



Национальный
исследовательский

Томский
государственный
университет

ISSN 2949-1665

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

№ 2

2023

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2023

№ 2

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций



Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2023

Учредитель:

Национальный исследовательский Томский государственный университет

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА «ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»

EDITORIAL COUNCIL *LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES*

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета, д-р хим. наук, профессор, академик РАН, почетный доктор НИ ТГУ

Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор

И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор, академик РАН

С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор

С.Д. Каракотов – д-р хим. наук, профессор, академик РАН

М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор, академик РАН

В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор, академик РАН

А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук, профессор

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honorary Doctor of TSU

Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor

Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences

Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor

Salis D. Karakotov – Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences

Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences

Vladimir P. Chekhoniin – Dr.Sc. (Medicine), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences

Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук, профессор

М.Г. Хмелева – ответственный секретарь, канд. физ.-мат. наук

Д.Ю. Баланев – канд. психол. наук

С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук

Н.А. Глущенко – канд. ист. наук

К.С. Голохваст – д-р биол. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАО

В.М. Грузнов – д-р техн. наук

Е.А. Данилова – д-р полит. наук

А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук

В.А. Кагадей – д-р физ.-мат. наук, профессор

Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор

М.И. Лернер – д-р техн. наук

Е.М. Максимов – д-р техн. наук

А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН

В.И. Сачков – д-р хим. наук, доцент

В.С. Смирнов – канд. хим. наук

В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук

Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор

А. Тсатсакис – д-р биол. наук, иностранный член РАН

С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук

А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)

Dmitry Yu. Balanov – Cand.Sc. (Psychology)

Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)

Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)

Kirill S. Golokhvast – Dr.Sc. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Education

Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)

Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)

Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)

Valery A. Kagadey – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)

Evgeniy M. Maksimov – Dr.Sc. (Engineering)

Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Victor I. Sachkov – Dr.Sc. (Chemistry), Associate professor

Vladimir S. Smirnov – Cand.Sc. (Chemistry)

Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)

Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

Aristidis Tsatsakis – Dr.Sc. (Biology), Foreign Member of the Russian Academy of Sciences

Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)

Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

© Томский государственный университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Григорьев А.И. Реализация Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по безопасной эксплуатации беспилотных авиационных систем в Томской области	5
Хурсевич С.Н. О стратегии развития и безопасного применения российской беспилотной авиации	8
Окунский М.В., Шидловский С.В. Реконфигурируемые алгоритмы управления в задачах стабилизации безопасного движения БПЛА	34
Пейгин С.В. Оптимальное аэродинамическое проектирование как элемент технологии обеспечения безопасности в гражданской авиации	46
Назаров А.А., Шульгина К.С., Салимзянов Р.Р., Пауль С.В., Шашев Д.В. Исследование математической модели беспроводной сети передачи данных в виде циклической системы случайного множественного доступа	58

Информационные сообщения

Хурсевич С.Н. О перспективах беспилотной авиации в Томской области	66
Хурсевич В.С. Подходы к систематизации подготовки внешних пилотов гражданских беспилотных систем. Первые шаги	68
Ивашов Н. Беспилотье в России: маркетплейс как драйвер отрасли	72
Цыганаш В.Н. Проблемы развития административной модели формирования рынка беспилотных авиационных систем на современном этапе	75

CONTENTS

Grigoriev A.I. Implementation of the Programme of the experimental legal regime in the sphere of digital innovations for the safe unmanned aerial systems operation in the Tomsk region	5
Khursevich S.N. Development and safe application strategy of Russian unmanned aircraft systems	8
Okunsky M.V., Shidlovskiy S.V. Reconfigurable control algorithms for stabilizing safe UAV movement	34
Peigin S.V. Optimal aerodynamic design as an element of safety technology in civil aviation	46
Nazarov A.A., Shulgina K.S., Salimzyanov R.R., Paul S.V., Shashev D.V. Mathematical Model of Wireless Network as a Cyclic Random Access Queueing System	58

Information reports

Khursevich S.N. Prospects of unmanned aircraft systems in the Tomsk Region	66
Khursevich V.S. Approaches to systematization of training of external pilots of civil Unmanned Aviation Systems. The first steps	68
Ivashov N. Unmanned vehicles in Russia: marketplace as an industry driver	72
Tsyganash V.N. Problems of the development of the administrative model for the formation of the market of Unmanned Aviation Systems at the present stage	75

Научная статья
УДК 629.73
doi: 10.17223/7783494/2/1

Реализация Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по безопасной эксплуатации беспилотных авиационных систем в Томской области

Андрей Иванович Григорьев¹

¹ Фонд перспективных исследований, Москва, Россия, fpi@fpi.gov.ru

Аннотация. Представлены перспективы развития рынка беспилотных авиационных систем. Особое внимание уделено Программе экспериментального правового режима, которая позволит сформировать основу деятельности высокотехнологичной отрасли применения беспилотников, созданию Опытного района в Томской области и реализации в Опытном районе вышеупомянутой Программы.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы (БАС), авиационная безопасность, транспортная безопасность, пилотируемая авиация, сертификат летной годности, крупноразмерные БАС

Для цитирования: Григорьев А.И. Реализация Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по безопасной эксплуатации беспилотных авиационных систем в Томской области // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 5–7. doi: 10.17223/7783494/2/1

Original article
doi: 10.17223/7783494/2/1

Implementation of the Programme of the experimental legal regime in the sphere of digital innovations for the safe unmanned aerial systems operation in the Tomsk region

Andrey I. Grigoriev¹

¹ Foundation for Advanced Studies, Moscow, Russian Federation, fpi@fpi.gov.ru

Abstract. The prospects for the development of the unmanned aerial systems market are presented. The program of the experimental legal regime was discussed. Potentially, this programme could serve as the basis for the activities of the high-tech industry of the drone usage. Also, the particular attention has been paid to the creation of the Experimental District in the Tomsk Region and to the implementation of the above-mentioned Program within this Experimental District.

Keywords: Unmanned Aerial Systems (UAS), aviation security, transport security, manned aircraft, airworthiness certificate, large UAS

For citation: Grigoriev, A.I. (2023) Implementation of the Programme of the experimental legal regime in the sphere of digital innovations for the safe unmanned aerial systems operation in the Tomsk region. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 5–7. doi: 10.17223/7783494/2/1 (In Russian).

Анализ путей внедрения беспилотных авиационных систем (БАС) в разных странах мира показал наличие большого разнообразия используемых подходов. Большинство стран пошли по пути организации Опытных районов. Наилучшие примеры с использованием данного подхода продемонстрировали США, страны ЕС и Австралия. При выборе оптимального метода для развития национальных рынков БАС эксперты принимали во внимание целый ряд факторов, среди которых стоит отметить особенности государственного устройства, степень развития инфраструктуры, уровень развития бизнеса, географические особенности, наличие

ресурсов и совершенство законодательной базы. Анализ действующих в РФ факторов свидетельствует о том, что для России создание Опытного района является наиболее эффективным организационным методом развития рынка БАС.

В ходе подготовительных работ по созданию Опытного района в Томской области был проведен глубокий анализ текущих и перспективных потребностей государственных и коммерческих организаций в применении беспилотников. В исследовании приняли участие 115 организаций, занимающих ведущие позиции в таких отраслях, как добыча полез-

ных ископаемых, лесное и сельское хозяйство, транспорт, обеспечение безопасности, государственное и муниципальное управление, которые активно использовали сервисы, выполняемые с применением БАС. Наиболее востребованными из них на сегодня являются фото-видеосъемка и мониторинг сложных инженерных конструкций, технических и природных объектов.

Кроме того, в результате анализа стало ясно, что одним из существенных факторов, сдерживающих широкое внедрение беспилотных авиационных систем в производственную деятельность, стало отсутствие единого подхода к совместному с пилотируемой авиацией использованию воздушного пространства, а также практика управления административными и организационными процессами применения БАС. Результаты работ «Тайга 1» и «Тайга 2», проведенных Фондом перспективных исследований (далее – Фонд) в 2018–2019 гг. в тесном взаимодействии с лучшими экспертами России в области беспилотной авиации и администрацией Томской области, показали, что для эффективной работы и системного роста отрасли применения БАС необходимо обеспечить централизованное управление всеми организационными, технологическими, регуляторными и бизнес-процессами.

В этих целях Фондом при поддержке администрации Томской области в ходе совместной работы по созданию на территории региона Опытного района в 2018 г. была разработана и утверждена Программа мероприятий (Дорожная карта). Для более оперативного решения вопросов по ее реализации в 2019 г. создан проектный комитет при Губернаторе Томской области по созданию Опытного района применения БАС. Со стороны Фонда данную работу возглавил его Сибирский центр под руководством Владислава Сычкова.

В декабре 2018 г. завершился первый этап проекта, в ходе которого проведен глубокий анализ текущих и перспективных потребностей государственных и коммерческих организаций в работах и сервисах с применением БАС, а также возможностей российских компаний, работающих в этой сфере.

На следующем этапе проанализированы нормативные правовые акты Российской Федерации, регулирующие вопросы, связанные с использованием БАС. Выявлен ряд нормативных барьеров, препятствующих, а зачастую и исключающих возможность использования крупногабаритных БАС (более 30 кг) в воздушном пространстве, в том числе при оказании логистических и иных услуг: не существовало ни одного беспилотного воздушного судна, которое бы имело сертификат летной годности, равно как не было и организации – эксплуатанта БАС, имеющего

соответствующий сертификат, без которого практические полеты для решения различных задач невозможны. Помимо этого, выполнена масштабная работа по маркетинговому исследованию рынка услуг с применением беспилотников.

В марте 2020 г. стартовал проект Фонда «Купол», целью которого явилось проектирование и создание универсальной цифровой платформы по управлению комплексом услуг с применением БАС, решающей не только задачи по организации воздушного движения, но и все бизнес-задачи по заказу и предоставлению существующих и перспективных услуг с использованием различных типов беспилотников и их полезной нагрузки.

По итогам этой работы были подготовлены соответствующие предложения по корректировке нормативной базы. При активной совместной работе администрации Томской области и Фонда данные предложения в последующем легли в основу Федерального закона от 02.07.2021 № 331-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций в Российской Федерации».

Когда в феврале 2021 г. вступил в силу Федеральный закон от 31.07.2020 № 258-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций в Российской Федерации», позволяющий применять в отношении участников экспериментального правового режима (ЭПР) в течение определенного периода времени специальное регулирование, дальнейшая работа Фонда и администрации Томской области сосредоточилась на подготовке проекта Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации БАС в Томской области (акт специального регулирования, определяющий условия ЭПР и содержащий нормативные требования, отличные от общего регулирования). В целом Программа ЭПР направлена на то, чтобы создать разумные нормативные условия для возможности практического применения крупноразмерных БАС.

В рамках реализации Программы в феврале 2021 г. было создано ООО «Региональный оператор «Беспилотные системы», которое внесло инициативное предложение с приложением указанной Программы в Минэкономразвития России. В сентябре 2021 г. были получены положительные заключения Минэкономразвития России, Минтранса России, Росавиации и АНО «Цифровая экономика» (организация предпринимательского сообщества), а в октябре 2021 г. проект Программы ЭПР прошел обще-

ственные слушания и антикоррупционную экспертизу в Минюсте России.

В конце декабря 2021 г. завершилось рассмотрение проекта Программы в аппарате Правительства Российской Федерации, Минпромторге России и ФСБ России. И уже в марте 2022 г. председатель Правительства Российской Федерации Михаил Мишустин подписал Постановление Правительства № 458 «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем в Томской области». Этот ЭПР стал одним из первых в России.

Реализация Программы ЭПР фактически позволит сформировать для Опытного района применения БАС экспериментальную основу деятельности высокотехнологичной отрасли применения беспилотников и практически отрабатывать все предложения по совершенствованию нормативно-правовой и нормативно-технической базы. По условиям федерального закона те положения из программы ЭПР, которые докажут свою эффективность в рамках конкретной территории, далее приобретут статус норм общего регулирования, т.е. будут «масштабированы» на всю Россию. На более поздних

этапах, когда ЭПР заработает в полную силу и им будет пользоваться бизнес, именно он будет вкладывать собственные средства в развитие инфраструктуры и создание сервисов, ориентированных на клиентов.

Наша цель – это достижение технологического превосходства России в вопросе использования беспилотных систем для решения задач гражданского сектора экономики, в том числе – диверсификации перспективных разработок предприятий ОПК, имеющих существенный научно-технический задел в данной области. По оценкам экспертов и выявленным в ходе маркетингового исследования потребностям существующих заказчиков, ежегодный оборот в сфере применения БАС только в Томской области составляет более 1,5 млрд руб. Всего в 2022 г. объем российского рынка беспилотных авиасистем и услуг с их применением превысил 50 млрд руб. – и это менее 1% мирового рынка. Здесь нам есть над чем работать.

Не сомневаюсь, что создание Опытного района в Томской области, а также реализация Программы ЭПР помогут решить главную задачу утвержденной недавно Правительством РФ стратегии развития беспилотной авиации до 2035 г. – появления в России в ближайшие несколько лет новой отрасли экономики, связанной с созданием и использованием гражданских беспилотников.

Информация об авторе:

Григорьев Андрей Иванович – доктор технических наук, почетный профессор Московского физико-технического института, генеральный директор Фонда перспективных исследований (Москва, Россия). E-mail: fpi@fpi.gov.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Grigoriev Andrey I., Dr.Sc. (Engineering), Honorary Doctor of Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Officer, Foundation for Advanced Studies (Moscow, Russian Federation). E-mail: fpi@fpi.gov.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Научная статья

УДК 629.73(470+571):339.986

doi: 10.17223/7783494/2/2

О стратегии развития и безопасного применения российской беспилотной авиации

Сергей Николаевич Хурсевич¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, khsn@list.ru*

Аннотация. Предложены классификация беспилотных авиационных систем, видение вариантов повышения эффективности сертификации и лицензирования производителей и эксплуатантов беспилотной авиатехники, сертификации её лётной годности. Особое внимание уделено механизмам и этапам формирования цифровой системы организации воздушного движения пилотируемых и беспилотных воздушных судов, подготовки персонала, развития наземной инфраструктуры, обеспечения авиационной, транспортной, информационной безопасности.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, сертификация лётной годности, сертификация производителей авиатехники, организация воздушного движения, подготовка авиационного персонала, наземная инфраструктура воздушного транспорта, авиационная безопасность, транспортная безопасность, информационная безопасность

Для цитирования: Хурсевич С.Н. О стратегии развития и безопасного применения российской беспилотной авиации // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 8–33. doi: 10.17223/7783494/2/2

Original article

doi: 10.17223/7783494/2/2

Development and safe application strategy of Russian unmanned aircraft systems

Sergey N. Khursevich¹

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, khsn@list.ru*

Abstract. In the article the author analyzes the existing approaches to the classification of unmanned aircraft systems. Based on a comprehensive risk analysis and international experience, the author's version of the classification is proposed. A systematic vision of options for building an effective certification and licensing system for manufacturers and operators of unmanned aircraft, certification of the airworthiness of unmanned aircraft systems is proposed. The key problem is the lack of experience of certification bodies working with super-light and light manned aircraft, as well as experience in certification of commercial drones. This leads to overcomplication of the certification basis and the formation of far-fetched methods for determining compliance. The way out may be the organization of airworthiness certification based on the total cumulative number of accumulated flight hours (FH DTP) according to rules close to the EASA rules of 05/26/2022 FTB MOC SC Light-UAS. As experience accumulates, fundamentally new airworthiness standards and conformity assessment methods will be developed that correspond to the practice of safe operation. The key problem of training aviation personnel is the lack of standard training programs for recreational and professional drones. The way out may be the development and testing in experimental legal regimes of programs for mass training and testing of knowledge of external pilots of recreational drones, with the issuance of an analogue of the FAA "TRUST" certificate. In parallel, training and testing programs for external commercial pilots should be tested according to the rules close to the FAA Part 107. The practical operation of unmanned aircraft is limited by the imperfection of the national air traffic management system. As a result, flights are possible exclusively in segregated airspace. By now, the number of drones has become so significant that the potential for extensive allocation of airspace on the principle of "one drone – one flight area" has been practically exhausted. The way out may be the formation of a digital air traffic management system for manned and unmanned aircraft, which will ensure mutual situational awareness of all airspace users. The requirements of the national aviation authorities for airfields, heliports, landing pads are formed based on the characteristics of "big aviation" and exclude the commercial efficiency of low-intensity commercial operation of light and super-light aircraft. The development of unmanned aviation requires a radical simplification of these rules, considering the best international practices. The full implementation of the described proposals will ensure the formation of a flexible, transparent and simple regulatory system that will create conditions for the development of unmanned aircraft.

Keywords: Unmanned Aviation Systems, airworthiness certification, certification of aircraft manufacturers, air traffic management, training of aviation personnel, ground infrastructure of air transport, aviation security, transport security, information security

For citation: Khursevich, S.N. (2023) Development and safe application strategy of Russian unmanned aircraft systems. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeiatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 8–33. doi: 10.17223/7783494/2/2 (In Russian).

Введение

Нормативно-правовое регулирование гражданской беспилотной авиации в России формируется преимущественно стихийно. В нём эклектично сочетается копирование отдельных норм пилотируемой авиации с заимствованиями из зарубежных документов. Многочисленные экспромты регулирующих органов и практиков влекут за собой неуправляемое развитие нормотворчества и правоприменения. Концептуально руководство российских авиационных властей настроено на то, чтобы «несмотря на разработку 43 странами правил интеграции пилотируемых и беспилотных воздушных судов, ждать принятия ИКАО соответствующего пакета норм и рекомендаций, что произойдёт ориентировочно в 2024 году» [1].

Однако серия недавних поручений Президента РФ [2] поставила задачу устранения противоречий и пробелов в регулировании и развитии беспилотного авиатранспорта, одновременно установив чрезвычайно жёсткие сроки. Для успешного решения этой задачи требуется формирование системной стратегии, в основу которой должна быть положена безопасность и коммерческая эффективность применения беспилотных воздушных судов (далее – БВС) в единой системе с пилотируемыми воздушными судами. Жёсткость сроков и широкий спектр решаемых задач привели к административной суете, при которой множество групп выдвигают плохо продуманные и внутренние противоречивые идеи. Практически единственным универсальным критерием для их обобщения является оценка степени, в кото-

рой они опираются на внутренний платёжеспособный спрос и способствуют его удовлетворению. Однако по этому критерию проекты развития беспилотной авиации оцениваются крайне редко.

Пилотируемая и беспилотная авиация

На начальной стадии развития беспилотной авиации большая часть используемых воздушных судов имела крайне незначительную взлётную массу, из-за чего беспилотники воспринимались в обществе как один из подвидов авиамоделей. Несекретные научно-технические заделы, связанные с дистанционным пилотированием воздушных судов, также имели преимущественно авиамоделисты. В результате влияния авиамоделизма на генезис беспилотной авиации зачатки новой отрасли формировались без оглядки на нормы и ограничения пилотируемой авиации.

Становление отрасли происходило в «сферическом вакууме», свободном как от догм традиционной авиации, так и от её опыта. Однако как только вес БВС приблизился к весу сверхлёгких и лёгких воздушных судов, обнаружилось, что и пилотируемая, и беспилотная авиация работает на одном и том же рынке, сталкивается со схожими техническими, инфраструктурными, кадровыми и регуляторными ограничениями. Наконец, и пилотируемые, и беспилотные воздушные суда летают в одном и том же воздушном пространстве, осуществление массовых полётов в котором жёстко конфликтует с использованием сегрегации как единственного метода предотвращения столкновений.



Рис. 1. Взаимосвязь пилотируемой и беспилотной авиации

Fig 1. The relationship between manned and unmanned aircraft

Кроме того, системное развитие беспилотных технологий возможно только при условии их коммерческой эффективности. Даже минимальный уровень рентабельности сколь-нибудь масштабных беспилотных авиаперевозок или авиаработ достижим исключительно при условии синергии пилотируемой и беспилотной авиации (рис. 1).

Попытки развития экспериментальных правовых режимов в области развития цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем сталкиваются с теми же инфраструктурными и регулятивными ограничениями, что и пилотируемая авиация. Например, минимальный уровень рентабельности масштабных беспилотных авиаперевозок достижим при условии разделения между пилотируемой и беспилотной авиацией хотя бы расходов по созданию и эксплуатации наземной инфраструктуры, так как и для беспилотных, и для пилотируемых самолётов нужна практически идентичная аэродромная инфраструктура, создание которой даст возможность для активной эксплуатации экономических воздушных судов всех типов. К сожалению, ключевой документ по развитию беспилотной авиации – разработанная Рабочей группой «Аэронет» НТИ и утверждённая Правительством РФ «дорожная карта» с перечнем основных нормативных правовых актов, подлежащих уточнению и разработке в области беспилотной авиации, построена исходя из возможности синергии пилотируемой и беспилотной авиации только после внедрения технологических и технических решений, обеспечивающих безопасную интеграцию беспилотных воздушных судов (далее – БВС) в единое воздушное пространство [3]. Однако как развитие коммерческой пилотируемой авиации, так и коммерческой беспилотной авиации предполагает решение одних и тех же вопросов:

1. Как зарабатывать – сертификация, лицензирование или допуск к коммерческой деятельности производителей и эксплуатантов авиатехники, а также иных поставщиков услуг, формирование и развитие рынка.

2. Где летать – предоставление права на использование воздушного пространства и организация воздушного движения.

3. На чём летать – разработка, сертификация лётной годности и серийное производство воздушных судов.

4. Откуда и куда летать – создание и допуск к эксплуатации аэродромов, вертодромов, посадочных площадок и иных объектов наземной инфраструктуры.

5. Кому пилотировать и обслуживать авиатехнику – подготовка, сертификация или допуск к профессиональной деятельности персонала, обеспечивающего эксплуатацию воздушных судов и соответствующей наземной инфраструктуры.

6. Как безопасно летать и монетизировать результаты полётов – обеспечение авиационной, транспортной и информационной безопасности.

Перечисленные вопросы будут последовательно рассмотрены ниже.

1. Сертификация, лицензирование или допуск к коммерческой деятельности производителей и эксплуатантов беспилотной авиатехники

Ключевая проблема коммерческого использования БАС схожа для лёгкой пилотируемой и беспилотной авиации. Она состоит в том, что требования национальных авиационных властей к организациям, осуществляющим авиационные работы и авиационные перевозки, сформированы исходя из особенностей «большой авиации» и исключают коммерческую эффективность эксплуатации лёгкой и сверхлёгкой авиатехники. Вместо дифференциации правил для эксплуатантов для «большой» и «малой» авиации авиационные власти избирательно закрывают глаза на отдельные группы нарушений либо вообще самоустраиваются от надзора за сверхлёгкой авиатехникой и персоналом, что вносит хаос в организацию авиаперевозок и авиаработ.

Например, в соответствии с отечественным законодательством любая оплачиваемая работа, выполненная с использованием беспилотного (равно – пилотируемого) воздушного судна, является авиационной работой, а организации или предприниматели, её осуществляющие, обязаны иметь сертификат эксплуатанта, выданный в соответствии с действующими федеральными авиационными правилами, что было однозначно подтверждено регулятором [4]. Однако на практике сформировалась многолетняя практика не критичного отношения к обилию основанных на правовом и техническом нигилизме авантюрных прожектов. Вследствие этого к настоящему времени вся сложившаяся в России система разработки, производства, сертификации и эксплуатации беспилотной авиатехники базируется на крайне зыбком фундаменте. При этом с каждой новой футуристической фантазией нагрузка на этот шаткий фундамент растёт, создавая угрозу обрушения всей конструкции.

Вплоть до 2022 г. федеральными авиационными властями не было выдано ни одного сертификата эксплуатанта беспилотных авиационных систем или беспилотных воздушных судов. Только в 2022 г. были приняты решения [5], связанные с упрощением требований к сертификации авиационного персонала, лётной годности и эксплуатанта в районах экспериментальных правовых режимов в сфере цифровых инноваций в Томской области, в Камчатском крае,

Ханты-Мансийском автономном округе – Югре, Чукотском автономном округе и Ямало-Ненецком автономном округе, а также отказом от признания авиационным персоналом отдельных категорий внешних пилотов [6].

Таким образом, на протяжении многих лет кустарно подготовленный авиационный персонал на беспилотных воздушных судах с неподтверждённой лётной годностью выполнял авиационные работы без обязательного сертификата эксплуатанта. На основе правового нигилизма сформировался многомиллиардный рынок, который оказался на грани краха после банальных предостережений Ространснадзора о недопустимости прямого и грубого нарушения действующего законодательства и указаний Генеральной прокуратуры на эту же тему [7].

Время правового и технического нигилизма прошло, и ключевым условием для развития беспилотной авиации стало формирование простых и прозрачных правил, по которым беспилотные воздушные суда могут применяться в коммерческой деятельности. В основу этих правил должна быть положена непротиворечивая классификация БВС. В интерпретации ИКАО классификация имеет целью «соразмерное применение систем управления риском для безопасности полетов, сертификации, эксплуатационных требований и требований к выдаче свидетельств» [8]. В свою очередь, управление рисками сводится к выявлению источников опасности с оценкой и уменьшением рисков [9].

Таким образом, исходя из методологии ИКАО, классификация беспилотной авиации должна быть основана на отнесении беспилотных воздушных судов к одной из трёх категорий:

1. Низкий риск, не требующий процедурного контроля.
2. Повышенный риск, требующий оценки и установления требований к обеспечению безопасности.
3. Риск на уровне пилотируемой авиации с необходимостью сертификации БАС и соответствующего персонала.

Этим требованиям в идеале должна соответствовать классификация пилотируемых и беспилотных воздушных судов, установленная Воздушным кодексом РФ (далее – ВЗК РФ). В соответствии с этой классификацией в зависимости от максимальной взлётной массы или массы конструкции все воздушные суда, как пилотируемые, так и беспилотные, подразделяются на:

– сверхлёгкие воздушные суда с максимальной взлётной массой до 495 кг, внутри которых выделяются воздушные суда с массой конструкции 115 кг и менее, не подлежащие сертификации и допущенные к эксплуатации лицами без пилотских свидетельств;

– лёгкие воздушные суда с максимальной взлётной массой 5 700 кг – самолёт, 3 100 – вертолёт;

– воздушные суда с большей максимальной взлётной массой (далее – МВМ) (рис. 2).

