

## К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ МАЛОГАБАРИТНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

Н. В. Горячев<sup>1</sup>, А. Г. Избасов<sup>2</sup>, А. И. Мельничук<sup>3</sup>, А. М. Мухамбетов<sup>4</sup>, Н. К. Юрков<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>4</sup> Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

<sup>1</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>2</sup> iag1973@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>4</sup> suimbayeva@internet.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) претерпели огромное развитие и в короткое время прошли большой путь совершенствования. Из-за относительно низкой цены и простоты использования дроны широко используются во многих областях как гражданского, так и специального применения. Например, они широко применяются в целях предотвращения потенциальных угроз общественной безопасности и личной неприкосновенности. Необходимо развернуть систему защиты от беспилотников в чувствительной зоне для того, чтобы определять координаты летящего БПЛА различными способами обнаружения. *Материалы и методы.* В работе проведен обзор технологий наблюдения за беспилотниками, сравнительный анализ способов обнаружения для использования в системе противодействия БПЛА. Дан анализ существующих систем защиты от них, а также анализ имеющихся систем и способов многофакторного противодействия малогабаритным БПЛА. Дана архитектура построения системы противодействия БПЛА на основе пассивных способов обнаружения и многофакторного подавления. *Результаты и выводы.* Предлагается система защиты от беспилотников, которая сочетает в себе несколько технологий пассивного наблюдения, вычисления координат и поставки радиочастотных помех, а также выбор характеристик датчиков и функций, необходимых для создания комбинированной системы противодействия БПЛА. Приведено описание работы отдельных элементов системы противодействия малогабаритным БПЛА.

**Ключевые слова:** дрон, систему управления, подавления, обнаружения, определение координат цели, защита от угроз

**Для цитирования:** Горячев Н. В., Избасов А. Г., Мельничук А. И., Мухамбетов А. М., Юрков Н. К. К проблеме синтеза системы противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-7

## ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF A COUNTERACTION SYSTEM FOR SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES

N.V. Goryachev<sup>1</sup>, A.G. Izbasov<sup>2</sup>, A.I. Melnichuk<sup>3</sup>, A.M. Mukhambetov<sup>4</sup>, N.K. Yurkov<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>4</sup> Military Institute of the Air Defense, Aktobe, Kazakhstan

<sup>1</sup> ra4foc@yandex.ru, <sup>2</sup> iag1973@mail.ru, <sup>3</sup> pelmenio@mail.ru, <sup>4</sup> suimbayeva@internet.ru, <sup>5</sup> yurkov\_NK@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) have undergone tremendous development, and in a short time have gone a long way to improvement. Due to the relatively low price and ease of use, drones are widely used in many areas of both civil and special applications. For example, they are widely used to prevent potential threats to public safety and personal integrity. It is necessary to deploy a drone protection system in a sensitive area in order to determine the coordinates of a flying UAV by various detection methods. *Materials and methods.* The paper provides an overview of drone surveillance technologies, a comparative analysis of detection methods for use in the UAV counteraction system. The analysis of existing systems of protection against them, as well as an analysis of existing systems and methods of multifactorial counteraction to small-sized UAVs is given. The architecture of the UAV counteraction system based on passive detection methods and multifactorial suppression is given. *Results and conclusions.* A drone protection system is proposed that combines several technologies for passive surveillance, coordinate calculation and radio frequency interference delivery, as well as a selection of sensor characteristics and functions necessary to create a combined UAV counteraction system. A description of the operation of individual elements of the small-sized UAV counteraction system is given.

**Keywords:** drone, control system, suppression, detection, determination of target coordinates, protection from threats

**For citation:** Goryachev N.V., Izbasov A.G., Melnichuk A.I., Mukhambetov A.M., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a counteraction system for small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-7

### Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко распространены и доступны. Простейшие из них давно служат для аэрофотосъемки, мониторинга сельхозпосевов и т.д. Множество типов и вариантов конструкторского исполнения позволяют БПЛА выполнять все более и более разнообразные задачи, вплоть до экзотических применений.

Специальное применение БПЛА также расширяется в целях разведки, доставки груза к цели, перевозки пассажиров и других тактических задач. Скорость, малозаметность, хорошее изображение, передаваемое оператору, а также способность совершать резкие маневры и доставлять грузы к цели делают БПЛА одними из самых востребованных средств мониторинга окружающей среды [1].

