА.

Рассмотрим табл. 1, в которой оцениваются технические характеристики мультикоптеров [10].

Таблица 1

Основные технические характеристики привязных мультикоптеров.

| Наименование мультикоптера<br>(фирма, страна)              | Число винтов, /ММК | Максимальная взлетная масса<br>ММК-ВЗЛ, кг | Максимальная масса полезной<br>нагрузки /ММК-ПН, кг | Максимальная высота подъема<br>НМК-П, м | Продолжительность полета<br>ТМК-П, м | Максимально допустимая скорость<br>ветра /МК-ВД, м/с | Время развертывания ТМК-Р, мин | Максимальная скорость<br>полета /МК-П, км/ч | Геометрические размеры<br>(длина, ширина, высота) /<br>диагональ, м |
|------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1. "Tether Eye"<br>(AeroVironment, Inc., США)              | 4                  | 5                                          | –                                                   | 45                                      | 120                                  | –                                                    | –                              | 10                                          | 0,8 · 0,8 · 0,3                                                     |
| 2. PARC (CyPhy, США)                                       | 6                  | 4,2                                        | 2,7                                                 | 152                                     | 12                                   | 12,8                                                 | –                              | –                                           | 0,4 · 0,5 · 0,25                                                    |
| 3. UMAR (Dragonfly<br>Pictures Inc., США)                  | 4*                 | –                                          | –                                                   | 150                                     | 400                                  | –                                                    | –                              | –                                           | –                                                                   |
| 4. "Flying COW"<br>(AT&T, США)                             | 4*                 | –                                          | –                                                   | 91                                      | –                                    | –                                                    | –                              | –                                           | –                                                                   |
| 5. "Orion" (Elistair, Франция)                             | 6                  | 12,7                                       | 3                                                   | 100                                     | 24                                   | 9,72                                                 | 1                              | 35                                          | Ø 1,65                                                              |
| 6. "HoverMast-100" (Sky<br>Sapience, Израиль)              | 5                  | 10                                         | 6                                                   | 50                                      | –                                    | –                                                    | 15                             | 35                                          | Ø0,72                                                               |
| 7. ETOP (Israel Aerospace<br>Indistries,<br>Израиль)       | 4                  | –                                          | 20                                                  | 100                                     | Не ограничено                        | –                                                    | 0,5                            | –                                           | 1,6 · 1,6 · 0,2                                                     |
| 8. "Matrice 600" (Dajiang<br>Innovation Technology, Китай) | 6                  | 15,5                                       | 6                                                   | 100                                     | 5                                    | 8                                                    | –                              | 65                                          | 0,72 · 0,8 ·<br>0,36                                                |
| 9. "Альбатрос" Skylle<br>(Micro Multi Copters, КНР)        | 6                  | 23                                         | 12                                                  | 150                                     | 1,5                                  | 12                                                   | 3                              | 50                                          |                                                                     |

Анализ приведенной таблицы показывает, что за рубежом достаточно интенсивно и успешно развивается новый класс моделей для привязных высотных платформ на базе традиционных мультикоптеров, представленных в основном квадрокоптерами и гексакоптерами для решения, в первую очередь, задач мониторинга, разведки и наблюдения, целеуказания, ретрансляции и обеспечения телекоммуникации объектов, обеспечения систем связи и задач управления.

Проведенный анализ основных тактико-технических характеристик представленных моделей мультикоптеров показал, что они имеют ограничения и характеризуются следующими показателями [11]:

- геометрические размеры не превышают 1,65 м;
- максимальная взлетная масса находится в пределах от 4,2 до 23 кг;
- максимальная полезная нагрузка составляет диапазон 2,7–20 кг;
- максимальная высота подъема платформы пока не превышает 152 м;
- максимальная продолжительность работы лежит в пределах от нескольких часов до сотни часов и определяется энергетическими возможностями источников питания и ресурсами основных элементов мультикоптера;
- максимальное значение скорости для порывов ветра не должно превышать 12,8 м/с.

Системы БПЛА имеют много разновидностей и могут подразделяться по следующим признакам [12, 13]:

- параметрический ряд – закономерно построенная в определенном диапазоне совокупность объектов одинакового функционального назначения с регламентированными параметрами и градациями параметров;
- типоразмерный ряд – разновидность параметрического ряда, в качестве главного параметра которого принимается размер изделия (его массогабаритные характеристики). Элементы параметрического (типоразмерного) ряда конструктивно подобны (однотипны);
- конструктивно-унифицированный ряд – параметрический ряд технических объектов, имеющих общие унифицированные элементы.

Наиболее распространенными системами по их конструктивному исполнению в настоящее время являются следующие типы систем БПЛА: адаптивные, групповые и многоцелевые системы.