В дополнение к основной классификации как ВЗК РФ, так и рядом других документов введены многочисленные дополнительные или альтернативные классификации беспилотных воздушных судов. Само определение БВС в ВЗК РФ содержит внутреннее противоречие: «Беспилотное воздушное судно – воздушное судно, управляемое, контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (внешний пилот)» [10]. В одной и той же фразе утверждается, что воздушное судно является беспилотным, но при этом оно управляется пилотом. Данная юридическая оплошность связана с неполным учётом в российском законодательстве рекомендаций ИКАО [11], согласно которым беспилотные воздушные суда подразделяются на:

- автономные (не предусматривают вмешательство пилота в управление полётом);
- дистанционно пилотируемые.

Согласно ВЗК РФ, все БВС рассматриваются исключительно как дистанционно пилотируемые и дополнительно классифицируются на:

- БВС с максимальной взлётной массой до 0,15 кг;
- БВС с максимальной взлётной массой от 0,15 до 30 кг включительно;
- БВС с максимальной взлётной массой свыше 30 кг.

Российская правоприменительная практика явочным порядком формирует всё более глубокую дифференциацию классов беспилотных воздушных судов, увеличивая разрыв с классификацией пилотируемой авиации. Например, Государственным стандартом введено понятие малого БВС (взлётная масса менее 30 кг) и лёгкого БВС (взлётная масса менее 150 кг) [12]. В этом же ГОСТе отдельно выделены три класса БВС: дирижабль, мультикоптер и квадрокоптер. Авторы не упоминают о других классах БВС, например, БВС вертолётного или самолётного типа.

Другой ГОСТ предлагает несколько отличную концепцию классификации БВС. В нём БВС по максимальной взлётной массе делятся на две категории: от 0,25 до 30 кг и от 30 кг. К какой категории относятся БВС с максимальной взлётной массой до 0,25 кг, в том числе БВС тяжелее 0,15 кг, подлежащие обязательной регистрации в Росавиации, в тексте не указано [13]. Кроме того, стандарт вводит такие критерии классификации, как достигаемая в полёте кинетическая энергия (до 100 Дж и более 100 Дж), по эксплуатационному назначению (в личных целях и для выполнения авиаработ), по услови-

ям видимости (наличие или отсутствие прямой радиовидимости, а при наличии прямой радиовидимости – наличие визуального контакта у внешнего пилота, у помощников внешнего пилота или отсутствие визуального контакта с БВС).

Вклад в классификацию внёс даже Минтруд России, установивший, что внешний пилот беспилотного воздушного судна с максимальной взлётной массой 10 кг и менее должен пройти профессиональное обучение [14]. В интерпретации Минтру-

да России БВС подразделяются на три категории по максимальной взлётной массе: до 10 кг, от 10 до 30 кг и свыше 30 кг.

В дополнение к перечисленным вариантам нередко предлагаются классификации по видам авиационных работ, проводимых с использованием БВС. Данный критерий классификации является, вероятно, самым сложным, поскольку, например, в соответствующем ГОСТе перечислено 139 видов авиационных работ [15].



Рис. 2. Классификация пилотируемой и беспилотной авиации

Fig. 2. Classification of manned and unmanned aircraft

При желании дополнительно усложнить классификацию можно, добавив такие критерии, как тип БВС, вид и количество силовых установок и т.д., вплоть до уровня шума, объёма выбросов CO₂ и т.п. Любой из перечисленных критериев классификации можно обосновать и найти логичные доводы в пользу его важности, равно как и найти дополнительные критерии. Наконец, довести детализацию до абсурда можно, начав в соответствии с предложениями отдельных экспертов дробить классификацию БВС от 1 кг максимальной взлётной массы и 6 м высоты полёта, введя 4 класса БВС, до 30 кг и лишь два – свыше 30 кг.

Для того чтобы нормативно-правовое регулирование перестало сдерживать развитие беспилотной

авиации в России, настоятельно необходимо скорректировать подходы к классификации БВС. Первым шагом на этом пути должна стать гармонизация классификации пилотируемых и беспилотных воздушных судов. В этом случае можно выделить пять групп БВС, дифференцированных по максимальной взлётной массе / максимальной массе конструкции:

1. Максимальная взлётная масса 0,001–30 кг.
2. Максимальная масса конструкции до 115 кг.
3. Максимальная взлётная масса до 495 кг.
4. Максимальная взлётная масса 495–3 100 кг.
5. Максимальная взлётная масса 495–5 700 (для самолётов).

Использование БВС одинаковой взлётной массы будет принципиально отличаться по уровню рисков

в зависимости от класса воздушного пространства полётов, инфраструктурных и демографических особенностей территорий, над которыми эти полёты проходят, развлекательного или коммерческого характера полётов, визуальной видимости и т.п.

Например, исходя из взвешенной оценки рисков, в Белоруссии агродроны отнесены к категории авиамodelей, которые допускаются к коммерческой деятельности не только без сертификации лётной годности, но и без получения разрешения от органов Единой системы организации воздушного движения [16]. Высота их полётов ограничена 100 м от уровня земной (водной) поверхности, сами полёты осуществляются исключительно в зоне прямой видимости и не должны создавать помехи для пилотируемой авиации, а также осуществляться в запретных зонах [17]. Несмотря на нестандартную интерпретацию понятия авиамodelей и допустимости её коммерческого использования, белорусские подходы к регулированию полностью соответствуют подходам ИКАО [18].

Достаточно простой подход к дифференциации может быть построен на концептуальных основах проекта UTM, выполненного NASA во взаимодействии с FAA [19], что предполагает следующую классификацию:

– полёты вне населённых пунктов, в том числе в сельском хозяйстве, пожаротушении и мониторинге инфраструктуры;

– полёты в малонаселённых районах вне прямой видимости оператора, в том числе при проведении поисково-спасательных операций;

– полёты в умеренно населённых районах;

– интегрирование БВС в городские районы.

Исходя из особенностей российского законодательства, данная методология позволяет разделить БВС на 5 категорий:

1. БВС, осуществляющие развлекательные полёты в зоне прямой видимости на высоте до 150 м вне запретных зон.

2. БВС, осуществляющие коммерческие полёты в зоне прямой видимости на высоте до 150 м вне запретных зон.

3. БВС, осуществляющие коммерческие полёты в воздушном пространстве G над ненаселённой местностью.

4. БВС, осуществляющие коммерческие полёты в воздушном пространстве G над малонаселённой местностью.

5. БВС, осуществляющие коммерческие полёты над населёнными пунктами и /или за пределами воздушного пространства G.

Построение итоговой матрицы классификации целесообразно выполнить с учетом методологии, заложенной в действующие ГОСТы, и методологии, применяемой в зоне регулирования EASA (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Матрица классификации беспилотной авиации

	Развлекательные полёты в зоне прямой видимости на высоте до 150 м вне запретных зон	Коммерческие полёты в зоне прямой видимости на высоте до 150 м вне запретных зон	Коммерческие полёты в воздушном пространстве G над ненаселённой местностью	Коммерческие полёты в воздушном пространстве G над малонаселённой местностью	Коммерческие полёты над населёнными пунктами и/или за пределами воздушного пространства G
Максимальная взлётная масса 0,015–30 кг	A1 онлайн-обучение, регистрация БВС, без уведомления ОрВД	A2 профобучение, регистрация БВС, без уведомления ОрВД	A3 профобучение, регистрация и аттестация БВС, уведомление ОрВД	B2 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	C1 профобучение, регистрация и сертификация БВС, разрешение ОрВД
Максимальная масса конструкции до 115 кг		B1 профобучение, регистрация БВС, уведомление ОрВД	B2 профобучение, регистрация и аттестация БВС, уведомление ОрВД	B3 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	C1 профобучение, регистрация и сертификация БВС, разрешение ОрВД
Максимальная взлётная масса до 495 кг	Развлекательные полёты допускаются только по правилам экспериментальной авиации	B2 профобучение, регистрация БВС, разрешение ОрВД	B3 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	B4 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	C2 профобучение в АУЦ, регистрация и сертификация БВС, разрешение ОрВД
Максимальная взлётная масса 495–3100 кг		B3 профобучение, регистрация БВС, разрешение ОрВД	B5 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	B6 профобучение в АУЦ, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	C3 профобучение в АУЦ, регистрация и сертификация БВС, разрешение ОрВД
Максимальная взлётная масса 495–5700 кг (для самолётов)		B4 профобучение, регистрация БВС, разрешение ОрВД	B5 профобучение, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	B6 профобучение в АУЦ, регистрация и аттестация БВС, разрешение ОрВД	C3 профобучение в АУЦ, регистрация и сертификация БВС, разрешение ОрВД

При классификации по предложенным критериям могут быть детально дифференцированы требования к регистрации БВС, взаимодействию с ОрВД, аттестации или сертификации, подготовке внешних пилотов и иного персонала и т.п.

2. Предоставление права на использование воздушного пространства и организация воздушного движения

К настоящему времени количество используемых БВС стало настолько значительным, что потенциал экстенсивного выделения воздушного пространства

для них оказался практически исчерпан (рис. 3). Использование БВС для мониторинга объектов энергетической и транспортной инфраструктуры сделало воздушное пространство G отдельных регионов permanently сегрегированным из-за ежедневно подаваемых заявок о введении местного режима. Для решения ординарных мониторинговых задач одним БВС сегрегируется воздушное пространство в сотни тысяч квадратных километров и полностью блокируется работа других БВС и пилотируемой авиации. Подобный подход блокирует развитие беспилотной авиации и существенно затрудняет полёты пилотируемой авиации.

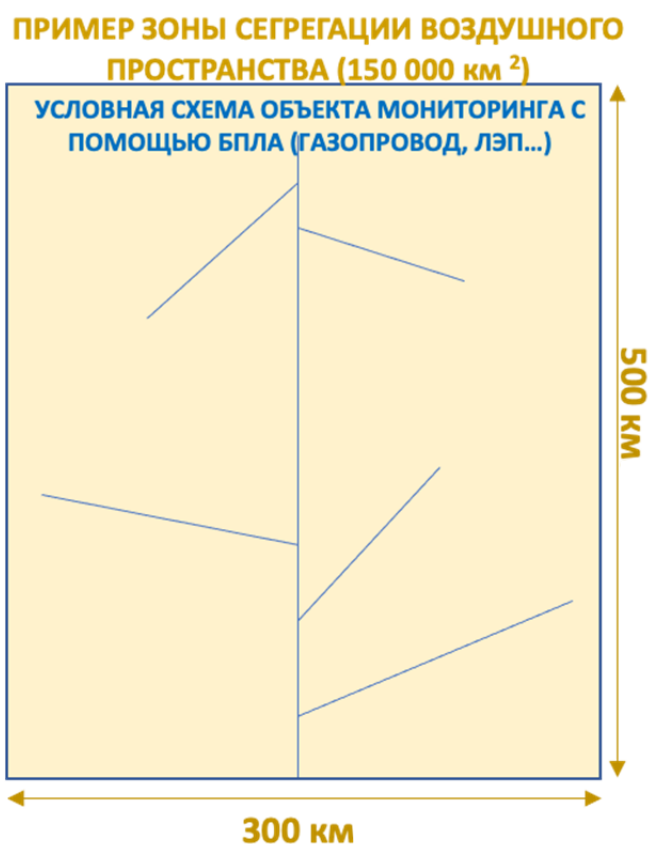


Рис. 3. Пример экстенсивного выделения воздушного пространства по принципу «один дрон – один район полётов»

Fig. 3. The example of extensive allocation of airspace on the principle of “one drone – one flight area”

Описанная проблема может быть разрешена только тогда, когда будет обеспечена взаимная ситуационная осведомлённость пилотов и внешних пилотов с возможностью гарантированного предотвращения авиационных происшествий.

При сопоставлении российских и международных правил регулирования беспилотной авиатехники выясняется, что в России беспилотная авиатехника эксплуатируется с игнорированием минимальных стандартов безопасности.

Согласно действующему законодательству, в России взаимодействие авиационных властей и владельцев БАС ограничено прохождением процедуры регистрации БАС. Даже установка аппаратуры удалённой идентификации (обязательная процедура для любого владельца даже любительского дрона в зоне регулирования EASA и FAA) в России не обязательна, равно как необязательно прохождение минимального курса по обучению правилам безопасной эксплуатации (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Соотношение российских и международных стандартов регулирования дронов

	Российские правила	Правила FAA Small UAS, Part 107	Правила EASA U-Space 2021/664
Регистрация дронов	Обязательна	Обязательна	Обязательна
Установка аппаратуры удалённой авиации	Не предусмотрена	Remote ID обязательно	NET-RID обязательно
Подготовка внешнего пилота любительского дрона	Не обязательна	Обязательна, online	Обязательна, online, offline
Технологии ОрВД	Аналоговые, 1090 ES	Цифровые, FLARM	Цифровые, UAT
Киберзащита	Отсутствует, концептуально невозможна	Шифрованный радиопrotocol	Шифрованный радиопrotocol

Т а б л и ц а 3

Особенности стандартов АЗН-В

Стандарт	Частота	Скорость	Страны	Позиция ИКАО
1090 ES	1 090 МГц	1 Мбит/с	Единый стандарт ИКАО	Стандарт с середины XX в.
LDACS	960–1 164 МГц	От 0,55–2,6 Мбит/с	Рекомендован ИКАО	Перспективный стандарт
UAT	978 МГц	1 Мбит/с	Утверждён ИКАО для США	Стандарт США
VDL-4	108–118 МГц	19,2 Кбит/с	Допущен ИКАО, использует только Россия	Допущен в Европе

Основным техническим вопросом, который требуется решить для исправления ситуации, является вопрос о том, какие стандарты передачи информации и автоматического зависимого наблюдения (далее – АЗН-В) целесообразно использовать. Практически все российские производители оборудования ОрВД ориентируются на применение стандарта 1090 ES. Однако этот стандарт практически непригоден для использования в лёгкой пилотируемой и беспилотной авиации. Например, в марте 2019 г. Минтранс Канады совместно с поставщиком аэронавигационных услуг NavCanada запретили использование малогабаритных передатчиков АЗН-В 1090 ES в национальном проекте UTM. Это было обусловлено:

- недостаточным для массового применения БВС количеством уникальных 24-битных адресов, идентифицирующих принадлежность воздушного судна;
- недопустимым уровнем внутрисистемных помех передатчиков множества БВС, делающих невозможным наблюдение за пилотируемыми воздушными судами;
- отсутствием кибербезопасности линии передачи данных;
- высокими уровнями рабочей нагрузки и внутрисистемных помех для магистральных ВС.

Малоскоростной и малопопулярный стандарт VDL-4, похоже, не имеет будущего, несмотря на масштабные вложения, сделанные в развитие его

инфраструктуры в России. Оборудование для внедрения стандарта LDACS, одобренного ИКАО, пока серийно не выпускается. UAT не допущен к эксплуатации в европейской зоне ИКАО (табл. 3).

Из всего серийно производимого в мире оборудования обеспечения полётов пилотируемых и беспилотных воздушных судов в едином воздушном пространстве практически единственным реалистичным для локализации в России является оборудование системы FLARM, допущенное к эксплуатации в Европе. Данные, передаваемые от FLARM по зашифрованному радиоканалу:

- текущие координаты;
- высота полёта;
- сигнал-предупреждение о возможном столкновении с указанием направления «угрозы»;
- идентификатор летательного аппарата;
- идентификатор летательного аппарата, с которым возможно столкновение;
- прогнозируемая траектория полёта.

Эта система работает по принципу прогнозирования траектории движения относительно близлежащих судов. В то же время система получает траекторию движения от окружающего трафика. Использование этой системы европейскими ПВС и БВС на высотах ниже 3000 м на порядки превосходит использование аппаратуры стандарта 1090 ES (рис. 4) [20].

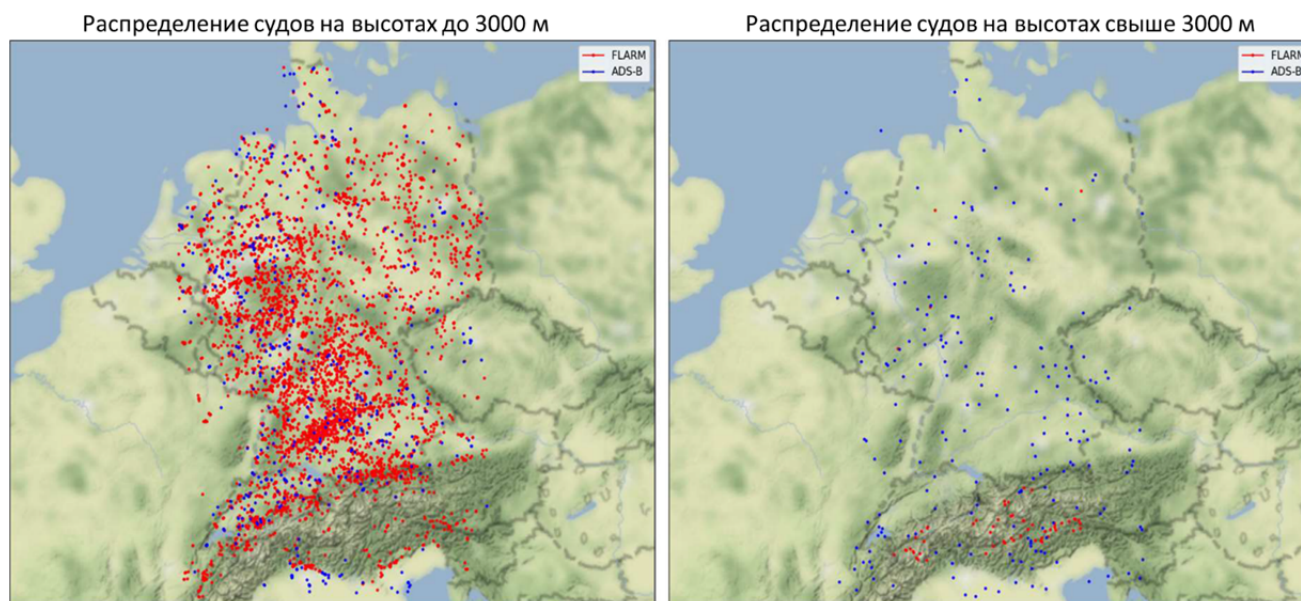


Рис. 4. Использование аппаратуры 1090 ES (синий цвет) и FLARM (красный цвет)

Fig. 4. Using 1090 ES equipment (blue) and FLARM (red)



Рис. 5. Алгоритм работы FLARM

Fig. 5. The Algorithm of the FLARM operation

Интеллектуальный алгоритм планирования траектории FLARM определяет возможность столкновения с другими судами на основе встроенной модели оценки рисков (рис. 5).

Аппаратура FLARM позволяет эффективно предотвращать столкновения с воздушными судами, оснащёнными аппаратурой стандарта 1090 ES. Воздушные суда с ADS-B, но не оборудованные FLARM, воспринимаются пилотом (внешним пилотом) воздушного судна с FLARM как имеющие приоритет (рис. 6).

За 16 лет применения системы FLARM установлено более 50 000 комплектов оборудования, в том числе 20 000 – на БВС. Общий налёт воздушных судов с этой системой составляет более 40 млн ч. Оборудование может устанавливаться без интеграции в

систему управления воздушным судном, что позволит избежать необходимости повторной сертификации. Таким образом, в России стоит как минимум попытаться учесть отработанную технологию, позволяющую решить задачу ОрВД ПВС и БВС в едином воздушном пространстве, а не пытаться «изобрести велосипед» с нуля (рис. 7).

Ввиду незагруженности воздушного пространства, обилия территорий с низкой плотностью населения и высокой потребностью в авиационных перевозках и работах, в ближайшие несколько лет Россия будет иметь абсолютное преимущество перед странами ЕС и США в части интеграции БВС в единое воздушное пространство в полном соответствии с требованиями ИКАО [21]:

- не возрастёт риск для других воздушных судов или третьих сторон;
- не будет усложнён или ограничен доступ в воздушное пространство;
- будет гарантировано обнаружение и предотвращение столкновений;
- БВС будет вести себя и реагировать так же, как ПВС;
- ответственность внешнего пилота будет аналогична ответственности пилота на борту.

Так, средняя плотность населения России 8,57 чел./км², причём 2/3 страны имеют плотность населения менее 3 чел./км². По расчётам Российской ассоциации эксплуатантов воздушного транспорта (АЭВТ), плотность воздушного движения (количество ВС на 1 000 км² в год) в ФРГ в 140 раз выше среднероссийского уровня, а в Великобритании – в 160 раз. Даже над Украиной и Белоруссией в докризисное время плотность воздушного движения была на порядок выше, чем в среднем над Россией.

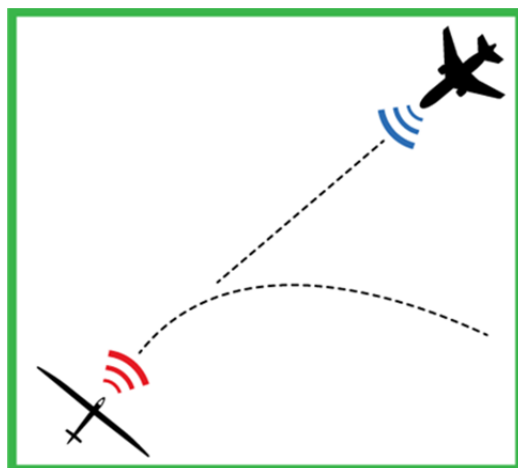


Рис. 6. Взаимодействие воздушного судна, оборудованного FLARM (красный цвет), с воздушным судном, оборудованным 1090 ES (синий цвет)

Fig. 6. Interaction of an aircraft with FLARM (red) with an aircraft with 1090 ES (blue)

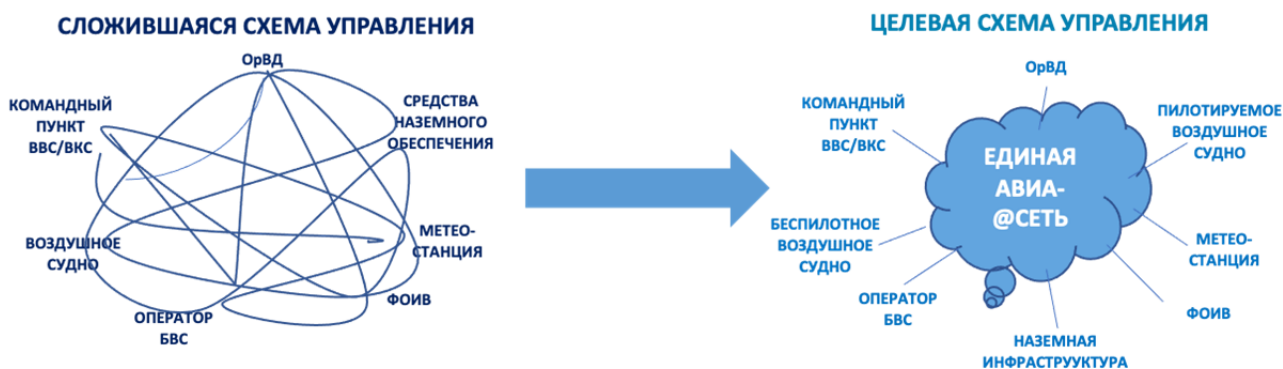


Рис. 7. Целевая ОрВД

Fig. 7. Target air traffic management system

Стоимость аэронавигационного обслуживания пролёта на 1 000 км в России в докризисное время была в 6 раз выше, чем в США. Это обусловлено тем, что на американского диспетчера в год приходилось в 9,4 раза больше полётов, чем на одного российского.

Из-за низкой интенсивности использования воздушного пространства многим органам ОрВД большую часть рабочего времени не приходится выполнять свою основную функцию – предотвращение столкновений воздушных судов. В этой ситуации остро необ-

ходимо найти такую технологию управления воздушным движением, которая, будучи недорогой или бесплатной для пользователя, обеспечит высокий уровень предоставляемых услуг, в первую очередь, высокую безопасность полётов, а также эффективность для решения задач поиска и спасания.

Построение подобной системы на основе технологии FLARM полностью соответствует концепции SWIM, которая является центральным компонентом Глобального аэронавигационного плана ICAO [22],

определяющим SWIM как «общесистемное управление информацией», обеспечиваемое на основе трёх основных принципов:

1. Правильная информация.
2. Правильным потребителям.

3. В правильное время.

Импортозамещённый вариант Единой системы автоматического предотвращения столкновений и полётно-информационного обслуживания в воздушном пространстве «G» представлен на рис. 8, 9.



Рис. 8. Вариант комплексной БСПС и ПИО

Fig. 8. A variant of an integrated on-board collision avoidance system and flight information service

Для беспилотных воздушных судов, выполняющих полёты в пределах прямой видимости

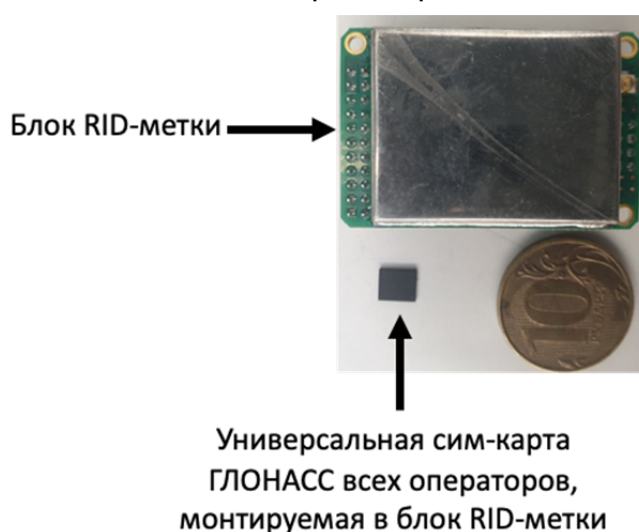


Рис. 9. Вариант RID-метки

Fig. 9. A variant of RID tag

Учитывая изложенное, в сфере ОрВД необходимо:

– внедрить и валидировать импортозамещённый и усовершенствованный вариант апробированной в Европе системы FLARM, что позволит обеспечить взаимную ситуационную осведомлённость внешних пилотов и пилотов, а также техническую основу региональных центров управления воздушным движением пилотируемой и беспилотной авиации в пространстве G;

– обеспечить научно-методическое и лётно-испытательное сопровождение интеграции региональных центров управления воздушным движением

пилотируемой и беспилотной авиации в пространстве G в ЕС ОрВД;

– разработать новые федеральные правила использования воздушного пространства класса G пилотируемой и беспилотной авиатехникой.

3. Разработка, сертификация лётной годности и серийное производство воздушных судов

В период с 1991 г. парк коммерческой малой авиации сократился более чем на порядок. Разработка и производство лёгких и сверхлёгких воз-

душных судов были практически свёрнуты. Немногочисленные воздушные суда малой авиации, за редким исключением, разрабатывались под иностранные силовые установки и импортную авионику. За последние три десятилетия был в значительной мере утрачен опыт разработки и испытания воздушных судов со взлётной массой до 495 кг, что было бы близко ко взлётной массе практически всех разрабатываемых в России гражданских беспилотников (рис. 10).