Угроза применения террористическими организациями малогабаритных БПЛА заставляет искать пути решения проблемы защиты от них. Противодействие малогабаритным БПЛА осложняется тем, что они обладают:

- а) малыми размерами;
- б) низкой эффективной площадью рассеивания (ЭПР);
- в) высокой скоростью перемещения;
- г) высокой маневренностью;
- д) способностью летать на низких высотах;
- е) возможностью размещения на борту БПЛА автономных и обычных навигационных систем;
- ж) низкой стоимостью и др.

Все эти особенности усложняют определение координат летящей цели с помощью радиолокационных станций, работа которых рассчитана на достаточно большие размеры цели. Таким образом, обнаружить и распознать штатными средствами БПЛА довольно сложно [2].

В связи с этим борьба с БПЛА является трудновыполнимым действием, связанным с определением координат и подавлением низколетящей малоразмерной цели. При этом стоимость существующих средств поражения несоизмеримо велика по сравнению со стоимостью БПЛА. Необходимо создать новые средства борьбы с беспилотниками, позволяющие защитить объекты, людей, материальные ценности с учетом вышеуказанных характеристик дронов. Оценим способы обнаружения БПЛА [3].

### Сравнение способов обнаружения БПЛА в системе противодействия

Для противодействия БПЛА в целях их обнаружения используются системы различного типа. Как правило, для обнаружения низколетящей цели используются один или два сенсора (датчика) – радиолокационные станции и/или лазерный локатор (LiDAR), которые передают данные в систему обработки информации для дальнейшего принятия решения.

Первоначально рассмотрим системы обнаружения, основанные на различных принципах действия и позволяющие с определенной точностью определять координаты цели. Каждая из них обладает своими достоинствами и недостатками. Для сравнения приведены параметры таких систем.

1. Системы «CameraVision» приобрели большое распространение. Они обладают следующими преимуществами:

- демократичная цена;
  - распознавание дорожных указателей;
  - способность отличать спектры световых волн;
  - видеоданные представляются в относительно высоком качестве;
  - способность дифференцировать объекты;
  - способность функционировать лучше, чем человеческий глаз.
- Однако эта система имеет ряд своих недостатков:
- соотношение качества работы и освещения, погодной обстановки;
  - необходимость большой вычислительной мощности;
  - ложные срабатывания.

2. Система технологии LiDAR имеет следующие преимущества:

- предоставление трехмерного изображения окружающего пространства;
- стабильная работа при явлениях интерференции;
- стабильность работы, независимо от внешних условий освещения и частично погодных явлений.

Однако у системы «LiDAR» существует ряд недостатков:

- генерация больших объемов информации, что требует дополнительных ресурсов для обработки;
- наличие стеклянных объектов, что может создавать трудности для эксплуатации в полевых условиях;
- наличие отдельных компонентов, что добавляет сложность в эксплуатации;
- высокие затраты;
- ограниченная зона действия, что может ограничить применение технологии в определенных условиях;
- нестабильная работа в условиях некоторых погодных явлений, что может влиять на качество сбора данных.

3. Основные преимущества «Radar» системы:

- обнаружение БПЛА в любых погодных условиях и освещении;
- позиционирование объекта по расстоянию, скорости и направлению движения;
- демократичная цена.

Недостатки «Radar» системы:

- большая вероятность ошибки в обнаружении БПЛА;
- большие габаритные размеры;
- воздействие излучением на окружающих;
- качество работы зависит от рельефа.

Таким образом, анализ трех распространенных систем указывает на их существенные недостатки, которые затрудняют их применение для малоразмерных целей [4].

Таким образом, существуют три основных способа обнаружения БПЛА, которые применяются в виде дополнения к указанным выше системам, такие как акустический, радиочастотный и оптико-электронный.

Акустический способ обнаружения основывается на распознавании спектра звуковых волн, испускаемых аппаратом. К достоинствам этого способа относится отсутствие активного излучения, работа в любых метеоусловиях, слабая чувствительность к особенностям, нет зависимости от степени освещенности, а также не большие габаритные размеры.