### ***Постановка задачи формирования облика перспективных КБЛА ДН***

Для создания перспективных многофункциональным КБЛА ДН необходимо решить важную научно-практическую проблему совершенствования методологии создания облика (набора тактико-технических характеристик) многофункциональных КБЛА ДН. Проблема решается на основе совокупности методов, моделей и алгоритмов разработки, оценки эффективности, надежности и качества.

Будем рассматривать многоцелевую систему БПЛА, предназначенную для доставки специальных грузов в заданную точку пространства. Поскольку главной функциональной задачей многоцелевой системы БПЛА является именно доставка полезных грузов в заданные точки, характеризующимися заданной широтой –  $\varphi$ , долготой –  $\lambda$  и высотой –  $H$  [14].

Рассмотрим отдельные характеристики базового варианта многоцелевой системы БПЛА [15].

Предположим, что отдельная точка прицеливания характеризуется координатами по осям  $X$  и  $Z$ , распределенными по нормальному закону:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}, \quad (9)$$

а координата по высоте  $Y$  распределена по равномерному закону:

$$F(y) = \begin{cases} 0 & \text{если } y < a, \\ \frac{y-a}{b-a}, & \text{если } a \leq y < b, \\ 1 & \text{если } y \geq b. \end{cases} \quad (10)$$

Здесь  $m_x, m_z$  – математические ожидания по соответствующим неконтролируемым факторам  $x_{ц}, z_{ц}$  и  $\sigma_x, \sigma_z$  – среднеквадратичное отклонение по тем же факторам.

В численных расчетах начальное фазовое состояние выбирается в виде

$$x_{ц0} = 0, z_{ц0} = 0. \quad (11)$$

Начальный момент времени  $t_0$  с учетом ошибок целеуказания (ЦУ) фазового состояния точки  $\{x, y\}$  прицеливания выбирается следующим образом.

Целеуказание есть только по координатам точки прицеливания:

$$\begin{aligned} x_0^{ц} &= x_0 + \partial_x \xi; \\ y_0^{ц} &= y_0 + \partial_y \xi, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\xi$  – случайное число с нормальным законом распределения и параметрами  $m_0 = 0$ ,  $N_0 = 1$  (нормированное распределение);  $\partial_x, \partial_y$  – суммарные среднеквадратические ошибки целеуказания БПЛА:

$$\begin{aligned}\partial_x &= \sqrt{(\partial_x^{ny})^2 + (\partial_x^{KP})^2}; \\ \partial_y &= \sqrt{(\partial_y^{ny})^2 + (\partial_y^{KP})^2}.\end{aligned}\quad (13)$$

Анализ многолетних исследований показывает, что до 90 % операций, проводимых с применением КБЛА, приходится на области пересечения основных показателей качества и функциональной эффективности систем как военного, так и гражданского назначения. В связи с этим актуальна проблема создания многофункциональных КБЛА ДН, способных эффективно решать определенный комплекс народнохозяйственных и специальных задач [15].

Многофункциональный КБЛА – это комплекс, выполняющий функции (задачи) разведки, доставки различных грузов, ретранслятора, мониторинга пространства, патрулирования, который может использоваться в сложной радиационной, химической, бактериологической обстановке и разведках и др. Аналитические методы расчета данных сложных технических систем в сочетании с имитационным моделированием на основе использования алгоритмических методов структурно-параметрического синтеза дают возможность адекватно организовать процесс обоснования и создания новых образцов многофункциональных КБЛА, структурный состав которых может меняться в зависимости от решаемых задач, их масштабов, видов действий и условий применения КБЛА.

Вектор проектных параметров  $\vec{a}$ , определяющих облик и характеристики БПЛА, имеет следующий состав [17]:

$$\vec{a} = (P_0, \mu_{ДУ}, m_{КР}, M_0), \quad (14)$$

где  $P_0$  – тяга двигательной установки (ДУ);  $\mu_{ДУ}$  – относительная масса ДУ;  $m_{КР}$  – масса крыла (КР);  $M_0$  – начальная масса БПЛА.

Выбор вектора проектных параметров  $\vec{a}$  соответствует этапу параметрического выбора и на этом этапе определяется модификация каждого отдельного типа БПЛА.

Стратегия распределения целевых задач между элементами системы определяется функцией распределения целевых задач  $E(\vec{\omega})$ , которая определяется элементарными функциями распределения  $e_{ij} : e_{ij} = 1$ , если  $i$ -я задача выполняется  $j$ -м типом БПЛА и  $e_{ij} = 0$  в противном случае:

$$E(\vec{\omega}) = \{e(1,1), e(1,2), \dots, e(i,j), \dots, e(n,m)\}; i = \overline{1;n}, j = \overline{1;m}, \quad (15)$$

где  $n$  – заданное число целевых задач;  $m$  – заданное число типов БПЛА.