Ситуация с сертификацией лёгких и сверхлёгких воздушных судов ещё хуже. С момента перехода

прав на сертификацию гражданских воздушных судов от Авиарегистра МАК к Росавиации известно об одной сертификации отечественного лёгкого пилотируемого воздушного судна – МВ-500, разработанного ООО «Фирма МВЕН» [23], и одной сертификации сверхлёгкого беспилотного воздушного судна БАС-200 производства АО «Вертолёты России». В то же время в ходе «сертификационного туризма» отечественные разработчики получили не менее 18 сертификатов лётной годности лёгких и сверхлёгких воздушных судов от американских, европейских и канадских авиационных властей.

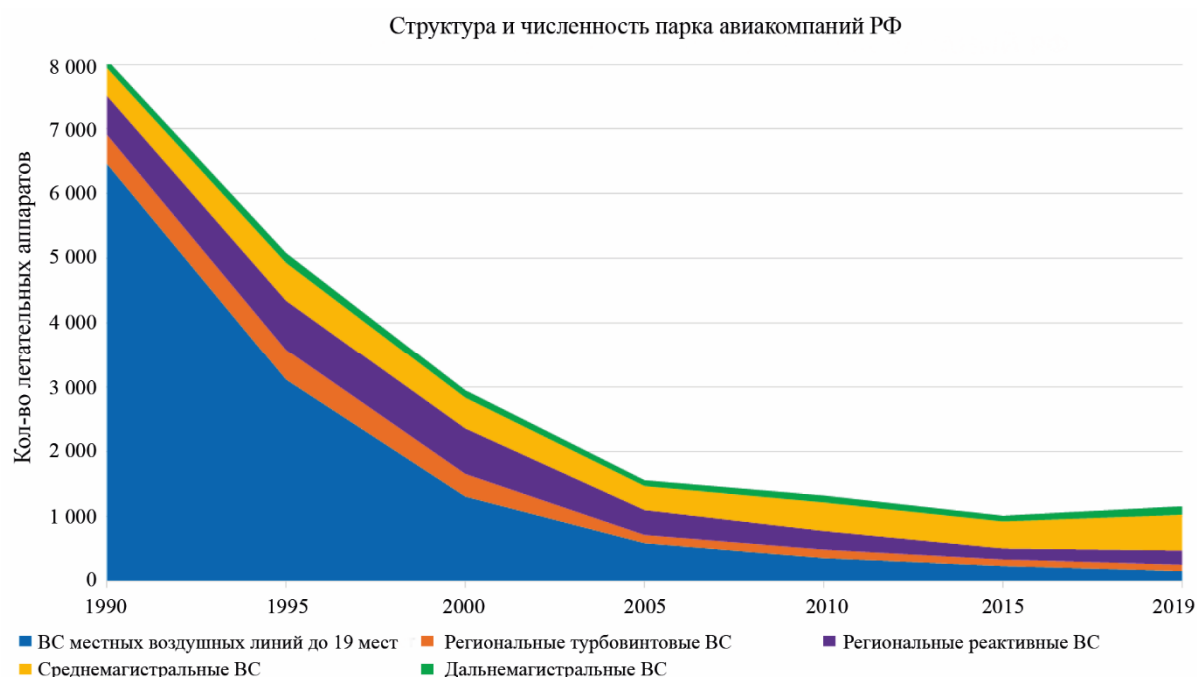


Рис. 10. Динамика парка гражданской коммерческой авиации

Fig. 10. The dynamics of the civil commercial aviation fleet

Как известно из открытых источников, на подготовку и проведение сертификации БАС-200 потребовалось два с половиной года, из которых один год заняли подготовительные работы, а полтора – собственно экспертиза с участием авиационных властей. Прямые расходы на сертификацию составили не менее 150 млн руб. [24]. Исходя из анализа карты данных Сертификата типа ограниченной категории БАС-200 [25], его сертификат практически исключает возможность перевозки грузов – главного конкурентного преимущества БАС-200 (соотношение максимальной и минимальной взлётной массы с учётом массы не вырабатываемого остатка топлива составляет на груз отрицательное число (–5 кг), а дальность сертифицированного канала связи ограничивает зону полётов дальностью прямой видимости).

С точки зрения авиационных властей и аффилированных с ними структур проблема коренится в том,

что «низкая компетенция разработчиков в вопросах сертификации является одним из ключевых факторов увеличения сроков и стоимости процедур оценки соответствия БАС нормам лётной годности» [26]. Однако разработку, испытания и сопровождение сертификации БАС-200 вёл Национальный центр вертолётостроения «Миль и Камов», располагающий самыми компетентными специалистами в сфере вертолётостроения не только в России, но и в мире.

Вероятнее всего, проблема коренится в другом: как российские авиационные власти, так и экспертное сообщество за истекшие десятилетия утратили опыт сертификации лёгких и сверхлёгких воздушных судов. Для компенсации своей некомпетентности они навязывают разработчикам процедуры сертификации «большой авиации», начиная от шестимесячного цикла выдачи разрешения на первый взлёт и заканчивая требованиями, например, к мол-

ниезащите (несмотря на то, что стокилограммовый беспилотник при попадании молнии, вероятнее всего, полностью испарится). Росавиацией в конце 2022 г. были впервые установлены нормы лётной годности для беспилотных воздушных судов самолётно-го типа с максимальной взлётной массой до 5 400 кг и вертолётно-го типа – до 750 кг [27]. Отсутствие дифференцированных норм лётной годности для БВС максимальной взлётной массой до 115 и до 495 кг влечет за собой предъявление к агродрону тех же требований, которые предъявляются к пятитонному беспилотному Ан-2. Это противоречит как международной практике, так и элементарному здравому смыслу.

В зоне ответственности EASA и FAA беспилотные воздушные суда с максимальной взлётной массой до 600 кг допускаются к коммерческому использованию без проведения полноценной сертификации в минимальные сроки за минимальную стоимость. Если экстраполировать подход EASA на российские условия, то можно с уверенностью утверждать, что знаменитый БАС-200, получивший первый российский сертификат типа ограниченной категории, в ЕС был бы допущен как минимум к тому же спектру авиаработ на порядок быстрее и на два порядка дешевле.

Таким образом, в России требуется заново восстанавливать компетенции по сертификации сверхлёгких и лёгких воздушных судов. На практике это означает безальтернативность внедрения аналога принятого EASA 26.05.2022 г. правила FTB MOC SC Light-UAS о возможности сертификации по суммарному кумулятивному количеству накопленных лётных часов (FH DTP). Согласно этому правилу, лёгкое или сверхлёгкое воздушное судно может выполнять авиаработы с низкой степенью риска и после практического подтверждения безопасности допускаться к авиаработам с повышенным риском. Параллельно сертификационные лаборатории и центры смогут нарастить свои компетенции и в перспективе обеспечить снижение длительности сертификации на порядок, а её стоимости – на два порядка.

4. Создание и допуск к эксплуатации аэродромов, вертодромов, посадочных площадок

Главное препятствие для развития наземной инфраструктуры для лёгкой пилотируемой и беспилотной авиации состоит в том, что требования национальных авиационных властей к аэродромам, вертодромам, посадочным площадкам сформированы исходя из особенностей «большой авиации» и исключают коммерческую эффективность малоинтенсивной эксплуатации лёгкой и сверхлёгкой авиатехники. Вы-

полнение всех требований, установленных для легитимной эксплуатации наземной инфраструктуры, исключает её самоокупаемость для малых аэродромов и посадочных площадок, что приводит к деградации аэродромной сети и завышенным расходам бюджетной системы на её субсидирование.

Деградация наземной инфраструктуры гражданской пилотируемой авиации является одним из главных сдерживающих факторов развития рынка беспилотной авиации. Авиационные перевозки стали выполняться минимальным количеством летательных аппаратов с использованием минимального количества крупных хабов со свёртыванием иной авиационной активности. Исходя из официальных документов, в Государственный реестр аэродромов и вертодромов гражданской авиации включено 235 аэродромов, 92 из которых образуют национальную опорную аэродромную сеть. Территориальными органами Росавиации учтено 2 430 посадочных площадок, из которых не более 630 оформили паспорта обеспечения транспортной безопасности, т.е. реально функционируют [28].

Ситуацию усугубляет и доводит до абсурда необходимость перевода занимаемых поселковыми аэродромами земель в категорию земель промышленности, связи и транспорта с многократным ростом налоговой и административной нагрузки, а также трудовое рвение сотрудников правоохранительных и надзорных органов, формирующих статистику выявленных правонарушений путём контроля исполнения заведомо неисполнимых в малой авиации правовых норм.

Например, в экспериментальном правовом режиме АО «Почта России» из-за отсутствия аэродромов или нерентабельности их содержания была сделана ставка на БВС вертикального взлёта и посадки. Целевые показатели тарифа на доставку груза для самолётной техники оцениваются на уровне от 15 до 40 коп. за 1 кг на 1 км, а для вертолётной техники – до 1,5–2 руб. за 1 кг на 1 км. Иными словами, доставка грузов дронами самолётно-го типа на порядок дешевле доставки альтернативными воздушными судами. Кроме того, создание БВС вертолётно-го типа требует применения на порядок более сложной электроники и программного обеспечения. Как следствие, ЭПР «Почты России» в должной мере не обеспечен необходимыми беспилотными воздушными судами, а себестоимость применения имеющихся БВС вертолётно-го типа практически исключает коммерческую эффективность проекта.

Первым шагом в направлении формирования необходимой для беспилотной авиации наземной инфраструктуры должно стать сокращение административных и финансовых издержек, связанных с земельным участком. Исходя из существующей

нормативной базы, прокуратура повсеместно требует перевода земель, занимаемых посадочной площадкой, в земли промышленности, связи и транспорта, что, согласно устоявшейся правоприменительной практики, увеличивает стоимость владения с нескольких десятков тысяч рублей в год до нескольких миллионов.

Решение этой проблемы без изменения действующего законодательства может быть обеспечено лишь незначительной корректировкой Классификатора видов разрешённого использования земельных участков [29], согласно которой пункты 1.18 (Обеспечение сельскохозяйственного производства), 5.0 (Отдых (рекреация)), 9.0 (Деятельность по особой охране и изучению природы), 10.0 (Использование лесов), 11.0 (Водные объекты), 12.0 (Земельные участки (территории) общего пользования) необходимо дополнить словами: «размещение посадочных площадок, не подлежащих, согласно нормам воздушного законодательства, сертификации, при условии письменного согласия их владельца на использование посадочной площадки для выполнения воздушных перевозок и авиационных работ в целях, предусмотренных назначением земельного участка».

Основанием для корректировки Классификатора видов разрешённого использования земельных участков может являться разъяснение законодательства [30] в части того, что целями, связанными с назначением участка, могут являться цели ведения авиационного мониторинга, доставки людей, эксплуатирующих указанный участок, и грузов, необходимых для его использования. В этом контексте строительство аэродромов является способом (иногда единственным) для организации использования земли по назначению. Другим основанием для корректировки является вытекающая из законодательства возможность использования земель опытно-производственными, учебными, учебно-опытными и учебно-производственными подразделениями научных организаций, что позволяет научно-исследовательским организациям, имеющим в своём составе лётно-испытательные комплексы, использовать землю для создания инфраструктуры, обеспечивающей функционирование лёгкой авиации.

Важным шагом является оптимизация подходов к построению системы субсидирования несертифицируемых посадочных площадок. Например, в США государство выделяет гранты на содержание и реновацию публичных посадочных площадок при условии их открытости для проведения взлётов / посадок без ограничений. Программа улучшения обслуживания аэропортов (AIP) предоставляет гранты государственным учреждениям – и в некоторых случаях частным владельцам и организациям – на планирование и раз-

витие аэропортов государственного пользования, которые включены в Национальный план интегрированных систем аэропортов (NPIAS) [31]. Для крупных и средних основных узловых аэропортов грант покрывает 75% приемлемых расходов. Для небольших аэропортов грант покрывает 90–95% приемлемых расходов. Общий объем субсидий – порядка \$3,2 млрд в год. Кроме того, управляет передачей имущества военных баз для создания на его основе гражданских аэропортов, а также содействием совместному использованию существующих военных авиабаз. Субсидии могут выделяться на проектирование и строительство / реабилитацию взлётно-посадочной полосы, рулевых дорожек, дренажа, разметки, а также светосигнальное и метеорологическое оборудование. Прямо запрещено бюджетное субсидирование создания и эксплуатации топливозаправочных комплексов, авиационных ангаров, зданий и сооружений. В России не только передача инфраструктуры военных баз, но и перечень аэродромов совместного базирования утверждается Правительством РФ и включает в себя большую часть действующих аэродромов (133) [32].

В этой связи для развития беспилотной авиации должна быть отработана новая система оценки рисков и созданы авиационные правила, не исключающие функционирование посадочных площадок с приемлемым для их владельцев уровнем рентабельности. Примером для таких правил может послужить успешный опыт, накопленный советской малой авиацией, а также авиацией общего назначения США, Евросоюза, Австралии и других стран.

Учитывая изложенное, в краткосрочной перспективе необходимо:

- сформировать условия для расконсервации и возобновления коммерческой эксплуатации аэродромов путём смягчения требований к их операторам и средствам обеспечения полётов до минимально безопасного уровня;

- разработать новые федеральные правила к коммерческой эксплуатации малых аэродромов, вертодромов и посадочных площадок на методологической основе правил, действовавших в СССР, с учётом правил FAA, EASA, а также практики, нарабатанной в Опытном районе.

5. Подготовка, сертификация или допуск персонала к профессиональной деятельности

Сложившиеся в последние десятилетия подходы к подготовке отечественного авиационного персонала далеки от стандартов развитых авиационных систем. Программы подготовки разрабатываются каждым из российских авиационных учебных центров (далее – АУЦ) самостоятельно и предоставляются на

рассмотрение авиационных властей, которые могут годами их не согласовывать. Непрозрачность и длительность процедур обеспечивают максимизацию аппаратного веса чиновников регулятора, с перекладыванием почти всей ответственности за результативность программ на её авторов. Согласно российским национальным требованиям, обучаемый должен предварительно пройти 255-часовой курс теоретической, наземной и тренажёрной подготовки и лишь после этого допускается к полётам.

Кроме того, сложившаяся практика предполагает подготовку частных пилотов в негосударственных АУЦ только по программам дополнительного профессионального образования. В результате выпускник средней школы не может стать частным пилотом до предоставления им документов о среднем или высшем профессиональном образовании. При этом его одноклассник, который после 9-го класса ушёл получать, например, профессию слесаря-сантехника, может быть допущен к подготовке по программе PPL. В открытом доступе не удалось обнаружить ни одного исследования, объясняющего, чем базовое образование второго больше подходит для авиации, чем образование первого. Наконец, подготовку авиационного персонала дополнительно осложняют процедуры и требования, связанные с медицинским освидетельствованием. По состоянию на начало 2022 г. медицинское освидетельствование велось Центральной врачебно-лётной экспертной комиссией (далее – ЦВЛЭК ГА) и 37 ВЛЭК ГА, распределённых по федеральным округам. Например, весь Уральский федеральный округ обслуживает 2 ВЛЭК ГА, а Дальневосточный, сопоставимый по площади территории с Европой, – 5 [33].

На этом фоне предельно контрастно выглядят, например, американские стандарты подготовки. Согласно требованиям FAA, обязательно посещение 35 ч теоретических занятий по стандартной программе с неограниченным временем на самоподготовку. Параллельно допускается лётная практика, которая должна составить не менее 40 ч (35 ч при обучении в лётной школе, аккредитованной FAA). В США медкомиссия на PPL занимает около полутора часов, проводится имеющим соответствующее разрешение врачом общей практики, а анализы сдаются только на отсутствие следов наркотических веществ, а уровень требований к здоровью сопоставим с требованиями к здоровью водителя автомобиля. Медкомиссия на CPL несколько сложнее, но также занимает немного времени с понятными, прозрачными и логичными требованиями.

Несмотря на длительность подготовки авиационного персонала, её качество вызывает серьёзные нарекания. Генеральной прокуратурой «установлено, что к основным причинам аварийности относят-

ся несоответствие образования, полученного выпускниками авиаучилищ, требованиям авиакомпаний, отсутствие надлежащего контроля за исполнением Государственной программы обеспечения безопасности полётов воздушных судов гражданской авиации» [34].

В сфере подготовки персонала беспилотной авиации отставание России ещё более контрастно. Так, Россия является одной из немногих развитых стран, авиационные власти которых до настоящего времени не утвердили типовые программы подготовки внешних пилотов и иных лиц, от действия которых напрямую зависит безопасность полётов. Более того, государственные органы фактически самоустранились от формирования системной методологии подготовки кадров для беспилотной авиации, установив, что с 1 марта 2023 г.:

- эксплуатант, выполняющий авиационные работы на беспилотном воздушном судне с максимальной взлётной массой 30 кг и менее, должен организовать подготовку и контроль квалификации лиц, осуществляющих управление беспилотным воздушным судном [35];

- из перечня авиационного персонала исключаются внешние пилоты гражданских беспилотных воздушных судов с максимальной взлётной массой 30 кг и менее [36];

- внешний пилот беспилотного воздушного судна с максимальной взлётной массой 10 кг и менее должен пройти профессиональное обучение [14].

Несмотря на отсутствие опыта легальной коммерческой эксплуатации БВС, отсутствие утверждённых авиационными властями программ подготовки специалистов, требований к обладателю свидетельства внешнего пилота и даже формы указанного свидетельства, был введён профессиональный стандарт «Специалист по эксплуатации беспилотных авиационных систем, включающих в себя одно или несколько беспилотных воздушных судов с максимальной взлётной массой 30 кг и менее» [37]. Иными словами, ответственные разработчики стандарта написали, а Минтруд России утвердил стандарт профессии ещё до появления первого легального опыта профессиональной деятельности в этой сфере. Параллельно был разработан и введён Федеральный государственный образовательный стандарт по специальности «эксплуатация беспилотных авиационных систем» [38].

С тем же успехом на заре рыночных реформ на основе опыта советских валютных спекулянтов можно было бы ввести профессиональные стандарты банковских работников, а на основе опыта цеховиков – стандарты подготовки рабочих фабрик по производству потребительских товаров. Подобные стандарты не только консервировали бы отсталость и

криминальный характер экономики, но и блокировали развитие зарождавшегося легального бизнеса. В соответствии с законодательством об образовании, в области подготовки специалистов авиационного персонала гражданской авиации реализуются основные программы профессионального обучения, среднего профессионального и высшего образования, а также дополнительные профессиональные программы [39]. Существующая нормативная база искусственно сужает возможность применения программ профессионального обучения (приобретение профессиональной компетенции без изменения уровня образования [40]), что влечёт за собой длительность подготовки в 3–5 раз большей, чем это практикуется за рубежом. Самым простым вариантом решения данной проблемы является внесение в Перечень профессий рабочих, должностей служащих, по которым осуществляется профессиональное обучение [41], позиции «пилот воздушного судна с максимальной взлётной массой до 5 700 кг» и «внешний пилот воздушного судна с максимальной взлётной массой до 5 700 кг».

На данном уровне развития беспилотников не существует образовательного контента, который требуется преподавать 2-3 года, необходимых для выдачи диплома о среднем профессиональном образовании. В результате необходимые для диплома часы заполняются бесполезными, с точки зрения профессии, предметами. В США, чтобы управлять дроном FAA Small UAS (Part 107), необходим сертификат удалённого пилота. Он выдаётся лицам старше 16 лет, физическое и психическое состояние которых позволяет безопасно управлять дроном, умеющим читать, говорить, писать и понимать по-английски. Для получения сертификата необходимо каждые 24 календарных месяца проходить переподготовку онлайн и сдать экзамен по авиационным знаниям: «General – Small» [42].

В сложившихся условиях в сфере подготовки персонала для БАС принципиально важно разработать и внедрить:

- программу массовой подготовки и тестирования знаний внешних пилотов-любителей рекреационных дронов (БВС взлётной массой до 30 кг, не используемых в коммерческих целях) с выдачей аналога сертификата «TRUST» FAA;

- программу подготовки, тестирования знаний и практических навыков внешних пилотов профессиональных дронов (БВС, используемых в коммерческих целях) с выдачей пилотского удостоверения по правилам, близким к правилам Part 107 FAA;

- программу подготовки, тестирования знаний и практических навыков техников профессиональных дронов и руководителей полётов по правилам, близким к правилам, принятым в Республике Беларусь;

- новые федеральные правила подготовки и сертификации внешних пилотов БВС, техников БВС, руководителей полётов БВС.

Кроме того, требования к здоровью настоятельно необходимо ограничить предоставлением справки водительской медкомиссии на права категории «В».

6. Обеспечение авиационной, транспортной и информационной безопасности

Требования авиационной и транспортной безопасности исключают коммерческую эффективность эксплуатации транспортной инфраструктуры с низким пассажиропотоком. Выполнение всех требований, установленных для легитимной эксплуатации транспортной инфраструктуры с низким пассажиропотоком, практически невозможно, что провоцирует правовой нигилизм и затрудняет привлечение внебюджетных инвестиций.

В официальных комментариях регулятор связывает убыточность аэропортов с малым пассажирооборотом с низкой численностью населения, дефицитом воздушных судов различной пассажироместимости и ограниченностью возможности региональных бюджетов по стимулированию региональных и местных авиаперевозок [43], параллельно констатируя, что наиболее существенными факторами роста ставок аэропортовых сборов на сегодняшний день являются размер арендной платы за земельные участки, высокая степень износа аэродромного имущества и требования по обеспечению авиационной безопасности, сформированные без учёта интенсивности полётов [44].

Последовательное сокращение парка воздушных судов долгое время позволяло регулятору поддерживать иллюзию относительно высокой безопасности отечественной авиации. В настоящее время отечественная авиасистема стала пожирать плоды постсоветского развития, подтверждая очевидное: деградация объёма перевозок в конечном итоге ведёт к деградации их безопасности, что говорит о провале попыток отечественного регулятора по исключению любых рисков путём утверждения запретительных нормативов вне зависимости от вероятности наступления негативных последствий. В России вплоть до 2020 г. наблюдалась почти 100%-я корреляция между сокращением авиационных происшествий и катастроф и сокращением парка эксплуатируемых воздушных судов (рис. 11) [45].

Дальнейшее применение архаичных подходов к управлению и абсолютизация интересов регулятора в ущерб остальным субъектам рынка неизбежно повлечёт за собой дальнейшее ослабление безопасности и эффективности национальной авиасистемы, приемле-

мый уровень которых достигим только при обеспечении динамичного развития авиации. Критически важным становится признание существующего положения

дел и необходимости привлечения широкого круга специалистов для опытно-экспериментальной отработки новых технологических и регулятивных подходов.



Рис. 11. Корреляция между количеством воздушных судов и авиационных происшествий

Fig. 11. The correlation between the number of aircraft and accidents

Для развития беспилотной авиации принципиально важно сокращение расходов и рисков владельца, а также оператора несертифицируемой посадочной площадки по выполнению функций, связанных с обеспечением мер авиационной и транспортной безопасности. Согласно существующим нормативным документам и сложившейся правоприменительной практике, на владельца посадочной площадки возложен широкий круг обязанностей. Максимальный их объем предполагал необходимость установки периметрового ограждения ВПП с сигнализацией, обеспечение контроля, досмотра и охраны, а также патрулирования с использованием групп быстрого реагирования, установки систем видеонаблюдения и передачи информации с использованием интернета (который тоже требовалось обеспечить) [46]. В дальнейшем требования были смягчены и дифференцированы в зависимости от масштабов аэродромов и расположенных на них объектов [47].

Средний пассажирооборот большинства посадочных площадок, ограниченный четырьмя пассажирами в сутки, исключает возможность организации авиационной и транспортной безопасности за пределами поддержания эксплуатационной готовности ВПП (расчистка снега, покос травы, ремонт покрытия), обеспечения исправности светосигнального, навигационного и метеорологического оборудования, а также обеспечения радиосвязи.

Для существования наземной инфраструктуры беспилотного авиатранспорта должны быть обеспечены условия, при которых все работы мог бы выполнять один здоровый и вменяемый человек, подготовленный к управлению трактором, ведению радиообмена и использованию светосигнального оборудования.

Учитывая изложенное, необходимо:

- отработать новые правила авиационной безопасности, позволяющие одновременно обеспечить исполнимость, коммерческую эффективность и приемлемый уровень безопасности;
- разработать новые федеральные правила авиационной безопасности, устранив одновременное существование параллельных систем авиационной и транспортной безопасности.

Подходы к организации массового производства беспилотных авиационных систем

На протяжении почти всего периода реализации дорожной карты по развитию беспилотной авиации не прекращаются попытки обсуждать вопросы разработки и производства БАС в «сферическом вакууме» вне взаимосвязи с возможностями и ограничениями национальной авиационной системы. Исходя из классификации воздушных судов, вытекающей из ВЗК РФ, практически все производимые в России БВС относятся к категории сверхлёгких воздушных судов, которая ограничена максимальной взлётной

массой 495 кг, причём большая часть производимых беспилотников попадает в нижний сегмент этой категории (БВС с массой конструкции 115 кг и менее).

Требования к организации производства сверхлёгких воздушных судов кардинально отличаются от требований к организации производства «большой авиации». Проектирование и производство лёгких летательных аппаратов характеризуется тем, что:

- порог входа на этот рынок относительно низок. По данным ИКАО, в мире насчитывается более 18 тыс. фирм, занимающихся разработкой и производством лёгких и сверхлёгких воздушных судов [48]. Олигополии мирового масштаба существуют преимущественно в производстве критических узлов и агрегатов (двигатели, авионика). Однако при наличии выраженного платёжеспособного спроса возможно быстрое формирование новых производителей и критических комплектующих;

- при проектировании лёгких летательных аппаратов возможно быстрое формирование новых научных решений, направлений и даже школ;

- риски носят микроэкономический характер и могут быть покрыты и нивелированы при минимальных финансовых и интеллектуальных затратах. В этой связи именно в сфере лёгких летательных аппаратов возможно появление и применение инновационных технологий и появление прорывных продуктов. В этой связи кадры могут быть подготовлены относительно быстро, в том числе за счёт привлечения специалистов из неавиационных научных школ и отраслей;

- при установлении простых и понятных правил проектирования, производства и эксплуатации лёгкой авиации её развитие возможно и даже целесообразно за счёт внебюджетных источников.