К недостаткам данного способа относится низкая точность определения местоположения дронов, низкий показатель дальности обнаружения БПЛА с электродвигателями [5].

Радиочастотное обнаружение позволяет определить местоположение БПЛА по радиосигналам управления и передачи данных. К преимуществам относятся идентификация отдельного объекта в радиочастотном диапазоне, несмотря на схожесть геометрических размеров, выделение заданного радиоканала, даже шифрованного, наличие достаточно высокой точности, а также отсутствие активного излучения в работе.

Достоинством оптико-электронной системы является наличие камер, тепловизоров и другие устройства, которые способны обнаруживать БПЛА по их видимому и тепловому излучению. Достоинством является пассивный метод координат, работа в разных оптических диапазонах, что позволяет оперативно реагировать и принимать соответствующие меры для предотвращения угроз. При этом оптико-электронное наблюдение позволяет идентифицировать тип и характеристики объекта при наличии хорошей нейросети или опытного оператора.

К недостаткам ОЭС относятся узкая диаграмма направленности, что приводит к необходимости сканирования пространства, а также сильная зависимость от метеоусловий, большое энергопотребление и необходимость системы охлаждения [6].

К слабым сторонам относятся необходимость увеличения времени наблюдения для повышения точности определения местоположения, зависимость дальности обнаружения от мощности детектируемых сигналов, а также прерывистость принимаемого сигнала управления при полете БПЛА в автономном режиме.

Для выбора способов обнаружения рассмотрим сравнительную таблицу способов обнаружения системы (табл. 1).

Сравнительная таблица способов обнаружения системы

Условия обнаружения	Способы, основанные на радиоэффектах			Способы, основанные на оптических эффектах		Способы, основанные на акустических эффектах	
	сигнал РЛС	LiDAR	р/чатот. диап.	видим. диап.	диап. теплов.	лазер	акустич. диап.
Работа в светлое время суток	+	+	+	+	+	+	+
Работа в темное время суток	+	+	+	–	+	+	+
Детектирование автономно летящих БПЛА	+	+	–	+	+	+	+
Работа в среде помех городского типа	+	+	+	+	+	+	–
Работа в среде помех естественного типа	+	+	+	+	+	+	+
Селекция БПЛА на фоне схожих объектов	+	+	+	+	+	–	+
Работа в сложных метеоусловиях	+	+	+	–	–	–	–
Опознавание типа БПЛА	+	+	+	+	+	–	+
Детектирование как одиночных БПЛА, так и летящих в «рое»	+	+	+	+	+	+	+
Работа в пассивном режиме	–	–	+	+	+	+/-	+

Знак +/- показывает, что реализация способа потребует дополнительных технических и программных решений.

Способы обнаружения, которые подбирались с учетом условий функционирования, условия наименьшей заметности во избежание попадания под воздействие средств подавления противника, должны иметь высокую достоверность обнаружения БПЛА. Таким образом из табл. 1 следует, что основным способом должен быть пассивный метод обнаружения. Рассмотрим основные способы функционального подавления [7].

### Анализ систем многофакторного противодействия малогабаритным БПЛА

В настоящее время разработано большое количество различных систем противодействия БПЛА, работа которых основана как на одном способе обнаружения, так и их комбинации. Сочетание нескольких способов обнаружения принято относить к наилучшим решениям организации систем противодействия БПЛА. Учитывая опыт противодействия дронам, предлагаем рассмотреть систему, состоящую из двух подсистем – обнаружения беспилотников и борьбы с ними. Подсистема обнаружения основана на пассивных способах детектирования сигналов БПЛА. Система строится на базе многофакторного способа функционального подавления дронов и заменяет несколько средств поражения БПЛА, что является более эффективным и экономически обоснованным.

В основу системы положены способы мониторинга радиочастотного и акустического диапазона, дополненные тепловизионным способом [8].

Необходимо отметить, что для уменьшения средств воздействия было предложено решение о многофакторном подавлении, когда на БПЛА действуют последовательно несколько негативных/деструктивных факторов, впоследствии это приводит к повышению результативности. Согласно этому решению на выбор факторов борьбы с БПЛА описано в патенте RU2749619C1 [9].

Рассмотрим структуру системы многофакторного подавления, представленную на рис. 1.