Комплекс с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) – это совокупность взаимоувязанных в единую функциональную систему БЛА и наземных технических средств, обеспечивающих применение БЛА в воздухе и техническую эксплуатацию на земле. Состав КБЛА может меняться в зависимости от масштабов и решаемых задач, объектов действий и условий применения (УП) БЛА.

Для оценки состояния беспилотных систем КБЛА ДН следует создать коэффициенты технического уровня  $K_{ту}$  и технико-экономической эффективности  $K_{тэ}$  как множества показателей функциональной эффективности и качества, а затем оценить вероятность выполнения поставленной задачи  $P_{пз}$ , связанной со сложным событием  $\theta$ . Для этого нужен либо сам эталонный образец КБЛА ДН, либо его модели, на основе которых можно прогнозировать решение тех или иных задач. Именно разработка новых решений и технологий управления в совершенствовании имеющихся и создания перспективных КБЛА ДН является задачей данной работы.

Очевидно, что на ранней стадии развития и разработки КБЛА ДН (с целью выявить его свойства) нужны адекватные и адаптивные процессам методы, семейства моделей, алгоритмы и программы. Поэтому проблемы и задачи, связанные с созданием измерений показателей качества и функциональной эффективности, технологических концепций и принципов разработки, методов и комплексов моделей структурно-параметрической оптимизации управления современными и перспективными КБЛА требуют своего решения.

Таким образом, нами определены понятия качества и функциональной эффективности КБЛА ДН. Качество комплекса БЛА ДН характеризует соответствие реальных свойств ТТХ всем предъявленным к ней требованиям, в то же время единых критериев качества пока нет. Например, в оптимизации динамических систем за критерий качества принимается критерий эффективности. При разработке промышленного комплекса – стоимость затрат на производство при заданной области допустимых значений показателей эффективности. В военном деле для оценки качества проводимой операции часто пользуются количественным отношением ущерба к собственным возможным потерям (причиненному ущербу). Развиваемые далее в данной работе методы оценки технического состояния и структурно-параметрической оптимизации КБЛА ДН основываются на сравнении выходного сигнала  $Y$  системы (подсистемы) с сигналом требуемым (желаемым)  $Y_t$  (из постановки задачи). По существу, это означает, что в основу оптимизации КБЛА ДН положены признаки, связанные с функционированием системы. Следовательно, за качество системы КБЛА ДН и принимается ее эффективность, точнее, ее условная эффективность. В состав множества условий включаются требования к формированию  $Y$ . Требуемый сигнал  $Y_t$  задается диспетчером из объективных возможностей и целевого назначения разрабатываемой КБЛА. Сигнал  $Y_t$  может быть эталоном (базовым сигналом). Формально связь входного  $X$  и выходного  $Y$  сигналов в диссертационной работе производится с помощью некоторого оператора системы [18].

Данная аэродинамическая схема БЛА выбрана по критериям устойчивости, управляемости и массе полезной нагрузки, таким образом по этим критериям данная аэродинамическая схема является более оптимальной, о чем свидетельствуют и обширные исследования, проведенные авторами. Таким образом, получается увязать все предлагаемые технические и технологические решения в единую схему многокритериального анализа и синтеза предлагаемых алгоритмов (алгоритм-это техническое решение), в том числе и способ с его алгоритмами [19].

Перспективы предлагаемых технических и технологических решений достаточно хорошие, позволяющие улучшить ТТХ имеющихся и перспективных многофункциональных КБЛА ДН, а также увеличить коэффициенты автономности и безопасности полетов БЛА.

### Заключение

В работе предложен подход к проблеме совершенствования методологии разработки обобщенных характеристик и представлена в соответствии с разработанным алгоритмом системной стратегии создания КБЛА ДН [20].

### Список литературы

1. Кондратьев А. Перспективы развития и применения беспилотных и роботизированных средств вооруженной борьбы в ВС ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 5. С. 14–21.
2. Юрков Н. К., Полтавский А. В. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Ильинский Н. Б., Абзалилов Д. Ф. Математические проблемы проектирования крыловых профилей. Казань : Казанский университет, 2011. 284 с.
4. Лопота А. В., Николаев А. Б. Беспилотные летательные аппараты. М., 2015. 18 с.
5. Балык В. М., Комягин В. А. Надежность и эффективность двухсредных летательных аппаратов : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2005. 160 с.
6. Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length // Journal of engineering physics and thermophysics. 2015. Vol. 88, № 3. P. 699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 62–70.
8. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 16–23.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Адамов А. П., Адамова А. А., Герасимов Н. В. Анализ эксплуатации мультикоптеров с позиции надежности и безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 86–93. doi:10.21678/2307-4205-2017-3-13