Таким образом, «входной билет» на рынок проектирования и производства лёгких летательных аппаратов относительно дешёв, инновационность высока, а цикл разработки-испытаний-ввода в эксплуатацию при правильно выстроенной организационно-правовой среде краток. Данный сегмент авиационной системы способен не только развиваться без бюджетных инвестиций, но и быть основой множества поисковых НИОКР, реализуемых в ходе множества венчурных авиастроительных проектов. Беспилотный сегмент сверхлёгкой авиации имеет ещё больший спектр возможностей для быстрого развития.

В существующей рыночной и управленческой среде быстрая массовая реализация эффективных авиастроительных и авиаэксплуатационных проектов возможна только в сфере малой пилотируемой и беспилотной авиации, где существует возможность нивелировать те противоречия, которые практически

неразрешимы в сфере большого гражданского и военного авиастроения (рис. 12):

- практически полная утрата лёгкой авиации и связанной с ней наземной инфраструктуры даёт шансы при минимальном сопротивлении регуляторов и бенефициаров финансовых потоков оптимизировать всю регулятивную среду, обеспечив одновекторность воздействий со стороны всех субъектов управления или их нейтральность;

- накопленный объем неудовлетворённого платёжеспособного спроса при относительной дешевизне лёгкой авиатехники и необходимой для её эксплуатации наземной инфраструктуры позволит развивать не зависящие от бюджетного финансирования авиастроительные и авиаэксплуатационные проекты с серийностью, позволяющей обеспечить их окупаемость;

- огромное количество специалистов, подготовленных авиационными и техническими вузами, формирует потенциал для возникновения тысяч фирм, специализирующихся на разработке и производстве всего спектра беспилотной авиатехники даже в условиях санкций;

- неограниченный потенциал использования воздушного пространства регионов с низкой плотностью населения для опытно-экспериментальной отработки новых летательных аппаратов, систем ОрВД и технологий эксплуатации воздушных судов в сочетании со значительными свободными площадями и квалифицированным персоналом авиастроительных предприятий позволяет создать комфортные условия для развития национальных и международных стартапов в этих сферах.

Возникает вопрос, что же до настоящего времени мешало и мешает поныне созданию тысяч фирм по разработке и производству беспилотной авиатехники, если есть и платёжеспособный спрос, и специалисты, и воздушное пространство? Ответ прост – мешает то же, что мешает производству лёгкой пилотируемой авиатехники.

Во-первых, не производится или производится в слишком малых объёмах, низким качеством и большой ценой значительная часть критических комплектующих – от силовых установок до электронной компонентной базы. Безусловно, важное обсуждение вопросов формирования гражданского заказа на БАС пока не детализируется до формирования системного заказа на комплектующие, в том числе в массовом порядке приобретаемые за рубежом. Безответственные заявления отдельных производителей, реализующих проекты импортозамещения, воспринимаются некритично. В результате закупка комплектующих осуществляется сотнями «коробейников» кустарно и по рознич-

ным ценам. Простая систематизация процесса закупки могла бы обеспечить кратный рост качества

импортных комплектующих с кратным сокращением их цены.



Рис. 12. Особенности российской системы регулирования лёгкой коммерческой авиации

Fig. 12. The specifics of the Russian light commercial aviation regulatory system

Во-вторых, регулятивная среда малой авиации была и остаётся крайне недружественной как к производителям, так и эксплуатантам.

Экспериментальные правовые режимы

На протяжении десятилетий российские авиационные власти формировали нормативную базу практически без проведения системных исследований и опытно-экспериментальной отработки новых идей. Нормативная база формировалась путём эклектичного сочетания отдельных нормативов, списанных с документов FAA и EASA, с воспроизведением элементов советской системы регулирования (которая, как и любая система, действенна лишь в комплексе). Неизбежные противоречия и «белые пятна» компенсировались интуитивными психоэмоциональными административно-управленческими экспромтами.

В случаях, когда механическое копирование иностранных нормативов было невозможно, а советская практика отсутствовала, регулятор впадал в управ-

ленческий ступор. Вследствие этого на протяжении многих лет не решались даже самые примитивные задачи, имеющие минимальный уровень новизны, например, выпуск и легализация программ подготовки внешних пилотов БВС или сертификация их лётной годности. В досанкционный период системные недостатки в деятельности национальных авиационных властей смягчались и даже полностью компенсировались благодаря глубокой интеграции в мировую авиационную систему. Всё – от сертификации лётной годности воздушных судов до надзора за большей частью реально задействованного в пассажироперевозках самолётного парка – осуществлялось по иностранным стандартам и с участием иностранных специалистов. То же касалось и наземной инфраструктуры, а также технического обеспечения и методологии функционирования системы ОрВД. Реальные результаты практического применения национального регулирования, очищенные от тлетворного влияния Запада, проявились только в малой авиации. Неисполнимые нормативы привели к

тому, что количество эксплуатируемых аэродромов сократилось на порядок. Был утрачен почти весь парк лёгких воздушных судов и разрушена система обеспечения преемственности кадров.

В условиях санкций, не позволяющих заполнять научный и методологический вакуум за счёт международного сотрудничества, разрыв между системой регулирования и практикой стал критически опасным не только для местных воздушных перевозок, но и для всей коммерческой авиации. Национальная авиасистема попала в замкнутый круг: до анализа статистики применения инноваций, изменения проводить опасно, но до внедрения изменений в практику не будет должной статистики. В настоящее время отсутствует необходимая практика и достаточное количество готовых специалистов, чтобы быстро сформировать новые правила для гражданской беспилотной авиации. Дефицит экспертности обусловлен как многолетней стагнацией отечественной малой авиации – наиболее близкого к БВС сегмента авиасистемы, так и новизной вопросов развития беспилотной авиации. Попытки компенсировать этот дефицит привлечением специалистов «большой

авиации» или авиамоделлистов лишь усугубляют существующие проблемы, поскольку и те и другие склонны абсолютизировать свой опыт, который не всегда релевантен задачам организации коммерческого использования БАС.

Разработка адекватного регулирования и формирование вменяемой правоприменительной практики потребуют огромного объёма работы, не выполнимой без масштабного вовлечения в нормотворчество не аффилированных с регулятором и связанных с практикой специалистов. Однако даже при самой удачно подобранной команде для совершенствования системы регулирования малой коммерческой авиации отсутствует достаточный объём практики. Именно поэтому вводимые экспериментальные правовые режимы в области развития цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем (далее – ЭПР БАС) являются едва ли не единственным способом обеспечить формирование квалифицированного экспертного сообщества с минимальной историей успеха. Однако существующие подходы к выстраиванию ЭПР БАС далеки от совершенства (рис. 13).

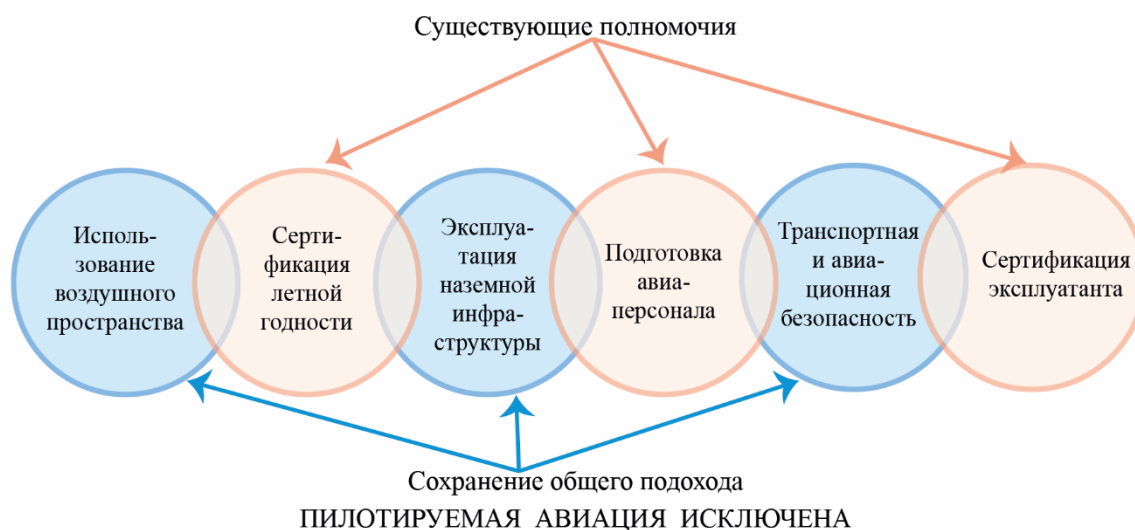


Рис. 13. Особенности регулирования в зоне экспериментального правового режима

Fig. 13. Specifics of regulation in the experimental legal regime zone

Во-первых, из 6 критических препятствий, блокирующих развитие малой авиации, в том числе её беспилотного сегмента, смягчено лишь три. И даже это смягчение выполнено половинчато: сохранены требования по длительной аудиторной теоретической подготовке по программе PPL в сертифицированных авиационных учебных центрах (российский вариант которой требует почти на порядок больше часов занятий, чем американский), обязательность прохождения совершенно неадекватной ВЛЭК, допуска БАС к эксплуатации в ЭПР по правилам пилотируемой авиации и др.

Во-вторых, практически в неизменном виде остались критические ограничения по использованию воздушного пространства, требованиям к наземной инфраструктуре и обеспечению безопасности, в том числе в части использования данных аэрофотосъёмки.

В-третьих, в эксперимент не включена пилотируемая авиация, что практически исключает возможность отработки реальных, а не надуманных бизнес-моделей по рентабельному выполнению авиационных работ и перевозок, поскольку эти бизнес-модели, за исключением отдельных сегментов авиамониторинга,

могут быть построены только при условии синергии пилотируемой и беспилотной авиации.

В экспериментальных правовых режимах отрабатывается и доказывается то, что давно уже отработано и доказано, а именно, что существуют функциональные сервисы, которые могут предоставляться с использованием беспилотных воздушных судов. Новизна сводится к подаче цифровых заявок и легализации сертификации техники и персонала. Почти все мыслимые американские и европейские методики решения этих задач находятся в открытом доступе. Цели, заявленные при утверждении экспериментальных правовых режимов в области развития цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем, достижимы и без экспериментальных правовых режимов, при условии минимального трудолюбия регуляторов и исполнения ими своих служебных обязанностей.

Главная проблема развития беспилотной авиатехники в России в рамках экспериментальных правовых режимов пока даже не заявлена. Она состоит в том, чтобы используемые для предоставления функциональных сервисов БВС не усложнили и не ограничили доступ в воздушное пространство пилотируемым воздушным судам, а также не увеличили риск для других воздушных судов или третьих сторон [49, 50]. Следовательно, приоритет – не развитие функциональных сервисов, сертификации техники и обучения персонала, а оснащение бортовыми электронными автоответчиками или всенаправленными трансляторами (вещателями) всех воздушных судов, осуществляющих полёты в нижнем едином воздуш-

ном пространстве, включая коммерческую, государственную, специальную пилотируемую авиацию и беспилотники [51].

Природно-географические особенности и научно-технические возможности России позволяют сформировать, испытать и внедрить в практику новый мировой стандарт управления воздушным движением пилотируемой и беспилотной авиации и тем самым выиграть от перехода на нами же созданные принципы лучшего регулирования (PBR) [52]. Для этого должна быть создана система управления, которая сможет глобально покрывать большие территории и обеспечить безопасную эксплуатацию в общем воздушном пространстве сотен тысяч летательных аппаратов [53]. Таким образом, первоприоритетной задачей Опытного района должна быть отработка вопросов, связанных с:

- гарантированной идентификацией ПВС и БВС;
- динамическим геофенсингом, позволяющим передавать и получать географические, высотные и временные ограничения;
- организацией передачи данных связь между ПВС и БВС, БВС и станцией внешнего пилота, пилотами и системой ОрВД;
- трекингом ПВС и БВС;
- разрешением конфликтов;
- минимизацией рисков.

Таким образом, ЭПР БВС должен обеспечить сочетание интересов сохранения единства системы организации воздушного движения и интересов одновременного развития пилотируемой и беспилотной авиации, а также систем ОрВД (рис. 14).



Рис. 14. Оптимальная система регулирования в зоне экспериментального правового режима

Fig. 14. Optimal regulatory system in the experimental legal regime zone

В этой связи одним из лучших вариантов ЭПР БВС является полная сегрегация воздушного пространства G макрорегиона (один или несколько субъектов РФ) с установлением временных стандартов АЗН-В, ОрВД и т.п., соблюдение которых будет обя-

зательным для всех пилотируемых и беспилотных воздушных судов государственной, гражданской и экспериментальной авиации. Возможно создание нескольких ЭПР БВС, на территории которых будет проводиться апробация различных технологий.

Вывод

Россия лишь минимально задействует пока ещё сохранившийся уникальный кадровый потенциал специалистов в области создания, испытаний и эксплуатации авиации. Однако опыт постепенно утрачивается вместе с его носителями, а национальная авиасистема продолжает использовать архаичное регулирование, а также устаревшие на десятилетия методики и требования. Функционеры государственных и квазигосударственных структур яростно защищают сложившиеся схемы распределения полномочий, сфер влияния и финансовых потоков. Разобщённость и незаинтересованность в конечных результатах доходит до абсурда, когда функционируют параллельные системы транспортной и авиационной безопасности, лицензирования производителей авиатехники и их сертификации и т.д.

Стремительно развивающийся сегмент беспилотных авиационных систем характеризуется чрезвычайно низким порогом на вход, немыслимо быстрой для авиации скоростью разработки, производства и ввода в эксплуатацию новых продуктов. Критическим ограничением является организация испытаний, сертификации, опытной эксплуатации, применения новых методов ОРВД, подготовки кадров, формирования новых стандартов и технических решений в части наземной инфраструктуры. Россия с её огромным неудовлетворённым платёжеспособным спросом на авиаперевозки и авиаработы в малонаселённых районах Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока имеет подавляющее преимущество в возможности организации массовых испытаний и опытной эксплуатации принципиально новых технологий обеспечения аэромобильности и организации воздушного движения. Это открывает бесконечный потенциал для трансферта в авиацию технологий из других областей знания и отраслей с рез-

ким удешевлением стоимости авиаперевозок и авиаработ при одновременном повышении их качества. Для реализации этого потенциала необходима предельно гибкая, прозрачная и простая регулятивная система, комфортная инженерно-техническая среда, которая позволила бы создать условия для развития инновационных проектов.

Ближайшие месяцы станут определяющими для отечественной авиационной системы. Развилка достаточно очевидна. Наихудший из возможных сценариев состоит в том, что выделенные из ФНБ ресурсы будут использованы для консервации противоречий и недостатков российской авиасистемы с целью поддержания административного, психологического и материального комфорта авиационных властей, распорядителей и бенефициаров финансовых потоков. Реализация такого сценария уже в среднесрочной перспективе приведёт к полной утрате национальной авиации.

Альтернативный сценарий – формирование новой нормативно-правовой и экономико-технологической среды, нацеленной на преодоление системных противоречий и недостатков. Однако радикальное изменение правил игры – крайне непростая задача. Новые правила нужно сначала выработать, затем существенно усовершенствовать исходя из опыта их применения, одновременно создав механизмы их гибкой и регулярной корректировки. Идеально подходят для решения этой задачи экспериментальные правовые режимы.

Для раскрытия потенциала ЭПР необходимо включение в эксперимент не только беспилотной, но и пилотируемой авиации с предельным упрощением требований к сертификации лётной годности, персонала и эксплуатанта, использованию воздушного пространства, наземной инфраструктуры, а также обеспечению безопасности.

Список источников

1. Руководитель Росавиации Александр Нерадько о состоянии и перспективах развития гражданской авиации России. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=7427>, <https://www.aviaport.ru/digest/2021/02/08/666199.html>
2. Перечень поручений Президента РФ по вопросам развития беспилотных авиационных систем от 30 декабря 2022 года № Пр-2548, от 6 декабря 2022 г. № Пр-2343.
3. Вайсберг И., Ельчанинов А.Ф. Отсутствие полноценной нормативной базы – главный сдерживающий фактор развития беспилотной авиации в России. URL: <https://www.aex.ru/docs/2/2021/3/5/3224/>
4. Порядок использования воздушного пространства РФ беспилотными воздушными судами (БВС, БПЛА, беспилотники, дроны). URL: <https://favt.gov.ru/poryadok-ispolzovaniya-bespilotnyh-vozduchnih-sudov/?ysclid=ldtzipgmbp192468957>
5. Постановления Правительства РФ от 24 марта 2022 г. № 458, 462.
6. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 октября 2022 г. № 419 «Об утверждении Перечня авиационного персонала гражданской авиации Российской Федерации». П. 3.
7. Указание «Об усилении прокурорского надзора за исполнением законодательства в сфере функционирования воздушного транспорта» от 25 января 2022 г. № 32/23. URL: <https://epp.genproc.gov.ru/web/gprf/documents?item=69914472&>
8. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам. ICAO Russian Doc 10019, п. 2.2.7.
9. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации «Управление безопасностью полётов». Добавление 2.
10. Воздушный кодекс РФ. Ст. 32, п. 5.
11. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам. Doc 10019.

12. ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2018. П. 3.2.6, 3.2.7.
13. ГОСТ Р 59517-2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. М. : Стандартинформ, 2021. С. 3.
14. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 14 сентября 2022 г. № 526н «Об утверждении профессионального стандарта «специалист по эксплуатации беспилотных авиационных систем, включающих в себя одно или несколько беспилотных воздушных судов с максимальной взлётной массой 30 кг и менее».
15. ГОСТ Р 54265-2010. Воздушный транспорт. Авиационные работы. Классификация. М. : Стандартинформ, 2012. С. 5–8.
16. Указ Президента Республики Беларусь «Об использовании авиамоделей» от 25 февраля 2016 г. № 81.
17. Правила использования авиамоделей в Республике Беларусь, утверждённые Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 16 августа 2016 г. № 636.
18. Руководство по дистанционно пилотируемым авиационным системам. ICAO Russian Doc 10019, рис. 1-1.
19. What is Unmanned Aircraft Systems Traffic Management? URL: <https://www.nasa.gov/ames/utm>
20. OpenSkyNetwork. URL: <https://opensky-network.org/> (дата обращения: 30.05.2021).
21. Global Air Traffic Management Operational Concept (Doc 9854).
22. Глобальный аэронавигационный план (док. 9759). URL: https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/GANP_ru.pdf
23. Сертификаты типа на самолёты. URL: <https://m.favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-odobritelniye-documenty/?id=5506>
24. БАС-200: беспилотный вертолёт. URL: <https://rostec.ru/news/bas-200-bespilotnyy-vertolet/?ysclid=ldy9t3h9ea643225260>
25. Карта данных Сертификата типа ограниченной категории Беспилотной авиационной системы БАС-200 № FATA-010130U-RC. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-odobritelniye-documenty/?id=5507>
26. Ассоциация «АЭРОНЕКСТ» готова совместно с Авиарегистром РФ создать обучающий курс по сертификации БАС. URL: https://aeronext.aero/press_room/news/202240
27. Нормы летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном самолетного типа с максимальной взлетной массой до 5400 кг НЛГ БАС СТ, Нормы летной годности беспилотных авиационных систем с беспилотным воздушным судном вертолетного типа с максимальной взлетной массой до 750 кг НЛГ БАС ВТ. URL: <https://m.favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498>
28. Доклад «Об итогах работы Федерального агентства воздушного транспорта в 2021 году, основных задачах на 2022 год и среднесрочную перспективу». URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/6/b/4/3/06b43556f1a8adb303668876e45ea69e.pdf>
29. Классификатор видов разрешённого использования земельных участков, утверждённый приказом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 10 ноября 2020 г. № П/0412.
30. Земельный кодекс Российской Федерации. Ст. 78. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/
31. Airport Improvement Program (AIP) – Airports. URL: <https://www.faa.gov/airports/aip/>
32. Перечень аэродромов совместного базирования Российской Федерации, утверждённый распоряжением Правительства РФ от 10 августа 2007 г. № 1034-р (в ред. 10 марта 2022 г. № 475-Р).
33. Доклад «Об итогах работы Федерального агентства воздушного транспорта в 2021 году, основных задачах на 2022 год и среднесрочную перспективу». URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/6/b/4/3/06b43556f1a8adb303668876e45ea69e.pdf>
34. Доклад генпрокурора Юрия Чайки в Совет Федерации О состоянии законности и правопорядка в РФ в 2018 году. URL: <https://gia.ru/20190409/1552497944.html>
35. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 октября 2022 г. № 420 «О внесении изменений в некоторые нормативные правовые акты Министерства транспорта РФ по вопросам регулирования деятельности лиц, осуществляющих управление беспилотными гражданскими воздушными судами максимальной взлётной массой 30 килограмм и менее. П. 2.5, 2.7, 2.8.
36. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 октября 2022 г. № 419 «Об утверждении Перечня авиационного персонала гражданской авиации Российской Федерации». П. 3.
37. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 5 июля 2018 г. № 447н.
38. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего профессионального образования по специальности 25.02.08 «Эксплуатация беспилотных авиационных систем» [Приказ Минобрнауки России от 09.12.2016 № 1549].
39. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ. П. 1. Ст. 85.
40. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ. П. 1. Ст. 73.
41. Приказ Минобрнауки России от 02.07.2013 № 513 «Об утверждении Перечня профессий рабочих, должностей служащих, по которым осуществляется профессиональное обучение».
42. Become a Drone Pilot. URL: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/become_a_drone_pilot/
43. Доклад о результатах и основных направлениях деятельности Федерального агентства воздушного транспорта за 2015–2017 годы. М., 2015. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/3/d/f/f/3/3dff3d59c890568dfc1f07c98327299d.pdf>
44. Доклад министра транспорта РФ Максима Соколова на совещании «О развитии региональных авиоперевозок пассажиров». Новосибирск, 7 августа 2012 года. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/interviews/261>
45. URL: <https://favt.gov.ru; https://avia.rostransnadzor.gov.ru/bezopasnost-poletov/analiz-bezopasnosti-poletov>
46. «Требования по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требования к антитеррористической защищённости объектов (территорий), учитывающие уровни безопасности для объектов транспортной инфраструктуры воздушного транспорта, не подлежащих категорированию», утверждённые Постановлением Правительства РФ от 5 октября 2020 г. № 1603.
47. Постановление Правительства РФ от 29 ноября 2021 г. № 2090.
48. Ташимов Т. Большая надежда малой авиации. URL: <https://expert.ru/kazakhstan/2009/35/toporov/>
49. Конвенция о международной гражданской авиации «Национальные и регистрационные знаки воздушных судов». Приложение 7.
50. Конвенция о международной гражданской авиации «Расследования авиационных происшествий и инцидентов». Приложение 13.