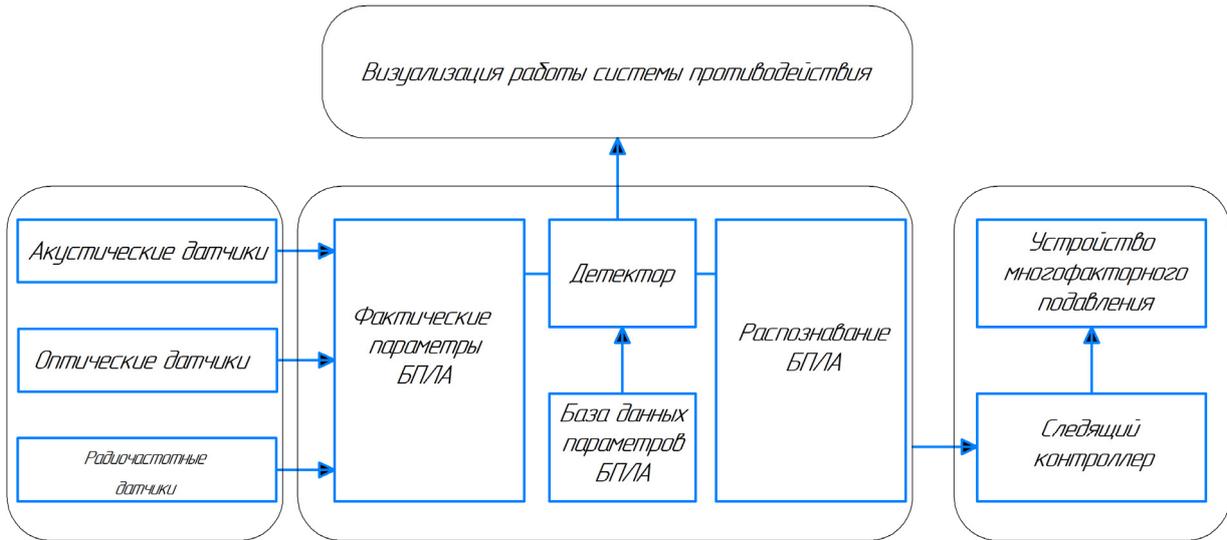


Рис. 1. Архитектура построения системы противодействия БПЛА

Система основана на пассивных способах обнаружения и многофакторного подавления деятельности БПЛА. Согласно структурной схеме, блок датчиков состоит из трех видов датчиков: акустического, оптического, а также радиочастотного диапазонов. Функционирование подобной системы обеспечивает высокую эффективность обнаружения и подавления БПЛА. Рассмотрим характеристики датчиков систем противодействия малогабаритными БПЛА [7].

**Выбор характеристик датчиков системы противодействия малогабаритным БПЛА**

Акустические датчики, согласно анализу работ по обнаружению БПЛА, работают в диапазоне 10 Гц ~ 20 кГц, со свободным звуковым полем, внутренний шум не более 16 дБ. Для кругового обнаружения цели необходимо разместить как минимум четыре датчика в акустическую решетку по кругу.

Оптический датчик представляет собой уличную позиционную камеру, оснащенную инфракрасными (ИК) фильтрами и ночным режимом для снижения неблагоприятных факторов среды, выполненную по стандарту IP 68.

Радиочастотный датчик работает в диапазоне от 10 МГц до 6 ГГц.

Таким образом, совокупность трех видов датчиков дает возможность измерить параметры БПЛА, которые помогут его распознать, а также идентифицировать [8].

Центральный блок является важным элементом предлагаемой структуры. Он выполняет функцию сравнения получаемых характеристик с имеющимися базами данных [10] и в случае совпадения выдает сигналы управления.

Подавление организуется на основе следящего контроллера и двигателей в азимутальной и широтной плоскостях, а также устройства многофакторного подавления.

**Описание работы отдельных элементов системы противодействия малогабаритным БПЛА**

Характеристика акустического спектра принятых сигналов представляется с помощью дискретного преобразования Фурье. Акустические сигналы, генерируемые БПЛА, являются гармоническими. Следовательно, целесообразно принять распределение интенсивности гармоник в качестве акустического параметра БПЛА. Вектор характеристик вычисляется как

$$\left[ \frac{e_1}{\sum_{i=1}^n e_i}, \dots, \frac{e_n}{\sum_{i=1}^n e_i} \right],$$

$e_i, \dots, e_n$  – уровни сигнала.