11. Гордиенко А. В., Припадчев А. Д. К вопросу автоматизированного проектирования облика беспилотного летательного аппарата самолетной схемы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. № 4. С. 911–913.
12. Балык В. М., Игнатьев И. Н., Кулакова Р. Д. [и др.]. Выбор оптимальных законов управления летательным аппаратом по аппроксимирующим алгоритмам // Сб. тезисов докладов XXX чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2003. Ч. II. С. 79–80.
13. Балык В. М. Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем. М. : Изд-во МАИ, 2011. 280 с.
14. Бецов А. В., Прокопьев И. В. Анализ живучести беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 3–6.
15. Балык В. М., Ильичев А. В., Сорокин В. А. Методы принятия проектных решений на основе моделей эффективности двухсредного летательного аппарата : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2015. 220 с.
16. Полтавский А. В., Юрков Н. К. Модификация модели системы управления подвижным объектом // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 65–70.
17. Тарасов Е. В., Балык В. М. Методы проектирования летательных аппаратов : учебник. М. : Изд-во МАИ, 2006. 96 с.
18. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
19. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
20. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. К проблеме модельного синтеза комплексов беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 70–77.

### References

1. Kondrat'ev A. Prospects for the development and application of unmanned and robotic means of military warfare in the armed forces of leading foreign countries. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign Military Review*. 2011;(5):14–21. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Poltavskiy A.V. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Il'inskiy N.B., Abzalilov D.F. *Matematicheskie problemy proektirovaniya krylovykh profiley = Mathematical problems of designing wing profiles*. Kazan: Kazanskiy universitet, 2011:284. (In Russ.)
4. Lopota A.V., Nikolaev A.B. *Bespilotnye letatel'nye apparaty = Unmanned aerial vehicles*. Moscow, 2015:18. (In Russ.)
5. Balyk V.M., Komyagin V.A. *Nadezhnost' i effektivnost' dvukhsrednykh letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie = Reliability and efficiency of two-medium aircraft: textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2005:160. (In Russ.)
6. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2015;88(3):699–705. doi:10.1007/s10891-015-1239-x
7. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Complex of detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):62–70. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Simulation modeling of characteristics of a complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):16–23. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Adamov A.P., Adamova A.A., Gerasimov N.V. Analysis of multicopter operation from the perspective of reliability and safety. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):86–93. (In Russ.). doi:10.21678/5/2307-4205-2017-3-13
11. Gordienko A.V., Pripadchev A.D. On the issue of computer-aided design of the appearance of an unmanned aerial vehicle of an airplane scheme. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(4):911–913. (In Russ.)
12. Balyk V.M., Ignat'ev I.N., Kulakova R.D. [et al.]. The choice of optimal control laws of the aircraft by approximating algorithms. *Sb. tezisev dokladov KhKhKh chteniy K. E. Tsiolkovskogo = Collection of abstracts of the XXX readings of K. E. Tsiolkovsky*. Kaluga, 2003;(pt. II):79–80. (In Russ.)

13. Balyk V.M. *Statisticheskii sintez proektnykh resheniy pri razrabotke slozhnykh system* = *Statistical synthesis of design solutions in the development of complex systems*. Moscow: Izd-vo MAI, 2011:280. (In Russ.)
14. Betskov A.V., Prokop'ev I.V. Analysis of the survivability of an unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):3–6. (In Russ.)
15. Balyk V.M., Il'ichev A.V., Sorokin V.A. *Metody prinyatiya proektnykh resheniy na osnove modeley effektivnosti dvukhsrednogo letatel'nogo apparata: ucheb. posobie* = *Methods of making design decisions based on models of the efficiency of a two-medium aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2015:220. (In Russ.)
16. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K. Modification of the model of a mobile object control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):65–70. (In Russ.)
17. Tarasov E.V., Balyk V.M. *Metody proektirovaniya letatel'nykh apparatov: uchebnik* = *Methods of designing aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2006:96. (In Russ.)
18. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a moving object on the examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
19. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a moving object on examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)
20. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. To the problem of model synthesis of unmanned aerial vehicle complexes. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = *Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1):70–77. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Тхань Лонг Нгуен

соискатель,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: kipra@pngu.ru

#### Николай Андреевич Кузин

студент,  
Московский автодорожный институт  
(технический университет)  
(Россия, г. Москва, Ленинградский пр. 64)  
E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

#### Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

#### Thanh Long Nguyen

Applicant,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Nikolai A. Kuzin

Student,  
Moscow Road Institute (Technical University)  
(64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

#### Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,  
the honoured worker of science  
of the Russian Federation,  
head of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 27.09.2021**

**Поступила после рецензирования / Revised 10.10.2021**

**Принята к публикации / Accepted 10.11.2021**