51. Алдюхов А.А. О достаточности Концепции интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство РФ в части развития технологий. URL: <https://aviasafety.ru/39297/>
52. Aviation Benefits Report 2019. P. 47. URL: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/Aviation-benefits-2019-web.pdf>
53. Дутов А., Мецерегина О. Просто железо никому не нужно. URL: https://www.nrczh.ru/press/opinion/?ELEMENT_ID=1247

References

1. Rukovoditel Rosaviacii Aleksandr Neradko o sostoianii i perspektivakh razvitiia grazhdanskoi aviacii Rossii [Head of the Federal Air Transport Agency Alexander Neradko about the state and prospects for the development of civil aviation in Russia]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=7427>
2. Perechen poruchenii Prezidenta RF po voprosam razvitiia bespilotnykh aviatcionnykh sistem ot 30 dekabria 2022 goda № Pr-2548, i ot 6 dekabria 2022 g. № Pr-2343 [List of instructions of the President of the Russian Federation on the development of unmanned aerial systems dated December 30, 2022 No. Pr-2548, and dated December 6, 2022 No. Pr-2343]
3. Vaisberg, I., Elchaninov, A.F. Otsutstvie polnotcennoi normativnoi bazy – glavnyi sderzhivaiushchii faktor razvitiia bespilotnoi aviacii v Rossii [The lack of a full-fledged regulatory base is the main constraint on the development of unmanned aircraft in Russia]. [Online]. URL: <https://www.aex.ru/docs/2/2021/3/5/3224/>.
4. Poriadok ispolzovaniia vozdušnogo prostranstva RF bespilotnymi vozdušnymi sudami (BVS, BPLA, bespilotniki, drony) [The procedure for using the airspace of the Russian Federation by unmanned aircraft (unmanned aircrafts, UAVs, pilotless aircrafts, drones)]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/poryadok-ispolzovaniya-bespilotnykh-vozdukhnykh-sudov/?ysclid=ldtzipgmbp192468957>
5. Postanovleniia Pravitelstva RF ot 24 marta 2022 g. № 458 i № 462 [Russian Government Decrees № 458 & № 462 from March 24, 2022].
6. Priказ Ministerstva transporta RF ot 19 oktiabria 2022 g. № 419 «Ob utverzhdenii Perechnia aviatcionnogo personala grazhdanskoi aviacii Rossiiskoi Federatsii», punkt 3. [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 19, 2022 No. 419 “On Approval of the List of Civil Aviation Personnel of the Russian Federation”, paragraph 3].
7. Ukazanie «Ob usilenii prokurorskogo nadzora za ispolneniem zakonodatelstva v sfere funkcionirovaniia vozdušnogo transporta» ot 25 ianvaria 2022 g. №32/23 [Instruction “On strengthening prosecutorial supervision over the implementation of legislation in the field of air transport operation” dated January 25, 2022 No. 32/23]. [Online]. URL: <https://epp.genproc.gov.ru/web/gprf/documents?item=69914472&>
8. Rukovodstvo po distantsionno pilotiruemykh aviatcionnykh sistemam. ICAO Russian Doc 10019, p. 2.2.7 [Guide to Remotely Piloted Aircraft Systems. ICAO Russian Doc 10019, paragraph 2.2.7].
9. Prilozhenie 19 k Konventcii o mezhdunarodnoi grazhdanskoi aviacii Upravlenie bezopasnostiu poletov Dobavlenie 2 [Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation Safety Management Appendix 2]
10. Vozdušnyi Kodeks RF. St. 32, p. 5 [Air Code of the Russian Federation. Art. 32, paragraph 5]
11. Rukovodstvo po distantsionno pilotiruemykh aviatcionnykh sistemam. Doc 10019. [Guide to Remotely Piloted Aircraft Systems. Doc 10019].
12. GOST R 57258-2016 Sistemy bespilotnye aviatcionnye. Terminy i opredeleniia [GOST R 57258-2016 Unmanned aerial systems. Terms and Definitions]. Moscow : Standartinform, 2018. Paragraph 3.2.6, 3.2.7.
13. GOST R 59517-2021 Bespilotnye aviatcionnye sistemy. Klassifikatsiia i kategorizatsiia [GOST R 59517-2021 Unmanned aerial systems. Classification and categorization]. Moscow : Standartinform, 2021. p. 3.
14. Priказ Ministerstva truda i sotcialnoi zashchity RF ot 14 sentiabria 2022 g. № 526n «Ob utverzhdenii professionalnogo standarta «spetsialist po ekspluatatsii bespilotnykh aviatcionnykh sistem, vkluchaiushchikh v sebia odno ili neskolko bespilotnykh vozdušnykh sudov s maksimalnoi vzletnoi massoi 30 kg. i menee» [Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation of September 14, 2022 No. 526n “On approval of the professional standard “specialist in the operation of unmanned aerial systems, including one or more unmanned aircraft with a maximum take-off weight of 30 kg. and less”].
15. GOST R 54265-2010. Vozdušnyi transport. Aviatcionnye raboty. Klassifikatsiia [GOST R 54265-2010. Air Transport. Aviation work. Classification]. Moscow : Standartinform, 2012. pp. 5–8.
16. Ukaz Prezidenta Respubliki Belarus «Ob ispolzovanii aviamodelei» ot 25 fevralia 2016 g. № 81 [Decree of the President of the Republic of Belarus No. 81 “On the use of aircraft models” dated February 25, 2016].
17. Pravila ispolzovaniia aviamodelei v Respublike Belarus, utverzhdennye Postanovleniem Soveta Ministrov Respubliki Belarus ot 16 avgusta 2016 g. № 636 [Rules for the use of aircraft models in the Republic of Belarus, approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus No. 636 dated August 16, 2016].
18. Rukovodstvo po distantsionno pilotiruemykh aviatcionnykh sistemam. ICAO Russian Doc 10019 [Guide to Remotely Piloted Aircraft Systems. ICAO Russian Doc 10019]. Fig. 1-1.
19. What is Unmanned Aircraft Systems Traffic Management? [Online]. URL: <https://www.nasa.gov/ames/utm>
20. Information from OpenSkyNetwork & OpenGliderNetwork dated 30.05.2021, from 11:00 till 12:00.
21. Global Air Traffic Management Operational Concept (Doc 9854)
22. Global Air Navigation Plan (Doc. 9759). [Online]. URL: https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/GANP_ru.pdf
23. Sertifikaty tipa na samolety [Aircraft type certificates]. [Online]. URL: <https://m.favt.gov.ru/sertifikatsiya-avia-tehniki-sertifikatsiya-tipa-avia-tehnika-odobritelniye-dokumenty/?id=5506>
24. BAS-200: bespilotnyi vertolet [UAS-200: unmanned helicopter]. [Online]. URL: <https://rostec.ru/news/bas-200-bespilotnyy-vertolet/?ysclid=ldy9t3h9ea643225260>
25. Karta dannykh Sertifikata tipa ogranichennoi kategorii Bespilotnoi aviatcionnoi sistemy BAS-200 № FATA-010130U-RC [Data card of Type Certificate of limited category of Unmanned aerial system UAS-200 No. FATA-010130U-RC]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikatsiya-avia-tehniki-sertifikatsiya-tipa-avia-tehnika-odobritelniye-dokumenty/?id=5507>
26. Assotatsiia "AERONEKST" gotova sovместno s Aviarestrom RF sozdat obuchaiushchii kurs po sertifikatsii BAS [Association "AERONEKST" is ready to create a training course on certification of UAS together with the Aviation Register of the Russian Federation]. [Online]. URL: https://aeronext.aero/press_room/news/202240

27. Normy letnoi godnosti bespilotnykh aviatcionnykh sistem s bespilotnym vozdušnym sudnom samoletnogo tipa s maksimalnoi vzletnoi massoi do 5400 kg NLG BAS ST, Normy letnoi godnosti bespilotnykh aviatcionnykh sistem s bespilotnym vozdušnym sudnom vertoletnogo tipa s maksimalnoi vzletnoi massoi do 750 kg NLG BAS VT [Airworthiness standards for unmanned aerial systems with an unmanned aircraft type aircraft with a maximum takeoff weight of up to 5400 kg NLG BAS ST, Airworthiness standards for unmanned aerial systems with an unmanned aerial vehicle of a helicopter type with a maximum takeoff weight of up to 750 kg NLG BAS VT]. [Online]. URL: <https://m.favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniki-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498>
28. Doklad «Ob itogakh raboty Federalnogo agentstva vozdušnogo transporta v 2021 godu, osnovnykh zadachakh na 2022 god i srednesrochnuiu perspektivu» [Report “On the results of the work of the Federal Air Transport Agency in 2021, the main tasks for 2022 and the medium term”]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/6/b/4/3/06b43556f1a8adb303668876e45ea69e.pdf>
29. Klassifikator vidov razreshennogo ispolzovaniia zemelnykh uchastkov, utverzhdenyi prikazom Federalnoi sluzhby gosudarstvennoi registratsii, kadastra i kartografii ot 10 noiabria 2020 g. № P/0412 [Classifier of types of permitted use of land plots, approved by the Order of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography dated November 10, 2020 No. P/0412].
30. Zemelnyi kodeks [Land Code of the Russian Federation]. Paragraph 78
31. Airport Improvement Program (AIP) – Airports. [Online]. URL: <https://www.faa.gov/airports/aip/>
32. Perechen aerodromov sovmestnogo bazirovaniia Rossiiskoi Federatsii, utverzhdenyi rasporiazheniem Pravitelstva RF ot 10 avgusta 2007 g. №1034-r (v red. 10 marta 2022 g. №475-R) [The list of airfields of joint basing of the Russian Federation, approved by the Order of the Government of the Russian Federation of August 10, 2007 No. 1034-r (as amended on March 10, 2022 No. 475-R)].
33. Doklad «Ob itogakh raboty Federalnogo agentstva vozdušnogo transporta v 2021 godu, osnovnykh zadachakh na 2022 god i srednesrochnuiu perspektivu» [Report “On the results of the work of the Federal Air Transport Agency in 2021, the main tasks for 2022 and the medium term”]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/6/b/4/3/06b43556f1a8adb303668876e45ea69e.pdf>
34. Doklad genprokurora Iurii Chaiki v Sovet Federatsii «O sostoianii zakonnosti i pravoporiadka v RF v 2018 godu» [Report of Prosecutor General Yuri Chaika to the Federation Council “On the state of law and order in the Russian Federation in 2018”]. [Online]. URL: <https://ria.ru/20190409/1552497944.html>
35. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 19 oktiabria 2022 g. № 420 «O vnesenii izmenenii v nekotorye normativnye pravovye akty Ministerstva transporta RF po voprosam regulirovaniia deiatelnosti litc, osushchestvliaiushchikh upravlenie bespilotnymi grazhdanskimi vozdušnymi sudami maksimalnoi vzletnoi massoi 30 kilogramm i menee [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of October 19, 2022 No. 420 “On Amendments to Certain Regulatory Legal Acts of the Ministry of Transport of the Russian Federation on Regulating the Activities of Persons Controlling Unmanned Civil Aircraft with a Maximum Takeoff Weight of 30 kg or less]. Paragraph 2.5, 2.7, 2.8.
36. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 19 oktiabria 2022 g. № 419 «Ob utverzhdenii Perechnia aviatcionnogo personala grazhdanskoi aviatcii Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 19, 2022 No. 419 “On Approval of the List of Civil Aviation Personnel of the Russian Federation”]. Paragraph 3.
37. Prikaz Ministerstva truda i sotsialnoi zashchity Rossiiskoi Federatsii ot 5 iulia 2018 g. № 447n [Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation dated July 5, 2018 No. 447n].
38. Federalnyi gosudarstvennyi obrazovatelnyi standart srednego professionalnogo obrazovaniia po spetsialnosti 25.02.08 «Ekspluatatsiia bespilotnykh aviatcionnykh sistem» (Prikaz Minobrnauki Rossii ot 09.12.2016 № 1549) [Federal state educational standard of secondary vocational education in the specialty 25.02.08 “Operation of unmanned aerial systems” (Order of the Ministry of Education and Science of Russia dated 09.12.2016 No. 1549)].
39. Federalnyi zakon ot 29 dekabria 2012 g. № 273-FZ «Ob obrazovanii v Rossiiskoi Federatsii» [Federal Law of December 29, 2012 No. 273-FZ “On Education in the Russian Federation”]. Paragraph 1, Art. 85.
40. Federalnyi zakon ot 29 dekabria 2012 g. № 273-FZ «Ob obrazovanii v Rossiiskoi Federatsii» [Federal Law of December 29, 2012 No. 273-FZ “On Education in the Russian Federation”]. Paragraph 1, Art. 73.
41. Prikaz Minobrnauki Rossii ot 02.07.2013 № 513 «Ob utverzhdenii Perechnia professii rabochikh, dolzhnostei sluzhashchikh, po kotorym osushchestvlietsia professionalnoe obuchenie» [Order of the Ministry of Education and Science of Russia dated July 2, 2013 No. 513 “On approval of the List of professions of workers, positions of employees for which vocational training is carried out”].
42. Become a Drone Pilot. [Online]. URL: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/become_a_drone_pilot/
43. Doklad o rezultatakh i osnovnykh napravleniiakh deiatelnosti Federalnogo agentstva vozdušnogo transporta na 2015–2017 gody (Moskva, 2015 g.) [Report on the results and main activities of the Federal Air Transport Agency for 2015–2017 (Moscow, 2015)]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/3/d/f/f/3/3dff3d59c890568dfc1f07c98327299d.pdf>
44. Doklad Ministra transporta RF Maksima Sokolova na soveshchani «O razvitiu regionalnykh aviaperevozok passazhirov» (Novosibirsk, 7 avgusta 2012 goda) [Report of the Minister of Transport of the Russian Federation Maxim Sokolov at the meeting “On the development of regional passenger air transportation” (Novosibirsk, August 7, 2012)]. [Online]. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/interviews/261>.
45. Diagram is based on the data: <https://favt.gov.ru>; <https://avia.rostransnadzor.gov.ru/bezopasnost-poletov/analiz-bezopasnosti-poletov>
46. «Trebovaniia po obespecheniiu transportnoi bezopasnosti, v tom chisle trebovaniia k antiterroristicheskoi zashchishchennosti obektov (territorii), uchityvaiushchie urovni bezopasnosti dlia obektov transportnoi infrastruktury vozdušnogo transporta, ne podlezhashchikh kategorirovaniu», utverzhdennye Postanovlenie Pravitelstva RF ot 5 oktiabria 2020 g. №1603. [“Requirements for ensuring transport security, including requirements for anti-terrorist security of facilities (territories), taking into account security levels for air transport infrastructure facilities that are not subject to categorization”, approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of October 5, 2020 No. 1603].
47. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 29 noiabria 2021 g. №2090. [The Decree of the Government of the Russian Federation of November 29, 2021 No. 2090].
48. Tashimov, T. Bolshaia nadezhda maloi aviatcii [Great Hope for Small Aviation]. [Online]. URL: <https://expert.ru/Kazakhstan/2009/35/toporov/>

49. Prilozhenie 7 k Konvencii o mezhdunarodnoi grazhdanskoi aviacii «Natsionalnye i registratsionnye znaki vozдушnykh sudov» [Annex 7 to the Convention on International Civil Aviation “National and Registration Marks of Aircraft”].
50. Prilozhenie 13 k Konvencii o mezhdunarodnoi grazhdanskoi aviacii «Rassledovaniia aviatcionnykh proisshestvii i intcidentov» [Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation “Aircraft Accident and Incident Investigation”].
51. Aldiukhov, A.A. O dostatochnosti Kontsepcii integratsii bespilotnykh vozдушnykh sudov v edinoe vozдушnoe prostranstvo RF v chasti razvitiia tekhnologii [On the sufficiency of the Concept for the integration of unmanned aerial vehicles into the unified airspace of the Russian Federation in terms of technology development]. [Online]. URL: <https://aviasafety.ru/39297/>
52. Aviation Benefits Report 2019. [Online]. URL: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/Aviation-benefits-2019-web.pdf> p.47
53. Dutov, A. & Meshcheriagina, O. Prosto zhelezo nikomu ne nuzhno [Nobody needs just iron scrap]. [Online]. URL: https://www.nrczh.ru/press/opinion/?ELEMENT_ID=1247.

Информация об авторе:

Хурсевич Сергей Николаевич – кандидат экономических наук, советник губернатора Томской области, старший научный сотрудник Центра развития науки, технологий и образования в области обороны и обеспечения безопасности государства Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: khsn@list.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Khursevich Sergey N., Cand.Sc. (Economics), Advisor to the Governor of the Tomsk Region; Senior Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: khsn@list.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Научная статья
УДК 62-5
doi: 10.17223/7783494/2/3

Реконфигурируемые алгоритмы управления в задачах стабилизации безопасного движения БПЛА

Михаил Викторович Окунский¹, Станислав Викторович Шидловский²

^{1,2} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *mvokunsky@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7037-4428*

² *shidlovskysv@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7541-9637*

Аннотация. Рассматривается структурная модель квадрокоптера как объект управления с различными регуляторами. Показано преимущество регуляторов с перестраиваемой структурой перед классическими регуляторами, построенными на типовых законах управления. При моделировании используются дополнительные координатные и параметрические возмущения на систему и фиксируется реакция регуляторов на данные воздействия.

Ключевые слова: нелинейный закон, ПИД-закон, БПЛА, квадрокоптер, закон управления, скользящий режим

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 19-29-06078 мк.

Для цитирования: Окунский М.В., Шидловский С.В. Реконфигурируемые алгоритмы управления в задачах стабилизации безопасного движения БПЛА // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 34–45. doi: 10.17223/7783494/2/3

Original article
doi: 10.17223/7783494/2/3

Reconfigurable control algorithms for stabilizing safe UAV movement

Mikhail V. Okunsky¹, Stanislav V. Shidlovskiy²

^{1,2} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *mvokunsky@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7037-4428*

² *shidlovskysv@mail.ru; ORCID: 0000-0002-7541-9637*

Abstract. Unmanned aerial vehicles means a vehicle without a crew on board. Multirotor type aircraft are part of the UAV variety. To date, there are a huge number of implementations of aircraft, in view of the widespread development of technologies and the reduction in the cost of components that make up the UAV. The versatility of UAVs allows them to be used to solve a wide variety of tasks: geodetic surveys, drawing up cadastral plans, monitoring transport infrastructure, energy facilities and pipelines, determining the volume of mine workings and dumps, accounting for the movement of bulk cargo, creating maps and terrain plans, rescue, reconnaissance and military operations, forest fire detection, aerial photography, etc. The absence of a person on board makes it possible to remove restrictions on the use of UAVs in conditions dangerous to the life and health of the crew. Due to the active development of this technology, the use of UAVs in civilian and other tasks is constantly growing, which causes a natural need for the safe operation of UAVs. In particular, safe flight in normal operating modes and in critical operating modes. One of the ways to solve this problem is the use of specialized control algorithms. In this paper, we consider algorithms with a reconfigurable structure that allow you to enter such an operating mode when any disturbances from the outside are not perceived by the system within certain limits. The problem is to choose such a control algorithm where the output value of the plant would coincide with the reference value in some acceptable limits when external coordinate and parametric disturbances change. The relationship between the input and output of the object becomes ambiguous and indefinite, which greatly complicates the solution of the problem. The paper presents the implementation of PID and reconfigurable structure controllers in the MATLAB software package. The features of the quadcopter dynamics and the response of the control system to coordinate and parametric disturbances are taken into account at the stages of modeling. The object of study in this work is the height controller. As a result, graphs of the change in the current height relative to the specified height are given, thereby forming a control error, which is processed by the controller. The graphs show the control signals generated by various controllers. The analysis shows the immunity of controllers with a variable structural to various kinds of external disturbances. Indicators of the quality of management were calculated according to the second integral criterion.

Keywords: reconfigurable system, PID control, UAV, quadcopter, super-twisting mode, sliding mode

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-29-06078 мк.

For citation: Okunsky, M.V. & Shidlovskiy, S.V. (2023) Reconfigurable control algorithms for stabilizing safe UAV movement. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeятel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 34–45. doi: 10.17223/7783494/2/3 (In Russian).

Введение

Одной из наиболее перспективных и активно развивающихся междисциплинарных областей, находящихся на стыке математических, инженерных и компьютерных наук, является область, связанная с проектированием и разработкой беспилотных транспортных средств различного типа и назначения, в частности – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Среди последних широкое распространение получили аппараты вертикального взлета и посадки, выполненные по мультироторной схеме. Такие БПЛА представляют собой унифицированные платформы, которые оборудованы необходимыми датчиками, органами управления, бортовыми вычислителями (полетными контроллерами), а также встроенным программным обеспечением, которое используется для автоматизации отдельных режимов полета и маневров (взлет, посадка, осуществление полета в пространстве, изменение угла рыскания и т.д.) [1]. Развитие сферы беспилотных технологий позволяет использовать летательные аппараты в повседневных задачах, что ведет к возникновению потребности в безопасном эксплуатации БПЛА. Зачастую главным требованием безопасного полета является использование таких алгоритмов управления, которые бы обеспечивали стабильный полет как в штатных режимах управления, так и в критических режимах пилотирования аппаратом. К критическим режимам пилотирования относятся такие условия для полета, которые обусловлены наличием порывистого ветра, турбулентных потоков и других внешних возмущающих воздействий, оказывающих негативное влияние на БПЛА в воздухе. Регуляторы, которые построены на базе классических законов управления, испытывают сложности по формированию компенсирующих управляющих воздействий для критических режимов пилотирования аппаратом [2], в связи с чем требуют более точной настройки регулятора или наиболее полной модели объекта управления. Нелинейные законы управления, в свою очередь, позволяют нивелировать недостатки классических законов путем переключения по различным структурам, тем самым достигая меньшего времени по компенсации внешних возмущений [3].

Под беспилотными летательными аппаратами подразумевается аппарат без экипажа на борту. Летательные аппараты мультироторного типа являются частью разновидности БПЛА. На сегодняшний день существует огромное множество реализаций летательных аппаратов ввиду повсеместного развития технологий и удешевления комплектующих, из которых состоят БПЛА [4]. Универсальность БПЛА позволяет применять их для решения самых разно-

образных задач: геодезические изыскания, составление кадастровых планов, мониторинг транспортной инфраструктуры, объектов энергетики и трубопроводов, определение объемов горных выработок и отвалов, учет движения сыпучих грузов, создание карт и планов местности, спасательные, разведывательные и военные операции, обнаружение лесных пожаров, аэрофотосъемки и т.п. Отсутствие человека на борту позволяет снять ограничения использования БПЛА в условиях, опасных для жизни и здоровья экипажа [5].

Управление полетом БПЛА, состоящего из базового набора комплектующих, осуществляется в полуавтоматическом режиме по командам оператора с использованием навигации по опорным точкам или в дистанционном режиме с помощью пульта управления. Наряду с этим существенно возрастает роль программного управления БПЛА на базе интеллектуальных автопилотов. Это связано с мировой тенденцией увеличения уровня автономности БПЛА при решении поставленных целевых задач, таких как планирование и автоматическое управление полетом по заданной траектории. Базовое бортовое программное обеспечение обычно допускает возможность интеграции сторонних модулей по открытым протоколам и программным интерфейсам, и эта возможность активно используется исследователями для расширения возможностей полета [6].

Мультикоптером (мультиротором) называется летательный аппарат, построенный по вертолетной схеме с двумя и более несущими винтами [7]. Различаются мультикоптеры по количеству моторов (или по количеству несущих винтов) и по виду реализации схемы расположения моторов. Моторы соединяются с основным корпусом аппарата с помощью лучей и закрепляются на их концах для обеспечения свободного хода пропеллеров беспилотника. Основная часть корпуса называется базой, и на ней располагается вся аппаратура, необходимая для полета. В нее входят: полетный контроллер, регуляторы скорости оборотов моторов, датчики инерциальной навигации, радиоаппаратура и другие дополнительные модули [6]. Принцип удержания аппарата в воздухе и изменения его координат в пространстве основывается на базовых физических свойствах и распространяется на все виды сборок без существенных изменений. Принцип управления мультикоптером не меняется с точки зрения количества моторов, расположенных на базе БПЛА, поэтому для удобства рассмотрим схему квадрокоптера как одну из разновидностей мультироторных БПЛА. У квадрокоптера есть шесть степеней свободы, т.е. он может перемещаться поступательно и вращательно относительно каждой из трех осей [7]. На рис. 1 изображена связанная система координат для определения положения аппарата в пространстве.

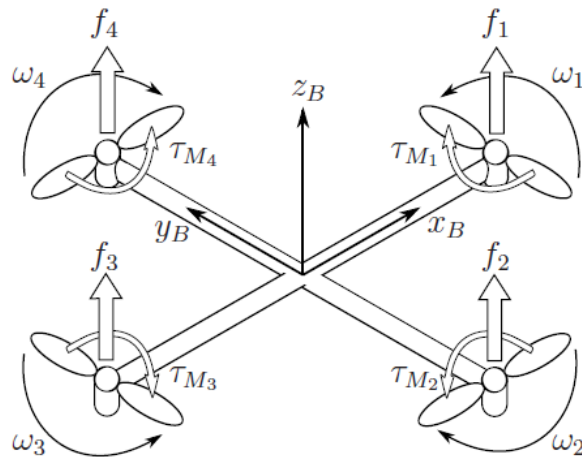


Рис. 1. Подвижная система координат для определения положения квадрокоптера

Fig. 1. Moving coordinate system for determining the position of the quadcopter

Ориентацию летательного аппарата в пространстве задают углы Эйлера: угол тангажа θ , крена φ и рысканья ψ , а положение – координаты x, y, z .

При вращении моторов создается сила, компенсирующая силу тяжести, что позволяет удерживать аппарат в воздухе. Для предотвращения вращательного момента моторы попарно вращаются в противоположные стороны. При изменении скорости вращения пар двигателей происходит смещение квадрокоптера в пространстве. Рассмотрим эти движения более детально [8].

Скорость вращения моторов, при которой летательный аппарат преодолевает силу тяжести и парит в воздухе, обозначим ω_h . Тогда движение квадрокоптера осуществляется за счет изменения скорости вращения винтов следующим образом (см. рис. 1):

- движение по оси z_b (газ) происходит при одновременном увеличении (уменьшении) скорости вращения всех четырех моторов;

- движение по оси x_b (тангаж) осуществляется за счет изменения скоростей вращения первого ω_1 и третьего ω_3 моторов. Если $\omega_3 > \omega_h$ и $\omega_1 < \omega_h$, а $\omega_2 = \omega_4 = \omega_h$, то движение происходит вдоль оси x_b (в положительном направлении), в противном случае, когда $\omega_1 > \omega_h$ и $\omega_3 < \omega_h$ квадрокоптер движется в противоположную сторону.

- движение по оси y_b (крен) осуществляется за счет изменения скоростей вращения второго ω_2 и четвертого ω_4 моторов. Если $\omega_2 > \omega_h$ и $\omega_4 < \omega_h$, а $\omega_1 = \omega_3 = \omega_h$, то движение происходит вдоль оси y_b (в положительном направлении), в противном случае, когда $\omega_2 < \omega_h$ и $\omega_4 > \omega_h$, квадрокоптер движется в противоположную сторону.

- движение вокруг оси z_b (рыскание) осуществляется за счет изменения скоростей вращения моторов, расположенных на одной диагонали. Если $\omega_2 = \omega_4 > \omega_h$ и $\omega_1 = \omega_3 < \omega_h$, то происходит движение вокруг оси z_b по

часовой стрелке, в противном случае, когда $\omega_2 = \omega_4 < \omega_h$ и $\omega_1 = \omega_3 > \omega_h$, квадрокоптер движется против часовой стрелки [9].

Цель работы и современное состояние вопроса

Пропорционально-интегриродифференциальный (ПИД) закон – это самое распространенное решение для задач автоматического управления в различных сферах деятельности. ПИД-закон прост в реализации и обладает широким полем для настройки регулятора. Недостатком данного решения является некоторая задержка во времени при формировании управляющих сигналов. В случае когда управление БПЛА производится в штатном режиме, то данная задержка не существенна для стабильного полета, при этом для критических режимов полета такое время запаздывания может привести к аварии летательного аппарата. В связи с этим при анализе литературы выявилась тенденция по усовершенствованию ПИД-регулятора для применения в беспилотных аппаратах или использование принципиально других законов управления. В [10] рассмотрена возможность синтеза системы управления на базе адаптивных ПИД-регуляторов. Целью данной работы является оптимизация переходного процесса и в результате повышение устойчивости беспилотного летательного аппарата.

Помимо ПИД-регулирования, также набирает популярность использование нейросетевых регуляторов. В статье [11] анализируются вопросы математического моделирования динамики квадрокоптера, по результатам анализа строится нейросетевой регулятор. Плюсом данного регулятора является его возможность адекватно реагировать на аэродинамические эффекты, которые весьма трудно полно описать математически. Однако качество данного типа регуляторов сильно зависит от обучающих данных.

Примененный в [12] метод основывается на линеаризации уравнений обратной связи с применением полиномов Баттерворта. Полученная система позволяет перемещать аппарат в заданную точку и поворачивать его на заданный угол вокруг вертикальной оси.

Стоит отметить обширное использование линейно-квадратичных регуляторов (LQR) в основном для решения задач стабилизации БПЛА. В статье [13] используется Parrot Rolling Spider в качестве объекта управления и представляется его математическое моделирование с последующим управлением высотой полета беспилотника с использованием LQR-регуляторов. Также в статье [14] ставится задача управления положением БПЛА с использованием LQR-контроллеров, и результаты представлены на основе имитационного моделирования в MATLAB. В статье [15] проводится анализ различных законов регулирования, а именно: ПИД-закона, LQR-регулятора и их объединение в замкнутой цепи регулирования.

Помимо линейных законов регулирования, стоит рассмотреть некоторые разновидности нелинейных законов регулирования. Использование нелинейности в управлении позволяет избежать границы неопределенности от возмущающих воздействий и пренебречь точным моделированием системы. Например, в статье [16] используется контроллер, работающий в скользящем режиме (SMC), который показывает улучшенные характеристики по сравнению с пропорционально-дифференциальным регулированием (ПД-регулятор) в сильно ветреных условиях. В работе [17], которая полностью посвящена «скользящему» режиму управления, продемонстрированы способы создания такого режима работы системы, его плюсы и минусы и в том числе условия физической реализуемости такого вида управления. Данная работа является идейным продолжением работ С.В. Емельянова, С.К. Коровина и В.И. Уткина [18], которые впервые предложили использовать такие нелинейные структуры для управления автоматическими системами. В дальнейшем данный вид управления будет являться объектом исследования для построения алгоритмов с переменной структурой. Целью данной работы является построение модели беспилотного аппарата, работающего на базе регулятора с переменной структурой, и сравнение его характеристик относительно регулятора, построенного по классической реализации ПИД.