Для акустических сигналов выбран период дискретизации в размере 10 с.

Основными характеристиками изображения, которые определяют наиболее эффективные признаки внешнего вида объектов и описывают параметры изображения БПЛА, выбраны гистограммы ориентированных градиентов [11].

Базовая процедура извлечения HOG является стандартной и включает в себя три этапа:

а) градиент каждого пикселя изображения вычисляется путем его свертки с помощью ядра фильтра  $[-1, 0, 1]$  в горизонтальном направлении и его транспонирования в вертикальном направлении;

б) на основе вычисленных ориентированных градиентов гистограмма для каждой ячейки создается путем взвешенного голосования по каждому пикселю внутри этой ячейки для канала гистограммы на основе ориентированной;

в) для обеспечения неизменности освещенности и затенения гистограммы всех ячеек в каждом блоке группируются вместе и далее нормализуются в дескриптор HOG. Дескриптор HOG для окна изображения представляет собой объединенный вектор дескрипторов HOG всех блоков.

Функция радиочастотного датчика основана на анализаторе спектра для выявления особенностей связи между БПЛА и его контроллером. БПЛА взаимодействует со своим контроллером в диапазоне частот 2,4–2,48 ГГц, диапазон частот делится на восемь подканалов связи с полосой пропускания 10 МГц (либо аналогично). Полоса пропускания канала связи Wi-Fi составляет 20 или 40 МГц, что больше, чем у дрона, у которого спектр радиочастотного сигнала дрона отличается от спектра сигнала Wi-Fi. Следовательно, распределение интенсивности принимаемых радиосигналов по различным каналам связи может быть использовано для описания радиочастотных характеристик БПЛА. Установив полосу пропускания каждого канала равной 10 МГц, мы позволяем четырем приемным каналам одного радиочастотного датчика охватывать полосу частот 2,4–2,44 ГГц, а четырем приемным каналам другого радиочастотного датчика охватывать полосу частот 2,44–2,48 ГГц. Затем получают значения для восьми подканалов в полосе частот 2,4–2,48 ГГц, которые обозначаются  $r_1 \dots r_8$ .

Нормализованное распределение берется как вектор характеристик  $\sum_{i=1}^8 r_i \left[ r_1 \dots \frac{r_8}{\sum_{i=1}^8 r_i} \right]$ .

Детектор дронов использует метод линейных опорных векторов. Перед работой обнаружения сначала необходимо провести машинное обучение, чтобы получить классификаторы дронов, которые могут отделять векторы признаков дрона от векторов признаков других объектов. Необходимо собрать большое количество акустических сигналов, видеоизображений и радиочастотных сигналов как от БПЛА, так и от других объектов в фоновом режиме и извлечь соответствующие векторы признаков. Для обнаружения аудио, видео и радиочастотных сигналов необходимы три классификатора соответственно в режиме обучения. Принятые акустические сигналы, видеоизображения и радиочастотные сигналы будут классифицированы с помощью соответствующего классификатора [12]. Следует отметить, что при обнаружении видео необходимо обработка целого кадра изображения. Используется скользящее окно изображения, чтобы отсканировать этот кадр изображения с целью определения, существует ли окно изображения, вектор признаков которого совпадает с БПЛА [13].

Данный процесс отнимает много времени. Поэтому, чтобы этого избежать, в каждом кадре сначала определяется появление движущегося объекта с помощью метода межкадровой разницы. Таким образом, сравнивая значение серого каждого пикселя между двумя последовательными кадрами с помощью обученного детектора, это позволит быстро определить, является ли объект БПЛА.

### Заключение

Таким образом, проведен обзор технологий наблюдения за беспилотниками. Дан сравнительный анализ способов обнаружения, а также анализ существующих систем защиты от дронов.

Предложена система защиты от беспилотников, которая сочетает в себе несколько технологий пассивного наблюдения, вычисления координат и постановки радиочастотных помех, а также выбор характеристик датчиков и функций, необходимых для создания комбинированной системы противодействия БПЛА.