Материалы и методы исследования

А. Математическое моделирование динамики движения квадрокоптера

Математическая модель определяется с помощью следующих введенных обозначений:

$$s = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}; r = \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix}; q = \begin{pmatrix} s \\ r \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где s – вектор положения центра масс квадрокоптера в неподвижной системе координат с координатами x, y, z ; r – вектор положения центра масс квадрокоптера для оценки значений углов Эйлера (угол тангажа θ , крена φ и рыскания ψ); q – вектор, содержащий в себе конкатенацию векторов s и r .

Центр масс связанной системы координат также является центром масс квадрокоптера, тогда [19]

$$V = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}; \omega = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где V – линейные скорости в заданной системе; ω – угловые скорости в заданной системе. Для перехода из связанной системы в абсолютную необходимо воспользоваться матрицей перехода, выраженной в (3):

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) - \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) + \sin(\psi)\sin(\theta) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) + \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\varphi) + \cos(\psi)\sin(\varphi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\varphi) & \cos(\theta)\cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Выражение для преобразования угловых скоростей из абсолютной системы координат в связанную с квадрокоптером представлено в (4):

$$W = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\varphi)\operatorname{tg}(\theta) & \cos(\varphi)\operatorname{tg}(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \frac{\sin(\psi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\psi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Следовательно, угловые скорости для связанной с квадрокоптером системы координат в матричном виде – это произведение матрицы преобразования угловых скоростей и вектора угловой скорости в данной системе координат (5):

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin(\varphi)\operatorname{tg}(\theta) & \cos(\varphi)\operatorname{tg}(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \frac{\sin(\psi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\psi)}{\cos(\theta)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Допустим, что рассматриваемый квадрокоптер симметричен относительно осей абсциссы и ординаты, тогда тензор инерции будет составлять диагональную матрицу, которая состоит только из главных центральных моментов инерции. Выражение для матрицы тензора:

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

Угловая скорость каждого i -го винта порождает подъемную силу, направленную по оси вращения соответствующего мотора (см. рис. 1) f_i . В свою очередь угловая скорость совместно с угловым ускорением порождает крутящие моменты вокруг оси вращения винта τ_{M_i} так что:

$$f_i = k \cdot \omega_i^2; \quad \tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega}_i, \quad (7)$$

где k, b – коэффициенты подъемной силы и крутящего момента моторов соответственно; I_M – момент инерции винта и ω_i – угловая скорость i -го винта. Учитывая подъемную силу всех четырех моторов квадрокоптера и выражения (7), получаем выражение для тяги, направленной вдоль оси аппликат в связанной с телом системе координат (см. рис. 1):

$$T = \sum_{i=1}^4 k \cdot \omega_i^2. \quad (8)$$

Таким образом, общий крутящий момент τ состоит из крутящих моментов, направленных по углам Эйлера связанной системы координат:

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_\varphi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} lk \cdot (\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ lk \cdot (\omega_3^2 - \omega_1^2) \\ \sum_{i=1}^4 \tau_{M_i} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $\tau_\varphi, \tau_\theta, \tau_\psi$ – крутящие моменты, направленные по углам крена, тангажа и рыскания соответственно; l – расстояние от центра масс квадрокоптера до винта. Исходя из соотношения (9), увеличение угла крена достигается путем увеличения скорости вращения 4-го мотора относительно 2-го мотора. Увеличение угла тангажа достигается путем увеличения скорости вращения 3-го мотора относительно 1-го, и в свою очередь, изменение угла рыскания достигается в результате изменения скоростей вращения моторов, вращающихся сонаправленно относительно пары моторов, вращающихся в противоположную сторону [20].

Для описания динамических свойств рассматриваемого квадрокоптера необходимо воспользоваться уравнениями Ньютона–Эйлера. В этом случае в связанной системе координат с учетом выражений (2), (3), (5), (8) уравнение примет вид

$$m\dot{V} + \omega \times (mV) = R^T G + T, \quad (10)$$

где $\omega \times (mV)$ – компонента для определения центробежной силы; G – гравитационная сила; T – общая сила тяги моторов; $m\dot{V}$ – сила, необходимая для формирования ускорения тела, массой m . В абсолютной системе координат центробежная скорость эквивалентна нулю, в таком случае, исходя из выражения (10), уравнение примет вид

$$m\ddot{s} = G + RT. \quad (11)$$

Для связанной системы координат угловые ускорения инерции, центростремительные силы и гироскопические силы связаны следующим соотношением:

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) + \delta = \tau, \quad (12)$$

где $I\dot{\omega}$ – угловые ускорения инерции; $\omega \times (I\omega)$ – центростремительные силы; δ – гироскопические силы [21]. Тогда угловые ускорения в абсолютной системе координат – это производные по времени угловых скоростей из связанной системы и согласно выражению (4)

$$\ddot{i} = \frac{d}{dt}(W^{-1}\omega). \quad (13)$$

Б. Система управления движением и стабилизацией квадрокоптера

Систему управления положением квадрокоптера в пространстве на классических законах управления (ПИД) можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 2.

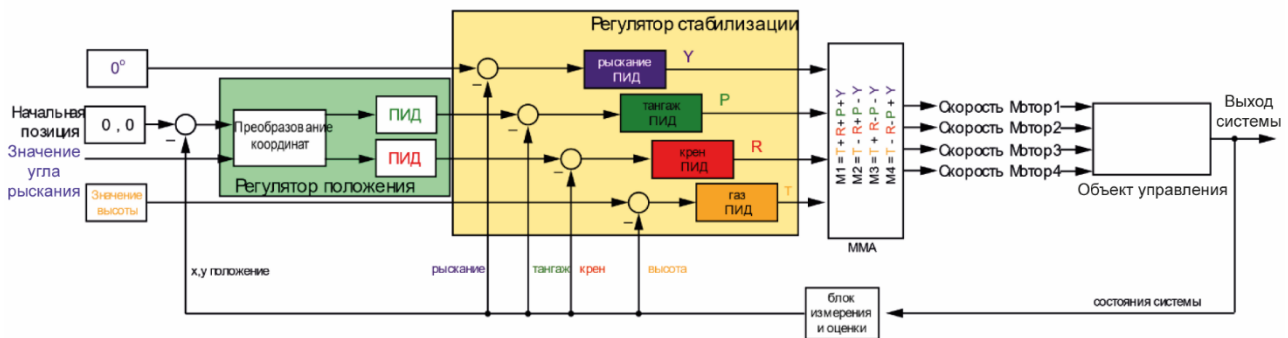


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления положением квадрокоптера

Fig. 2. Structural diagram of the quadcopter automatic position control system

В представленной структурной схеме приведены два регулятора: первый – регулятор положения, обеспечивающий компенсацию ошибки регулирования относительно заданных и полученных координат x и y ; второй – регулятор стабилизации, обеспечивающий компенсацию ошибки регулирования между заданными и полученными величинами углов Эйлера и значением высоты.

нат x и y ; второй – регулятор стабилизации, обеспечивающий компенсацию ошибки регулирования между заданными и полученными величинами углов Эйлера и значением высоты.

Для формирования управляющего сигнала ПИД-регулятор составляет следующее соотношение [22]:

$$u = k_n \cdot \varepsilon + k_{\text{и}} \cdot \int_0^t \varepsilon \cdot dt + k_d \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon, \quad (14)$$

где u – сигнал управления; k_n , $k_{\text{и}}$, k_d – коэффициенты при пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно; ε – величина ошибки регулирования.

Считается, что на объект управления действуют координатное f и параметрическое a возмущения. Координатное возмущение есть неизвестная величина со стороны нагрузки на объект управления, которая проявляется в виде неконтролируемых произвольных изменений технологических параметров и по характеру изменения во времени может быть импульсной и медленно меняющейся. Параметрическое возмущение есть неизвестная величина из некоторого ограниченного множества, в результате действия которой происходит медленное изменение параметров объекта управления.

Ставится задача выбора такого управления u , при котором выходное значение y объекта управления совпадало бы с задающим значением или их разница была в допустимых пределах при изменении внешних возмущающих воздействий f и a . Под влиянием внешних возмущений, информации о которых часто недостаточно, взаимосвязь между входом и выходом объекта становится неоднозначной и неопределенной, что очень затрудняет решение задачи.

Для подобного класса объектов с неточно известной моделью в условиях действия неконтролируемых возмущений типовые регуляторы (П, И, ПИ, ПИД) оказываются неэффективными. Поэтому решение подобных задач предлагается искать в классе систем с переменной структурой. В этих системах может использоваться логический закон управления, заданный с помощью разрывных функций координат системы. В ряде случаев необходимо изменение самого логического закона регулирования, что требует перестройки структуры системы, т.е. изменения не только комбинационных связей, но и функциональных [23].

Таким образом, постановка рассматриваемой задачи управления заключается в стабилизации регулируемой величины при неполной информации об объекте управления и обеспечении свойства инвариант-

ности к внешним возмущающим воздействиям путем перестройки внутренней структуры регулятора.

В общем случае закон управления для систем с перестраиваемой структурой выглядит следующим образом [24]:

$$u = \Psi \cdot h - v, \quad (15)$$

где h – информация об ошибке регулирования; Ψ – логический закон, принимающий определенное значение в зависимости от типа объекта управления и его текущего состояния; v – дополнительная информация о сигнале ошибки.

В случае когда дополнительная информация об ошибке регулирования отсутствует, т.е. $v = 0$, и $h = \varepsilon$, то закон управления формируется следующим образом:

$$u = \Psi \cdot \varepsilon; \quad \Psi = \begin{cases} \alpha, & \text{при } \varepsilon \cdot s > 0, \\ \beta, & \text{при } \varepsilon \cdot s < 0, \end{cases} \quad (16)$$

где α , β – постоянные коэффициенты различных структур; s – уравнение прямой переключения между двумя структурами, выражаемое в следующем виде:

$$s = \dot{\varepsilon} + c \cdot \varepsilon, \quad (17)$$

где c – постоянный коэффициент, при $\alpha > \beta$, $c > 0$; s – прямая, вдоль которой происходит переключение от одной структуры к другой.

В случае, когда дополнительная информация $v \neq 0$, то закон управления принимает следующий вид [17]:

$$\begin{cases} u = \Psi \cdot |s|^{0.5} - v \\ \dot{v} = -k_2 \cdot \text{sign}(s) \end{cases}; \quad \Psi = \begin{cases} k_1, & \text{при } s > 0 \\ -k_1, & \text{при } s < 0 \end{cases}, \quad (18)$$

где k_1 , k_2 – постоянные коэффициенты.

Рассмотрим следующие задачи:

1. На систему действует координатное возмущение, вызванное изменением положения квадрокоптера в пространстве.

2. На систему действуют координатное и параметрическое возмущения, вызванные изменением положения квадрокоптера в пространстве и изменением массы модели.

В качестве среды моделирования используется программный пакет MATLAB. На рис. 3 изображена 3D-сцена, используемая для симуляции полета квадрокоптера.

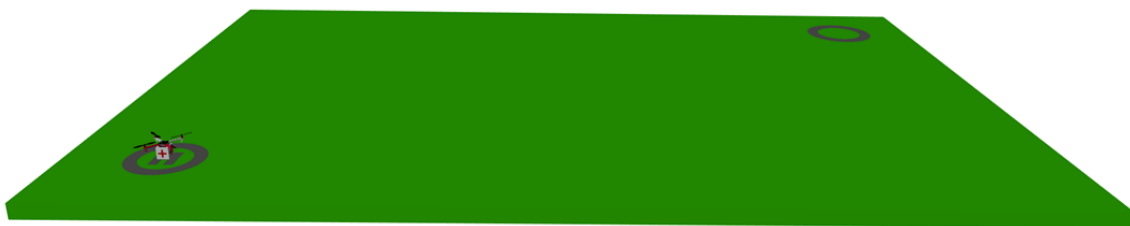


Рис. 3. 3D-сцена для симуляции полета БПЛА

Fig. 3. 3D-scene for UAV flight simulation

Моделирование проводится в два этапа, как показано на рис. 4. На первом этапе квадрокоптер набирает установленную высоту (рис. 4, *a*), пролетает через промежуточную точку (рис. 4, *b*) и снижается к точке сброса груза (рис. 4, *c*). В точке (*c*) осуществляется сброс груза, расположенного на борту квадрокоптера. Результатом данного моделирования является создание необходимых координатных возмущений для дальнейшего анализа.

На втором этапе моделирования квадрокоптер начинает движение из начальной позиции (*a*), долетает до промежуточной точки (*b*) и, находясь в воздухе, сбрасывает груз. Масса груза в заданных условиях относится к общим параметрам модели, следовательно, осуществляется параметрическое возмущение и реакция системы управления на нее. Далее квадрокоптер долетает до метки сброса груза (*c*), снижает высоту, и моделирование прекращается.

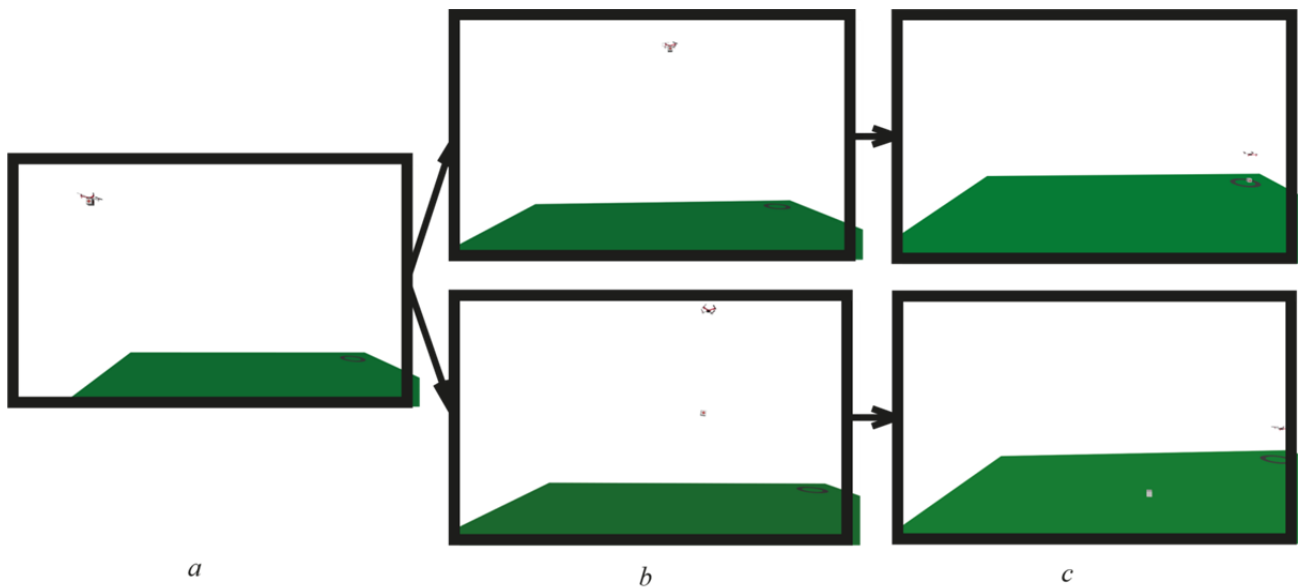


Рис. 4. Этапы моделирования для создания необходимых возмущений

Fig. 4. Simulation steps to create the necessary disturbances

Результаты моделирования

Объектом исследования и анализа работы различных законов управления является регулятор высоты. В дальнейшем все моделирование проводится относительно изменений высоты объекта относительно заданной и регулятора, который формирует необходимое управляющее воздействие для компен-

сации координатных и параметрических возмущений. Согласно выражению (14) на рис. 5 изображена блок-схема работы ПИД-регулятора для стабилизации высоты относительно заданных значений.

Согласно выражению (16) на рис. 6 изображена блок-схема для создания регулятора с перестраиваемой структурой, причем коэффициенты двух переключаемых структур равны 2 и -2 соответственно.

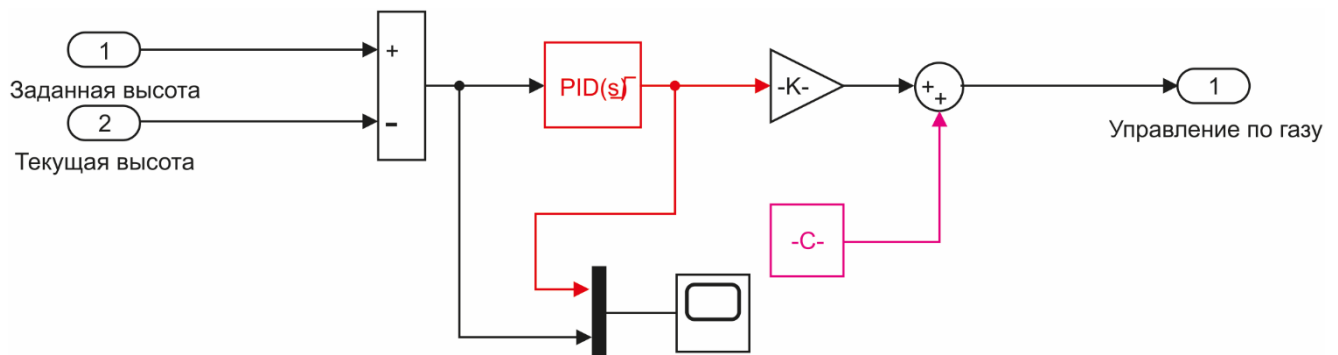


Рис. 5. Блок-схема регулятора высоты с ПИД-законом регулирования

Fig. 5. Block diagram of height controller with PID control

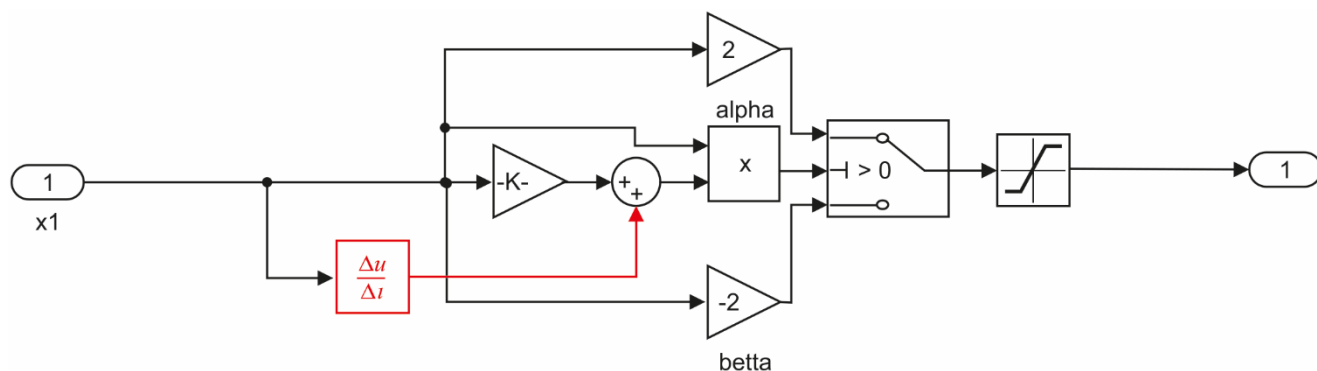


Рис. 6. Блок-схема регулятора высоты с перестраиваемой структурой

Fig. 6. Block diagram of height controller with a reconfigurable structure

На рис. 7 изображена блок-схема регулятора с перестраиваемой структурой с дополнительной информацией об ошибке регулирования согласно выражению (18).

В результате моделирования системы и координатных возмущений на рис. 8 изображены текущие значения высот квадрокоптера (сплошная линия) и заданное значение высоты при моделировании (пунктирная линия).

На рис. 8, *a–c* представлены различия работы системы относительно рассматриваемых регуляторов: регулятор высоты, построенный на ПИД-законе (рис. 8, *a*), регулятор высоты, построенный на законе с перестраиваемыми структурами (рис. 8, *b*), регулятор высоты, построенный на законе с перестраиваемыми структурами с использованием дополнительной информации об ошибке регулирования (рис. 8, *c*).

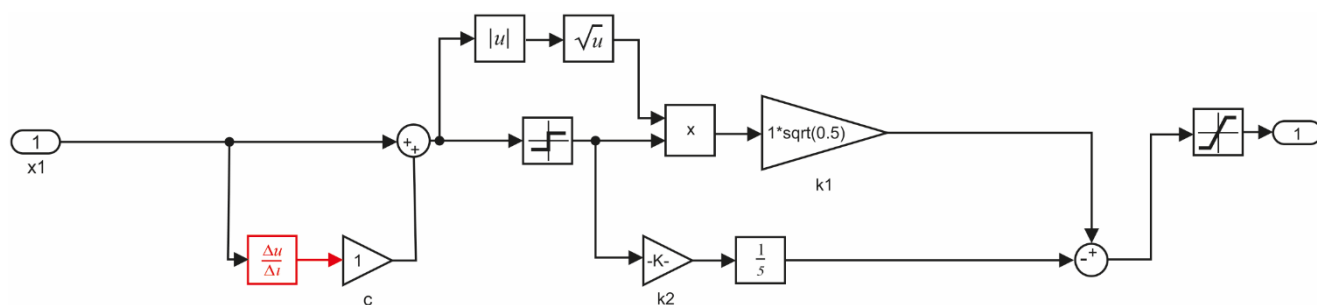


Рис. 7. Блок-схема регулятора высоты с перестраиваемой структурой при наличии дополнительной информации об ошибке регулирования

Fig. 7. Block diagram of height controller with a reconfigurable structure if there is additional information about the control error

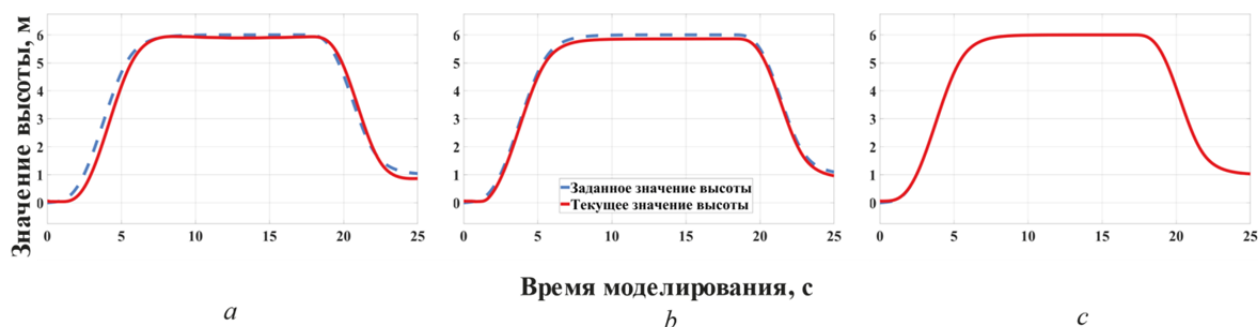


Рис. 8. Значения текущей высоты и заданной высоты квадрокоптера при координатных возмущениях с различными регуляторами; *a* – регулятор ПИД; *b* – регулятор с перестраиваемой структурой; *c* – регулятор с перестраиваемой структурой с дополнительной информацией об ошибке регулирования

Fig. 8. The values of the current height and the specified height of the quadcopter with coordinate disturbances with different controllers; *a* – PID; *b* – controller with reconfigurable structure; *c* – controller with a reconfigurable structure with additional information about the control error

На графиках, представленных на рис. 8, отмечается заметное запаздывание работы ПИД-регулятора (см. рис. 8, *a*) при изменении высоты квадрокоптера. Использование регулятора с перестраиваемой структурой (см. рис. 8, *b*) позволяет значительно сократить время запаздывания, но при этом возникает статическая ошибка в промежуток времени от 7 до 20 с. В свою очередь, обеспечение дополнительной информацией перестраиваемого регулятора (см. рис. 8, *c*), позволяет свести к нулю время запаздывания и статическую ошибку, что выражается в полном соответствии значений высоты квадрокоптера относительно заданных значений высот, указанных на этапе моделирования.

На рис. 9 изображены графики управляющих воздействий, сформированных ПИД-регулятором и предлагаемыми регуляторами с перестраиваемой структурой. Сплошной линией обозначается результат сформированных управляющих воздействий регулятором на объект управления, пунктирной линией обозначается ошибка регулирования. На рис. 9, *a* отмечается заметное отставание управляющих воздействий ПИД-регулятором и невозможность сведения ошибки регулирования к нулю при координатных возмущениях, приведенных на этапах моделирования. В свою очередь, регулятор с перестраиваемой структурой (рис. 9, *b*) сокращает время набора высоты в соответствии с заданными значениями, но при этом заметна значительная статическая ошибка (разность между достигнутой и заданной высотами). Обращая внимание на результат управления, можно сделать вывод, что в момент времени $t = 1,7$ с регулятор входит в режим переключения между двумя

структурами, тем самым становясь устойчивым к различного рода возмущениям, но при этом выработка такого сигнала может негативно сказаться на исполнительных механизмах системы. На рис. 9, *c* продемонстрирована работа перестраиваемого регулятора с логическим законом, построенным на выражении (18). Из графиков видно, что высота объекта соответствует заданной на протяжении всего времени моделирования, при этом при формировании управляющего возмущения амплитуда переключений заметно сокращается и ошибка регулирования сводится к нулю.

На рис. 10 изображены графики вырабатываемых управляющих сигналов при параметрическом возмущающем воздействии на систему. В качестве такого воздействия выступает сброс груза в промежуточной точке полета в момент времени $t = 14,2$ с. Заметные изменения высоты отсутствуют, поэтому на рис. 10, *a–c* изображены сформированные управляющие воздействия соответствующим регулятором.

На рис. 11, *a, b* изображено изменение управляющего воздействия в момент времени параметрического возмущения в увеличенном масштабе. Из характера графиков видно, что система с регулятором с переменной структурой становится невосприимчивой к подобным возмущениям и ошибка регулирования не изменяется, в то время как ПИД-регулятор с некоторым запаздыванием реагирует на подобное возмущение.

В качестве сравнения и оценки качества работы регуляторов был выбран второй интегральный критерий. Значения данного критерия при различных типах регуляторов представлены в таблице.

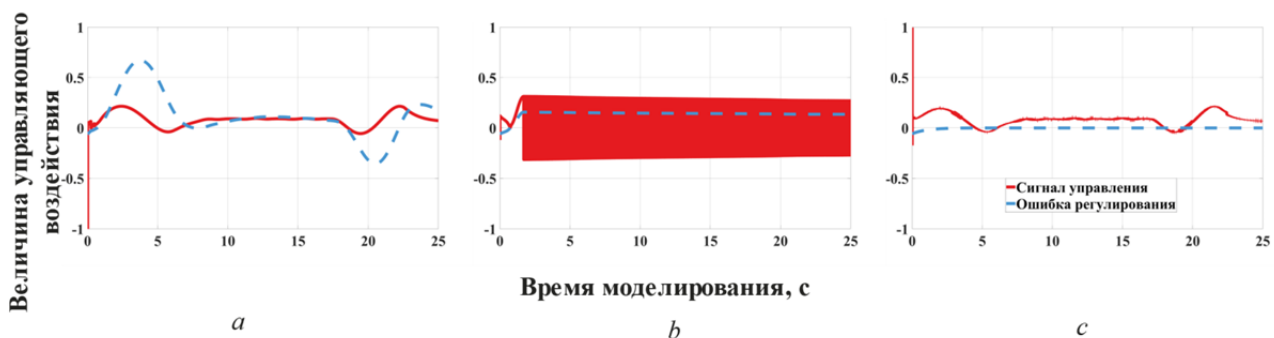


Рис. 9. Значения управляющих воздействий, сформированных регулятором при координатных возмущениях (сплошная линия), и ошибка регулирования (пунктирная линия); *a* – регулятор ПИД; *b* – регулятор с перестраиваемой структурой; *c* – регулятор с перестраиваемой структурой с дополнительной информацией об ошибке регулирования

Fig. 9. Values of control effects generated by the controller under coordinate disturbances (solid line) and control error (dashed line); *a* – PID; *b* – controller with reconfigurable structure, *c* – controller with a reconfigurable structure with additional information about the control error

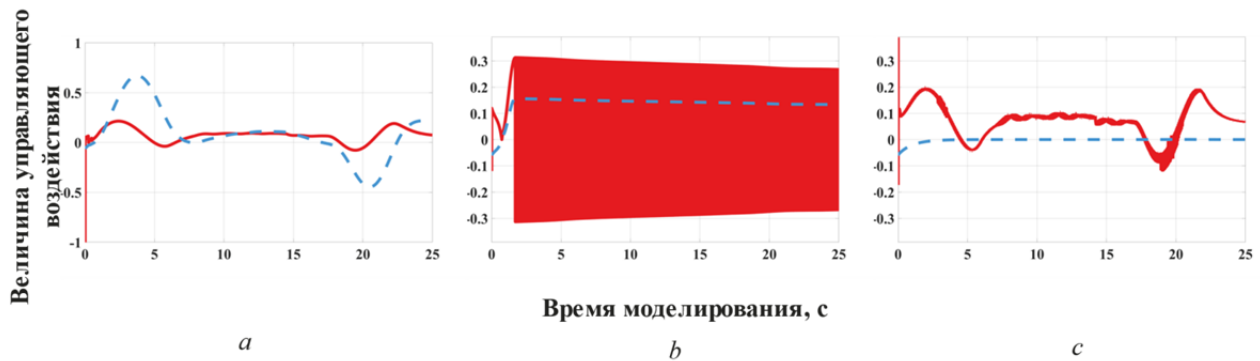


Рис. 10. Значения управляющих воздействий, сформированных регулятором при параметрических возмущениях (сплошная линия), и ошибка регулирования (пунктирная линия): *a* – регулятор ПИД; *b* – регулятор с перестраиваемой структурой; *c* – регулятор с перестраиваемой структурой с дополнительной информацией об ошибке регулирования

Fig. 10. Values of control effects generated by the controller under parametric disturbances (solid line) and control error (dashed line): *a* – PID; *b* – controller with reconfigurable structure; *c* – controller with a reconfigurable structure with additional information about the control error

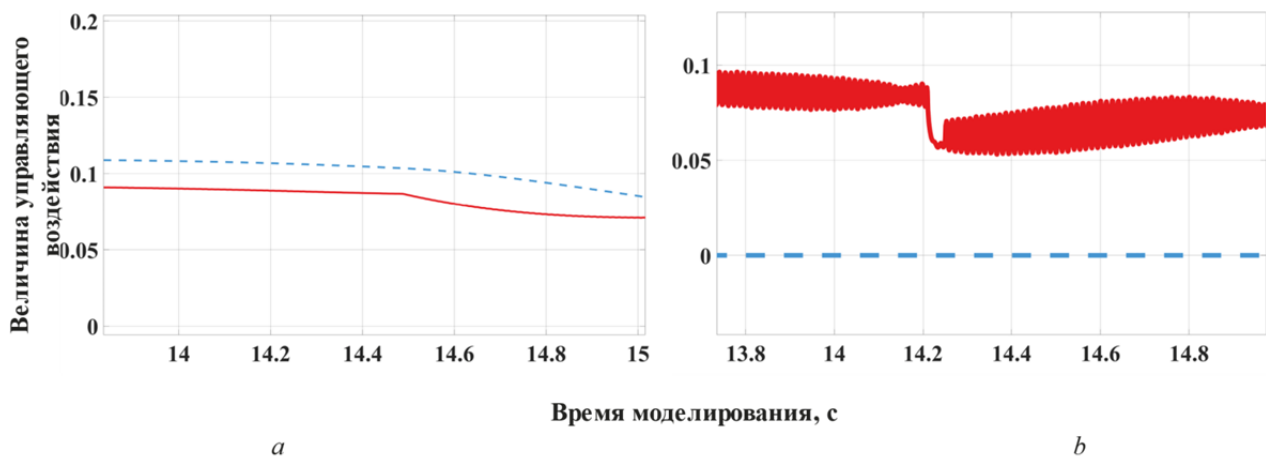


Рис. 11. Значения управляющих воздействий, сформированных регулятором при параметрических возмущениях (сплошная линия), и ошибка регулирования (пунктирная линия): *a* – регулятор ПИД в момент времени $t = 14,2$ с; *b* – регулятор с перестраиваемой структурой с дополнительной информацией об ошибке регулирования в момент времени $t = 14,2$ с

Fig. 11. Values of control effects generated by the controller under parametric disturbances (solid line) and control error (dashed line): *a* – PID at the moment $t = 14.2$ s; *b* – controller with a reconfigurable structure with additional information about the control error at the moment $t = 14.2$ s

Значения второго интегрального критерия качества рассматриваемых регуляторов

Тип регулятора	Значение I_2	
	при количественном возмущении	при параметрическом возмущении
ПИД	4,498	4,637
С переменной структурой	3,528	3,526
С переменной структурой с дополнительной информацией	0,058	0,059

Заключение

В результате работы показаны преимущества регуляторов с перестраиваемой структурой перед регуляторами, построенными по типичным законам управления. В таблице представлены расчеты второго интегрального критерия для ПИД-регулятора и регуляторов, основанных на перестраиваемой структуре.

По данным таблицы видно, что при разных внешних возмущающих воздействиях регуляторы с переменной структурой стабилизируют систему быстрее относительно классического ПИД-регулятора (значения I_2 меньше значений I_2 для ПИД-регулятора). Также в отличие от ПИД-регулятора системы с перестраиваемой структурой становятся невосприимчивыми со стороны внешних парамет-

рических возмущающих воздействий (I_2 при количественном возмущении практически равны I_2 при параметрическом воздействии), что позволяет использовать систему не только в штатном режиме, но и в критических режимах управления квадрокоптером.

Список источников

1. Кузнецов Е.О. Коптеры: новые конструкции и возможности // Синергия наук. 2017. № 18. С. 935–942.
2. Белоглазов Д.А., Коберси Е.Ю. Анализ особенностей практического использования регуляторов систем автоматического управления квадрокоптерами // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3 (37). С. 22.
3. Яковлев К.С., Макаров Д.А., Баскин Е.С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 3–17.
4. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савицкий А.В. Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 4 (5). С. 49–57.
5. Херас И.Х.Г. Развитие беспилотных летательных аппаратов // Качество в производственных и социально-экономических системах : сборник научных трудов 7-й Международной научно-технической конференции. Курск, 2019. С. 162–164.
6. Иноземцев Д.П. Беспилотные летательные аппараты: Теория и практика // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2013. № 2. С. 50–54.
7. Manal S. Esmail, Mohamed H. Merzban, Ashraf A.M. Khalaf, Hesham F.A. Hamed, Aziza I. Hussein. Attitude and Altitude Nonlinear Control Regulation of a Quadcopter Using Quaternion Representation // IEEE Access. 2022. V. 10. P. 5884–5894.
8. Senthil Kumar S., Vijayanandh R., Mano S. Mathematical modelling and attitude control of quadcopter based on classical controller // International Journal of Vehicle Structures and Systems. 2018. V. 10, № 5. P. 318–323. DOI: 10.4273/ijvss.10.5.02
9. Cowling I.D., Whidborne J.F., Cooke A.K. Optimal trajectory planning and LQR control for a quadrotor UAV // UKACC Int. Conf. Control (ICC2006). 2006.
10. Юшкин Д.А., Евдокимов С.А. Разработка адаптивного нечеткого ПИД-регулятора системы автоматического управления и стабилизации мультироторного БПЛА типа квадрокоптер // Актуальные проблемы современной техники, науки и образования. 2015. Т. 2, № 1. С. 194–198.
11. Miladi N., Ladhari T., Said S., M'sahli F. Tracking Control of Quadcopter Using Explicit Nonlinear Model Predictive Control // 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). 2018. DOI: 10.1109/SSD.2018.8570415
12. Guilherme V.R., Manuel G.O., Francisco R.R. Robust Nonlinear Control for Path Tracking of a Quad-Rotor Helicopter. 2015 V. 17. I. 1. P. 142–156. DOI: 10.1002/asjc.823
13. Ashis C.K., Rahul Sharma K. Dynamic Modeling and Altitude Control of Parrot Rolling Spider using LQR // 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT). 2019. DOI: 10.1109/ICICT46008.2019.8993150
14. Kuantama E., Tarca I., Tarca R. Feedback Linearization LQR Control for Quadcopter Position Tracking // 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2018. DOI: 10.1109/CoDIT.2018.839491
15. Argentim L., Rezende W., Santos P., Aguiar R. PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform // 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). 2013. DOI: 10.1109/ICIEV.2013.6572698
16. Jing Y., Mirza A., Sipahi R., Martinez-Lorenzo J. Sliding Mode Controller with Disturbance Observer for Quadcopters; Experiments with Dynamic Disturbances and in Turbulent Indoor Space // Drones. 2023. V. 7. P. 1–41. DOI: 10.3390/drones7050328
17. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding mode control and observation. 2014. P. 1–356. DOI: 10.1007/978-0-8176-4893-0
18. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределённости. М. : Наука; Физматлит, 1997. С. 1–352.
19. Chater E.A., Housny H., Fadil H.E. Robust Sliding Mode Control for Quadrotor UAV // IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCs). 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICECOCs50124.2020.9314584
20. Гурьянов А.Е. Моделирование управления квадрокоптером // Инженерный вестник. 2014. № 8. С. 1–4.
21. Luukkainen T. Modelling and control of quadcopter // Independent research project in applied mathematics. 2011. P. 1–26.
22. Финаев В.И., Шаповалов И.О., Мельниченко А.С. Моделирование полета квадрокоптера при применении ПИД-регулирования // Известия ЮФУ. 2015. № 2 (163). С. 40–49.
23. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М. : Наука, 1967. С. 1–336.
24. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Реконфигурируемые системы : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. ун-та. 2010. С. 1–168.

References

1. Kuznechenkov, E.O. (2017) Koptery: novye konstrukcii i vozmozhnosti [Copters: new designs and features]. *Sinergija Nauk*. 18. pp. 935–942.
2. Beloglazov, D.A., Kobersi, I.S., Kosenko, E.Ju. & etc. (2015) Analiz osobennostej prakticheskogo ispolzovaniya reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravlenija kvadrokopterami [Analysis of the features of the practical use of controllers for automatic control systems of quadcopters]. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 3(37). p. 22.
3. Yakovlev, K.S., Makarov, D.A. & Baskin, E.S. (2014) Metod avtomaticheskogo planirovaniya traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v uslovijah ograničenij na dinamiku poleta [Method for automatic planning of the trajectory of an unmanned aerial vehicle under conditions of restrictions on flight dynamics]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij*. 4. pp. 3–17.
4. Pavlovskij, V.E., Jacun, S.F., Emelyanova, O.V. & Savickij, A.V. (2014) Modelirovanie i issledovanie processov upravlenija kvadrokopterom [Modeling and research of quadcopter control processes]. *Robototekhnika i tehničeskaja kibernetika*. 4(5). pp. 49–57.
5. Heras, I.H.G. (2019) Razvitie bespilotnyh letatelnyh apparatov [Development of Unmanned Aerial Vehicles]. In: *Kachestvo v proizvodstvennyh i socialno-jekonomičeskijh sistemah: sbornik nauchnyh trudov 7-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii, Kursk, 19 aprelja 2019 goda*. Kursk : Jugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. pp. 162–164.

6. Inozemcev, D.P. (2013) *Bespilotnye letatelnye apparaty: Teorija i praktika* [Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Practice]. Avtomatizirovannye tehnologii izyskanij i proektirovanija. 2. pp. 50–54.
7. Manal S. Esmail, Mohamed H. Merzban, Ashraf A. M. Khalaf, Hesham F. A. Hamed, Aziza I. Hussein (2022) Attitude and Altitude Nonlinear Control Regulation of a Quadcopter Using Quaternion Representation. *IEEE Access*. 10. pp. 5884–5894.
8. Senthil Kumar, S., Vijayanandh, R. & Mano, S. (2018) Mathematical modelling and attitude control of quadcopter based on classical controller. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. 10(5). pp. 318–323. DOI: 10.4273/ijvss.10.5.02
9. Cowling, I.D., Whidborne, J.F. & Cooke, A.K. (2006) Optimal trajectory planning and LQR. In: *Proceedings of UKACC International Conference Control 2006 (ICC2006), September 2006*. Glasgow, UK.
10. Yushkin, D.A. & Evdokimov, S.A. (2015) Razrabotka adaptivnogo nechetkogo PID-reguljatora sistemy avtomaticheskogo upravlenija i stabilizacii multirotornogo BPLA tipa kvadrokopter [Development of an adaptive fuzzy PID controller for an automatic control and stabilization system for a multirotor quadcopter UAV]. *Aktualnye problemy sovremennoj tehniki, nauki i obrazovanija*. 2 (1). pp. 194–198.
11. Miladi, N., Ladhari, T., Said, S.H. & M'sahli, F. (2018) Tracking Control of Quadcopter Using Explicit Nonlinear Model Predictive Control. In: *15th International Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. DOI: 10.1109/SSD.2018.8570415
12. Guilherme, V.R., Manuel, G.O. & Francisco R.R. (2015) Robust Nonlinear Control for Path Tracking of a Quad-Rotor Helicopter. *Asian Journal of Control*. 17(1). pp. 142–156.
13. Ashis, C.K. & Rahul Sharma, K. (2019) Dynamic Modeling and Altitude Control of Parrot Rolling Spider using LQR. In: *2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*. DOI: 10.1109/ICICICT46008.2019.8993150
14. Kuantama, E., Tarca, I. & Tarca, R. (2018) Feedback Linearization LQR Control for Quadcopter Position Tracking. In: *5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. DOI: 10.1109/CoDIT.2018.839491
15. Argentim, L.M., Rezende, W.C., Santos, P.E. & Aguiar, R.A. (2013) PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform. In: *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. DOI: 10.1109/ICIEV.2013.6572698
16. Jing, Y., Mirza, A., Sipahi, R. & Martinez-Lorenzo, J. (2023) Sliding Mode Controller with Disturbance Observer for Quadcopters; Experiments with Dynamic Disturbances and in Turbulent Indoor Space. *Drones*. 7. Art. 328. DOI: 10.3390/drones7050328
17. Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014) *Sliding Mode Control and Observation*. Sliding mode control and observation. New York : Birkhäuser New York. DOI: 10.1007/978-0-8176-4893-0
18. Emelyanov, S.V. & Korovin, S.K. (1997) *Novye tipy obratnoj svyazi: Upravlenie pri neopredeljonnosti* [New types of feedback: Control under uncertainty]. Moscow : Nauka. Fizmatlit.
19. Chater, E.A., Housny, H. & Fadil, H.E. (2020) Robust Sliding Mode Control for Quadrotor UAV. In: *2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS), Kenitra, Morocco, 2020*. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICECOCS50124.2020.9314584
20. Guryanov, A.E. (2014) Modelirovanie upravlenija kvadrokopterom [Quadcopter control simulation]. *Inzhenernyj vestnik*. 8. p. 4.
21. Luukkonen, T. (2011) *Modelling and control of quadcopter*.
22. Finaev, V.I., Shapovalov, I.O. & Melnichenko, A.S. (2014) Modelirovanie poleta kvadrokoptera pri primenenii PID-regulirovanija [Modeling the flight of a quadcopter using PID control]. In: *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Part 1. Taganrog*.
23. Emelyanov, S.V. (1967) *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija s peremennoj strukturoj* [Automatic control systems with variable structure]. Moscow : Nauka.
24. Shidlovsky, S.V. (2010) *Avtomaticheskoe upravlenie. Perestraivaemye struktury* [Automatic Control. Reconfigurable Structures] : a study guide. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo universiteta.

Информация об авторах:

Окунский Михаил Викторович – аспирант, ассистент кафедры информационного обеспечения инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mvokunsky@gmail.com

Шидловский Станислав Викторович – доктор технических наук, декан факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shidlovskysv@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Okunsky Mikhail V., postgraduate student, teaching assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mvokunsky@gmail.com

Shidlovsky Stanislav V., Dr.Sc. (Engineering), Dean of the Faculty of Innovation Technologies, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shidlovskysv@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Научная статья
УДК 533.69
doi: 10.17223/7783494/2/4

Оптимальное аэродинамическое проектирование как элемент технологии обеспечения безопасности в гражданской авиации

Сергей Владимирович Пейгин¹

¹ ООО «ОПТАКОНТ», Москва, Россия, mishpahat_peiguine@yahoo.com

Аннотация. Рассматривается один из элементов технологии, обеспечивающей безопасность жизнедеятельности в гражданской авиации – оптимальное аэродинамическое проектирование, позволяющее достичь ключевых аэродинамических характеристик летательного аппарата, необходимых для гарантированно безопасного полета в широком диапазоне изменения его условий. Данный метод позволяет найти оптимальную форму для конфигурации крыло–фюзеляж–моторгондоль двигателя, которая обеспечивает минимальное сопротивление при фиксированной подъемной силе с учетом многочисленных геометрических и аэродинамических условий. Решение задачи получено на основе сочетания численных решений полных уравнений Навье–Стокса для турбулентных течений вязкого сжимаемого газа с методом глобального оптимального поиска на базе генетических алгоритмов с учетом конструктивных параметров и конструктивных ограничений. Показано, что оптимальное решение отвечает всем заданным ограничениям на форму проектируемого самолета и его аэродинамические свойства, обладает достаточно малым полным сопротивлением при заданных условиях крейсерского полета.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, полные уравнения Навье–Стокса, коэффициент сопротивления, момент тангажа, коэффициент подъемной силы

Для цитирования: Пейгин С.В. Оптимальное аэродинамическое проектирование как элемент технологии обеспечения безопасности в гражданской авиации // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 46–57. doi: 10.17223/7783494/2/4

Original article
doi: 10.17223/7783494/2/4

Optimal aerodynamic design as an element of safety technology in civil aviation

Sergei V. Peigin¹

¹ OPTACONT Ltd., Moscow, Russian Federation, mishpahat_peiguine@yahoo.com

Abstract. The article discusses one of the elements of technology that ensures life safety in civil aviation - optimal aerodynamic design, which allows achieving the key aerodynamic characteristics of an aircraft necessary for a guaranteed safe flight in a wide range of changes in its conditions. This method makes it possible to find the optimal shape for the wing-fuselage-engine nacelle configuration, which provides the minimum drag at a fixed lift, taking into account numerous geometric and aerodynamic conditions. The solution of the problem is obtained on the basis of a combination of numerical solutions of the complete Navier-Stokes equations for turbulent flows of a viscous compressible gas with the method of global optimal search based on Genetic Algorithms, taking into account design parameters and design constraints. It is shown that the optimal solution meets all the given restrictions on the shape of the designed aircraft and its aerodynamic properties, has a sufficiently small total drag under given cruising flight conditions.

Keywords: optimal design, full Navier-Stokes equations, drag coefficient, pitch moment, lift coefficient

For citation: Peigin, S.V. (2023) Optimal aerodynamic design as an element of safety technology in civil aviation. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeятelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 46–57. doi: 10.17223/7783494/2/4 (In Russian).

Введение

За последние двадцать лет проектирование аэродинамических форм с помощью методов CFD привлекло большое внимание ученых и промышленный интерес [1–7]. В авиационной промышленности существуют ожидания, что использование автоматических методов оптимизации могли бы существенно сократить процесс аэродинамиче-

ского проектирования (особенно на этапе эскизного проектирования, который может стоить более 100 млн USD [8]). Также предполагается, что точные оптимизационные алгоритмы могут улучшить качество дизайна, сделав проект более конкурентоспособным.

Целый ряд подходов к решению проблемы оптимизации аэродинамической формы был предложен на основе различных моделей аэродинамиче-

ского моделирования и методов оптимального поиска.

Тем не менее до настоящего времени влияние инструментов CFD-оптимизации для практического проектирования самолетов довольно ограничено и все еще далеко от ожиданий. Причины этого следующие. Во-первых, многие из разработанных методов используют недостаточно точные математические модели описания газового потока, такие как невязкие уравнения Эйлера, которые могут вести к неправильным выводам, особенно в ситуациях, когда эффекты вязкости имеют решающее значение. Кроме этого, многие методы оптимизации, используемые для оптимизации формы, направлены на поиск локального экстремума (например, методы градиентного поиска). Это может стать серьезным препятствием для успешной оптимизации, поскольку (как и во многих задачах нелинейной оптимизации) рассматриваемая целевая функция имеет большое количество локальных минимумов. Еще одним принципиальным недостатком является невозможность точного учета большого количества ограничений, накладываемых на оптимальное решение, что характерно для промышленного аэродинамического проектирования. Наконец, чтобы добиться промышленного успеха, процесс оптимизации должен быть автоматическим. Это означает, что как только исходная геометрия, условия проектирования и ограничения заданы, перенастройка входных параметров не требуется и оптимизация продолжается без необходимости вмешательства пользователя.

С целью преодоления этих трудностей был разработан точный, надежный и вычислительно эффективный подход к многоточечному оптимальному проектированию конфигурации крыло-фюзеляж-мотогондола двигателя самолета с учетом многочисленных ограничений различного типа. Он основан на использовании полной аэродинамической модели (полных уравнений Навье-Стокса) и глобальных методов поиска (используя смешанные детерминированные / вероятностные методы генетических алгоритмов), позволяющих учитывать одновременно большое количество ограничений. Возможности метода были продемонстрированы на примере аэродинамического проектирования крыла для конфигурации, характерной для самолетов бизнес-класса. В этом примере оптимизации подверглась форма крыла снаружи от корня крыла. Хотя формы фюзеляжа и мотогондолы оставались неизменными, оптимальное проектирование позволило учесть эффект взаимодействия крыла с другими элементами компоновки. Результаты показали, что предлагаемый метод обеспечивает низкий уровень полного сопротивления всего самолета в крейсерском режиме,

позволяет точно учесть большое количество ограничений и обеспечивает требуемый уровень аэродинамических характеристик, необходимых для обеспечения безопасности полета самолета в широком диапазоне изменения условий полета.

Постановка задачи

Рассматриваемая задача оптимального аэродинамического проектирования решается на стадии эскизного проектирования, когда основные целевые характеристики самолета, такие как дальность полета, весовые параметры и общая компоновка самолета, уже определены.

Это позволяет уточнить наряду с геометрическими характеристиками конструкции аэродинамические характеристики: крейсерский коэффициент подъемной силы C_Y и число Маха, максимальное значение допустимой величины момента такжа C_M , минимальное значение допустимого $C_Y^{\max}$ при взлете и т.д.

В качестве целевой функции используется полное сопротивление всего самолета, так как это принятый в проектировании чувствительный показатель общих аэродинамических характеристик самолета. Учет ограничений на оптимальное решение осуществляется на основе двух подходов. Там, где это возможно, ограничения учитываются точно. Оставшиеся ограничения преобразуются в альтернативные ограничения, которые выражаются через сопротивление. Например, геометрические ограничения и такие аэродинамические ограничения, как заданный коэффициент подъемной силы, выполняются точно, в то время как требование на достаточно высокий $C_Y^{\max}$ при взлете переформулировано в терминах минимизации полного сопротивления в соответствующих летных условиях.

Сформулируем в точных терминах проблему оптимизации. Начнем с одноточечной задачи. Ее цель – найти аэродинамическую форму, которая минимизирует коэффициент полного сопротивления C_x с учетом следующих аэродинамических и геометрических ограничений:

1) Аэродинамические ограничения: заданный постоянный коэффициент подъемной силы C_Y и максимально допустимый момент тангажа M_z .

2) Геометрические ограничения на следующие величины, задаваемые для каждой оптимизируемой секции крыла:

- относительная толщина секции крыла $(t/c)_i$;
- радиус кривизны передней кромки секции крыла $(R_L)_i$;
- угол задней кромки секции крыла $(q_T)_i$;
- локальные толщины секции крыла $(y/t)_{ij}$.

В этих ограничениях $i = 1, \dots, N_{ws}$ – число секций по размаху крыла, а $j = 1, \dots, N_{bs}(i)$ – число ограничений на локальную толщину в секции номер i .

Отметим что с точки зрения безопасности полета, ключевыми элементами здесь являются удовлетворение ограничения на момент тангажа в крейсерском полете (которое обеспечивает устойчивость полета к малым возмущениям) и достижения необходимо-достаточной величины коэффициента подъемной силы $C_Y^{\max}$ при взлете.

Цель многооточечной оптимизации – минимизировать взвешенную комбинацию коэффициентов сопротивления в нескольких точках дизайна. При этом геометрические ограничения не зависят от точки дизайна, а аэродинамические ограничения задаются для каждой точки дизайна по отдельности.

Решение задачи для реальных конфигураций является сложным в силу нижеследующих причин:

- Точный расчет сопротивления очень сложен для реальных конфигураций.

- Нет общего решения проблемы глобального геометрического представления аэродинамических поверхностей.

- Оптимальный поиск происходит в пространстве высокой размерности.