Предложена система многофакторного противодействия малогабаритным БПЛА и дана архитектура построения системы на основе пассивных способов обнаружения и подавления.

### Список литературы

1. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 131–138.
2. Полтавский А. В., Тюгашев А. А., Юрков Н. К. Оптимизация информационно-измерительной системы беспилотного воздушного судна // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 44–55.

3. Юрков Н. К., Горячев Н. В., Мельничук А. И. Способ многофакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 2. С. 95–99.
4. Полтавский А. В., Бурба А. А., Аверкин А. Е. [и др.]. Системные принципы создания и применения многоцелевых КБПЛА / под ред. проф. Н. Н. Бахтадзе. М. : ИПУ РАН, 2010. С. 102.
5. Нгуен Т. Л., Рыбаков И. М., Юрков Н. К. К проблеме классификации беспилотных летательных аппаратов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 122–126.
6. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 33–41.
7. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 90–95.
8. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Система управления комплексными методами борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 95–98.
9. Патент RU 2700206 С1. Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Юрков Н. К., Горячев Н. В., Кузина Е. А. № 2018114720 ; заявл. 20.04.2018 ; опублик. 13.09.2019.
10. Петрянин Д. Л., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Анализ систем защиты информации в базах данных // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 115–122.
11. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.
12. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. [et al.] Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 : proceedings (Moscow, 14–16 March 2018). М., 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237 EDN: YHXILJ
13. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. К проблеме модельного синтеза комплексов беспилотных летательных аппаратов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 70–77.

### References

1. Mel'nychuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Methods and means of countering unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):131–138. (In Russ.)
2. Poltavskiy A.V., Tyugashev A.A., Yurkov N.K. Optimization of the information and measurement system of an unmanned aircraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):44–55. (In Russ.)
3. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Mel'nychuk A.I. Method of multifactorial functional suppression of an unmanned aerial vehicle. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;2:95–99. (In Russ.)
4. Poltavskiy A.V., Burba A.A., Averkina A.E. et al. *Sistemnye printsipy sozdaniya i primeneniya mnogotselyevykh KBPLA = System principles of creation and application of multipurpose UAVs*. Moscow: IPU RAN, 2010:102. (In Russ.)
5. Nguen T.L., Rybakov I.M., Yurkov N.K. On the problem of classification of unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:122–126. (In Russ.)
6. Mel'nychuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a multi-position radar station for detecting unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):33–41. (In Russ.)
7. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Complex of detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:90–95. (In Russ.)
8. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Control system of complex methods of combating small-sized unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:95–98. (In Russ.)
9. Patent RU 2700206 C1. *Sposob dvukhfaktornogo funktsional'nogo podavleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata = Method of two-factor functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. № 2018114720; appl. 20.04.2018; publ. 13.09.2019. (In Russ.)
10. Petryanin D.L., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Analysis of information security systems in databases. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;1:115–122. (In Russ.)

11. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile 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.)
12. Grishko A., Danilova E., Goryachev N. et al. Multicriteria selection of the optimal variant of a complex system based on the interval analysis of fuzzy input data. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018: proceedings (Moscow, 14–16 March 2018)*. Moscow, 2018:1–7. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337237 EDN: YHXILJ
13. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. On 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

#### Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук, доцент кафедры  
конструирования и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ra4foc@yandex.ru

#### Аскар Гадылиевич Избасов

соискатель кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: iag1973@mail.ru

#### Антон Иванович Мельничук

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: pelmenio@mail.ru

#### Асылбек Маратович Мухамбетов

старший офицер отдела связи  
и радиотехнического обеспечения,  
Военный институт сил воздушной обороны  
(Казахстан, г. Актобе, ул. Алии Молдагуловой, 39А)  
E-mail: suimbayeva@internet.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

#### Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Askar G. Izbasov

Applicant of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Anton I. Melnichuk

Postgraduate student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

#### Asylbek M. Mukhambetov

Senior officer of the department of communications  
and radio engineering support,  
Military Institute of Air Defense  
(39A Aliya Moldagulova street, Aktobe, Kazakhstan)

#### 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 29.01.2024**

**Поступила после рецензирования/Revised 20.02.2024**

**Принята к публикации/Accepted 10.03.2024**