- Необходим эффективный учет большого числа нелинейных ограничений.

- Решение задачи требует огромнейшего объема вычислений.

В соответствии с вышесказанным, базовый алгоритм оптимального аэродинамического проектирования содержит три основных элемента:

1. Расчет целевой функции (в нашем случае это коэффициент полного сопротивления самолета C_X) на базе численного расчета обтекания аэродинамических конфигураций потоком вязкого сжимаемого газа на основе математической модели высокого уровня точности (осредненных по числу Рейнольдса полных уравнений Навье–Стокса).

2. Поиск оптимальной геометрии на базе алгоритма глобального оптимального поиска с учетом заданных многочисленных ограничений различного типа на оптимальное решение.

3. Повышение вычислительной эффективности на базе алгоритма параллелизации вычислительного потока на многопроцессорном вычислительном кластере.

Алгоритм оптимизации

Базовая методология

Геометрия крыла задается его двумерной формой в плане и базовыми секциями крыла, расположенными вдоль его размаха. Каждая базовая секция задается координатами X и Y нормализованного профиля, расположением его задней кромки и величи-

ной крутки. Аналитическое представление каждого аэродинамического профиля определяется гладким сопряжением двух сплайнов Безье, которые аппроксимируют верхнюю и нижнюю поверхности аэродинамического профиля. Всего для каждого профиля используется 17 коэффициентов Безье. Эти коэффициенты Безье вместе со значениями крутки и поперечного угла дают аналитическое представление поверхности крыла в предположении, что соседние по размаху сечения соединены линейчатой поверхностью. Таким образом, в случае трехсекционного крыла общее количество переменных проектирования равно 57.

Исходная поверхностная сетка самолета является базой для построения трехмерной многоблочной структурированной вычислительной сетки. Глобальная трехмерная область разделена на более мелкие блоки, каждый из которых представляет собой структурированную сетку. Структурированные блоки объединяются в многосеточные уровни, начиная от грубого до тонкого уровня.

Расчеты аэродинамических характеристик самолета проводились с использованием вычислительного кода высокой точности для решения усредненных по Рейнольдсу полных уравнений Навье–Стокса вязкой сжимаемой жидкости в турбулентном режиме на основе надежного, высокоточного и вычислительно-эффективного численного метода высокого порядка точности с использованием схемы ENO (Essentially Non-Oscillatory Scheme) и многосеточного подхода (multigrid approach) с использованием многоблочных структурированных вычислительных сеток при трансзвуковых скоростях полета на высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных комплексах.

Основными характеристиками кода являются использование многоблочных структурированных сеток, многосеточного (многоуровневого) подхода, схемы высокого порядка точности, учёт турбулентности и глубокая параллелизация.

В алгоритме кода конвективная часть уравнений аппроксимируется характеристическим оператором первого порядка, который легко обращается. Эта схема применяется везде при многосеточной релаксации. При этом схема высокого порядка ENO/WENO определяет поправки в правую часть дискретного уравнения только на самом тонком сеточном уровне, а вязкие члены аппроксимируются обычным образом.

Код обеспечивает точный расчет сопротивления для сложных аэродинамических конфигураций, достигая хорошей точности на грубых сетках. В нём отсутствуют искусственные параметры. Все эти качества делают код подходящим для промышленных приложений.

В качестве поисковой машины оптимизация использует генетический алгоритм. Генетические алгоритмы (ГА), основанные на комбинации детерминистических и вероятностных подходов, имитируют эволюционный процесс в природе. В качестве базового варианта используются ГА с плавающей точкой и следующие генетические операторы: турнирная селекция, одноточечный оператор размножения, неравномерная мутация и элитизм. В рамках многоточечной оптимизации алгоритм использует гибридный генетический поиск оптимальных решений в сочетании с методом аппроксимационных математических моделей и связанных локальных баз данных, получаемых на основе высокоточных численных решений уравнений Навье–Стокса.

Учет ограничений на оптимальное решение

В задаче оптимизации аэродинамических форм учет ограничений на решение исключительно важен. Причина этого в том, что (как и во многих реальных задачах) оптимальное решение не является локальным минимумом. Вместо этого оптимальное решение обычно располагается на многомерной поверхности, отделяющей область допустимых значений от области, где решение не может быть реализовано, в том числе по причине отсутствия безопасности полета. Более того, топология этой поверхности часто заранее неизвестна. Например, в случае оптимизационной задачи с ограничением на момент тангажа определение такой границы требует большого количества вычислительно сложных численных расчетов.

В связи с этим был использован принципиально новый подход к учёту нелинейных ограничений, который можно очертить следующим образом:

– Изменение традиционной стратегии, в которой маршрут поиска может проходить только через допустимые (удовлетворяющие ограничениям) точки, посредством допущения маршрутов, проходящих как через допустимые, так и через недопустимые точки. Основная идея этого подхода состоит в том, что информация из «запретных» (т.е. не удовлетворяющих ограничениям) областей может оказаться очень важной, и путь к оптимальной точке, пролегающий через эти области, может оказаться существенно короче.

– С этой целью строится расширение целевой функции, производя её оценку также и в недопустимых точках. Это оказалось возможным в силу одного из базовых свойств ГА: в противоположность классическим методам оптимизации ГА допускают негладкие расширения целевых функций.

Вычислительная эффективность

Стандартные ГА обладают низкой вычислительной эффективностью в тех случаях, когда расчёт

целевой функции является вычислительно ёмким (как это имеет место в нашем случае при решении уравнений Навье–Стокса).

Чтобы эффективно имплементировать ГА, было необходимо значительно повысить вычислительную эффективность. Дело в том, что традиционное использование ГА требует очень большого объёма вычислений (даже алгоритм с населением $M = 100$ требует – в случае 200 поколений – по меньшей мере 20 000 решений полных уравнений Навье–Стокса), что практически является абсолютно неприемлемым.

Требования вычислительной эффективности диктуют следующие свойства алгоритма: число точных расчетов уравнений Навье–Стокса должно быть очень ограничено, и тем не менее алгоритм должен обеспечить быстрый и достаточно точный расчет целевой функции при генетическом поиске.

Чтобы преодолеть это, мы используем метод аппроксимационных моделей в специально разработанной нами форме метода локальных аппроксимаций, в котором функционалы на решении (такие, как подъёмная сила и сопротивление) аппроксимируются на основе локальной базы данных. База данных строится посредством решения полных уравнений Навье–Стокса в дискретной окрестности текущей базовой точки в пространстве поиска.

Для обеспечения точности оптимального поиска мы сочетаем использование приближённых и «точных» (полученных на основе полных уравнений Навье–Стокса) решений с помощью принципа «предикции – верификации». На стадии предикции одновременно производится генетический поиск на ряде вложенных поисковых областей. Поиск на каждой такой области порождает (суб)оптимальную точку, и на стадии верификации весь набор таких точек – «кандидатов» проверяется посредством решения полных уравнений Навье–Стокса, тем самым определяя финальную оптимальную точку.

С целью преодоления локальной природы описанной выше аппроксимации и обеспечения глобальности поиска производятся внешние итерации так, что в каждой итерации финальный оптимум служит отправной точкой для следующей итерации.

Фактически мы используем гибридный ГА, сочетающий внешние итерации с общепринятым генетическим поиском в ограниченных областях пространства поиска. Количество внешних итераций, необходимых для сходимости всего процесса, обычно не превышает 8–10.

Чтобы сделать оптимизацию аэродинамических форм практически выполнимой, была разработана многоуровневая параллелизация вычислительного потока на многопроцессорном вычислительном кластере.

Было использовано пять переплетающихся уровней параллелизации.

На Уровне 1 параллелизовано вычисление целевой функции (решение уравнений Навье–Стокса). В ней используется метод геометрической декомпозиции. Благодаря тому, что полная вычислительная область составлена из блоков, делается возможным распределить группы блоков по ведомым процессорам, контролируемым ведущим процессором. Каждый ведомый процессор выполняет вычисления в ячейках блоков, распределённых на него. На каждой итерации происходит обмен приграничной блочной информацией между процессорами так, что граничные полосы ячеек каждого блока получают данные из граничных полос соседних с ними блоков. Количество передаваемой информации пропорционально размеру сеточного шаблона (по большей части он равняется единице). Параллельная эффективность Уровня 1 превышает 90%.

Уровень 1 задействован совместно с Уровнем 2, который осуществляет параллельное сканирование поискового пространства (обработка тестируемых геометрий).

Уровни 1 и 2 улучшают вычислительную эффективность той части алгоритма, которая относится к расчёту обтеканий, в то время как на Уровнях 3–5 параллелизуется собственно оптимизационный поиск.

На Уровне 3 осуществляется параллелизация генетического поиска. Параллелизация на Уровне 3 происходит во взаимодействии с Уровнем 4, который осуществляет оптимальный поиск на ряде поис-

ковых областей. Уровень 5 осуществляет параллельную генерацию сеток. Параллелизация была осуществлена на многопроцессорном кластере с помощью стандартного пакета PVM.

Анализ результатов

Исходная геометрия и условия проектирования

Метод был применен к задаче многоточечной оптимизации с учетом многочисленных ограничений для аэродинамической компоновки, характерной для самолета транспортного типа. Исходная геометрия представлена на рис. 1.

Данная геометрия является типичной для широкого класса реактивных гражданских самолетов с мотогондолой двигателя, смонтированной на фюзеляже позади крыла. Такая компоновка позволяет избежать ухудшения аэродинамических характеристик крыла за счет отсутствия сильного влияния мотогондолы, но усложняет задачу обеспечения устойчивости полета (из-за более сильных ограничений на момент тангажа). Крыло было определено тремя секциями, а форма крыла в плане имела постоянную стреловидность передней кромки и переменную стреловидность задней кромки. Общее количество геометрических ограничений (относительная толщина секционных профилей, относительная толщина в местах расположения топливного бака, угол крутки профиля, радиус кривизны передней кромки, угол схода потока с задней кромки) равнялось 10.

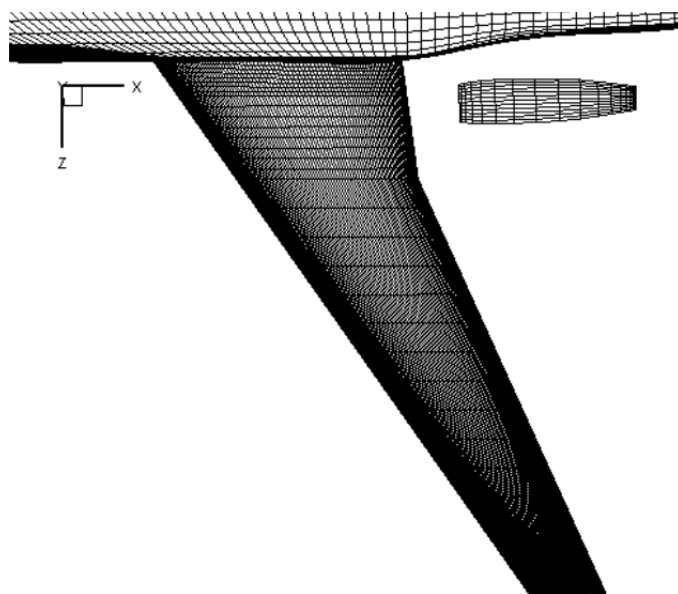


Рис. 1. Конфигурация крыло–фюзеляж–мотогондола двигателя. Вычислительная сетка. Вид сверху

Fig. 1. Wing-fuselage-engine nacelle configuration. Computing grid. View from above

В качестве исходной геометрии были использованы два набора аэродинамических профилей для

корневой, средней и концевой секций крыла. Первый набор включал профили, которые были ранее

получены для оптимального проектирования той же конфигурации, но без мотогондолы двигателя. Во втором наборе профиль средней секции был заменен на симметричный профиль с той же относительной максимальной толщиной, что и в первом наборе. Эта стартовая геометрия (очень далекая от оптимальной для любых полетных условий) была выбрана для оценки способности находить оптимальные решения «с нуля», т.е. начиная с начальной формы, далекой от оптимальной. В обоих случаях соответствующие стартовые профили имели одинаковые относительные максимальные толщины.

Исходная конфигурация крыло–фюзеляж–мотогондла с первым набором профилей обозначена GWBN_orig, а со вторым набором аэродинамических профилей – GWBN_orig_symm. Вычислительная сетка включает 58 блоков, а общее число узлов в расчетной сетке приближается к 1 300 000.

Основная точка проектирования соответствует крейсерскому режиму: $C_Y = 0,50$; $M = 0,84$; $Re = 5\,000\,000$. Эта точка использовалась для одноточечной оптимизации, описанной ниже. Первой расчетной точкой многоточечной оптимизации была точка проектирования для одноточечной оптимизации, а вторая точка была выбрана при более высоком числе Маха $M = 0,86$ с $C_Y = 0,50$; $Re = 5\,000\,000$. Геометрические ограничения были наложены на толщину радиусов передней кромки и углы схода потока с задней кромки крыла и должны были быть сохранены на уровне исходной геометрии.

Одноточечная оптимизация

Прежде всего был проведен аэродинамический анализ исходной конфигурации GWBN_orig в условиях крейсерского режима в первой точке проектирования: $C_Y = 0,50$; $M = 0,84$; $Re = 5\,000\,000$. Расчет на тонкой сетке дал следующие результаты: $C_Y = 0,50$; $C_X = 331$ аэродинамический каунт. Распределение давления на верхней поверхности конфигурации показано на рис. 2. При большем числе Маха $M = 0,86$ и той же величине коэффициента подъемной силы значение сопротивления составляет 354 каунта. Соответствующее распределение давления представлено на рис. 3.

Конфигурация GWBN_orig также анализировалась в более широком диапазоне условий обтекания. Соответствующие поляры сопротивления при фиксированных значениях чисел Маха ($M = 0,84$ и $M = 0,86$), а также зависимость сопротивления от числа Маха при фиксированном значении коэффициента подъемной силы $C_Y = 0,50$ для этой исходной конфигурации представлены ниже.

В целом проведенный аэродинамический анализ позволяет сделать вывод, что:

1. Начальная конфигурация GWBN_orig демонстрирует достаточно хорошее поведение в основной точке проектирования, что, по-видимому, связано с его оптимальностью при отсутствии гондолы.

2. По мере увеличения числа Маха набегающего потока интенсивность ударной волны над GWBN_orig возрастает.

3. Конфигурация имеет потенциал для снижения полного сопротивления как в основной расчетной точке, так и при более высоких числах Маха, что в конечном итоге может привести к возможности увеличения скорости крейсерского режима.

Первая одноточечная оптимизация (обозначенная GWBN_1p_opt) в основной точке проектирования была выполнена, начиная с геометрии GWBN_orig. Эти трансзвуковые условия с сочетанием большой подъемной силы и высокого числа Маха, которые представляют собой серьезную проблему при проектировании. Оптимизация уменьшила значение сопротивления на 10 аэродинамических каунтов по сравнению с GWBN_orig (с 331 до 321). Снижение сопротивления в основном связано с устранением волнового сопротивления (выигрыш 8,5 каунта), в то время как вязкое сопротивление уменьшилось только на 1,5 каунта. Однако при более высоком числе Маха $M = 0,86$ и при том же $C_Y = 0,50$ значение коэффициента сопротивления уменьшилось на небольшую величину, всего на 1 каунт в сравнение с исходной конфигурацией (от 354 до 353 отсчетов). Распределение давления на оптимизированной конфигурации показано на рис. 4, формы оптимальных сечений крыла – на рис. 5, а, поляры сопротивления – на рис. 6.

Сравнение секционных профилей GWBN_1p_opt и GWBN_orig показывает, что изменение формы гораздо более выражено для средней секции. Этого следовало ожидать, поскольку добавление мотогондолы оказало бы большее влияние на внутреннюю часть крыла. В средней секции крыла задняя часть оптимизированного аэродинамического профиля имеет повышенную кривизну на нижней поверхности, что делает профиль более закритическим. Оптимизированный изгиб аэродинамического профиля также имеет небольшой наклон передней кромки, который был и в исходной геометрии. Важно отметить, что ограничение на относительную толщину крыла выполняется с высокой точностью.

Анализ распределений давления при расчете $M = 0,84$, $C_Y = 0,50$ (см. рис. 4) показывает, что изменение формы привело к гораздо более плавным контурам давления, особенно во внутренней части крыла. Благоприятное перераспределение нагрузки на крыло уменьшило зону пониженного давления и ударную нагрузку, поскольку волна значительно ослабла. На основе анализа поляры сопротивления

на рис. 6 и зависимости сопротивления от числа Маха можно сделать вывод, что при $M = 0,84$ оптимизированное крыло демонстрирует хорошее поведение далеко за пределами условий проектирования. Снижение полного сопротивления начинается с $C_Y = 0,25$, и при неизменном расчетном $C_Y = 0,50$

уменьшение полного сопротивления начинается в дозвуковых условиях и простирается до $M = 0,86$. Однако при числах Маха выше точки проектирования улучшение незначительно, и снижение полного сопротивления при $M = 0,86$ оказалось сравнимым с расчетной точностью.

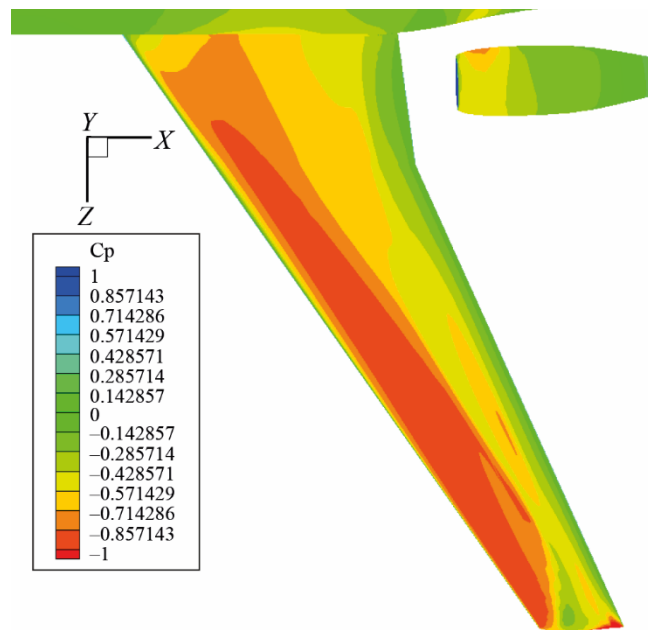


Рис. 2. Начальная конфигурация GWBN_orig. Распределение давления. Вид сверху.
 $C_Y = 0,50$; $M = 0,84$; $C_X = 331$ аэродинамический каунт

Fig. 2. Initial configuration GWBN_orig. Pressure distribution. View from above.
 $C_Y = 0.50$; $M = 0.84$; $C_X = 331$ aerodynamic count

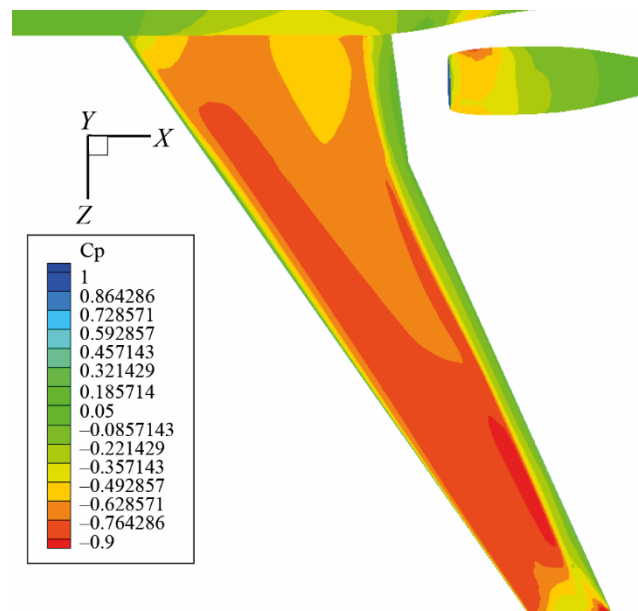


Рис. 3. Начальная конфигурация GWBN_orig. Распределение давления. Вид сверху.
 $C_Y = 0,50$; $M = 0,86$; $C_X = 354$ аэродинамических каунтов

Fig. 3. Initial configuration GWBN_orig. Pressure distribution. View from above.
 $C_Y = 0.50$; $M = 0.86$; $C_X = 354$ aerodynamic counts

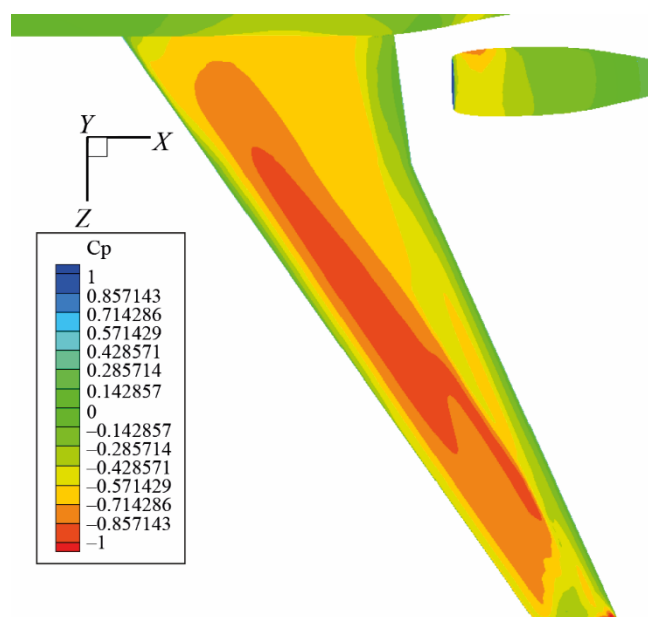


Рис. 4. Одноточечная оптимизация GWBN_1p_opt. Распределение давления. Вид сверху.
 $C_Y = 0,50$; $M = 0,84$; $C_X = 321$ аэродинамический каунт

Fig. 4. One-point optimization GWBN_1p_opt. Pressure distribution. View from above.
 $C_Y = 0.50$; $M = 0.84$; $C_X = 321$ aerodynamic count

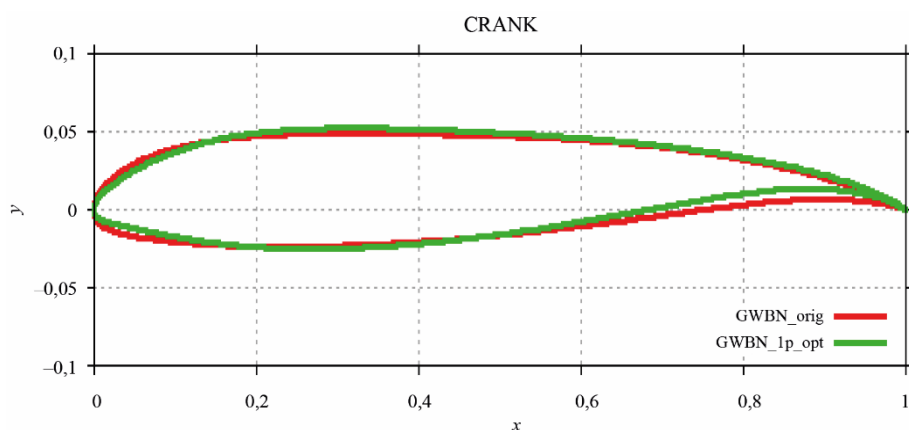


Рис. 5. Одноточечная оптимизация GWBN_1p_opt. Средняя секция крыла. Сравнение с начальной геометрией GWBN_orig

Fig. 5. One-point optimization GWBN_1p_opt. Middle section of the wing. Comparison with initial geometry GWBN_orig

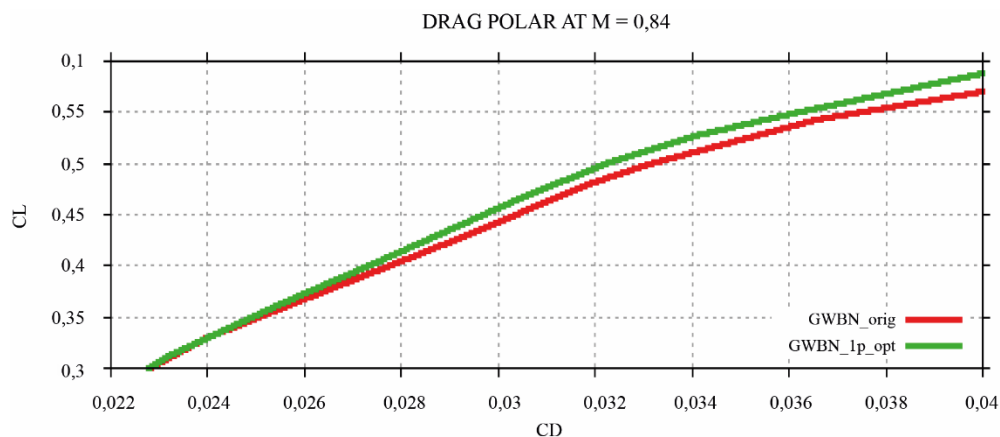


Рис. 6. Поляры сопротивления при $M = 0,84$

Fig. 6. Drag polars at $M = 0.84$

В связи с этим возникают следующие вопросы:

- Насколько уникально найденное решение?
- Способен ли оптимизационный алгоритм найти решение, близкое к глобальному оптимуму?
- Как улучшить аэродинамические характеристики при числах Маха выше расчетных?

Для того чтобы пролить свет на первые два вопроса, была проведена дополнительная одноточечная оптимизация для тех же условий проектирования, но для другой начальной геометрии, обозначенная как *GWBN_1ps_opt*. Разница между двумя начальными геометриями заключалась в том, что начальная геометрия (обозначенная *GWBN_orig_symm*) была намеренно «испорчена» заменой средней секции крыла с суперкритического на симметричный профиль. В результате распределение давления на верхней поверхности такой новой исходной конфигурации имеет сильную ударную волну в условиях крейсерского полета и существенно увеличивает полное сопротивление самолета до 388 аэродинамических каунта.

Вторая одноточечная оптимизация имела следующие цели:

- Оценить способность оптимизационного алгоритма находить оптимальные решения «с нуля» (что, по-видимому, затрудняет поиск пути к оптимуму).
- Сравнить новое оптимальное решение с предыдущим.

Были получены следующие результаты:

- Оптимальная геометрия *GWBN_1ps_opt* имеет тот же уровень полного сопротивления в точке проектирования, что и *GWBN_1p_opt* (321 аэродинамический каунт).
- Полученные с разных начальных условий оптимальные геометрии крыла очень близки друг к другу и практически неразличимы.
- Поляра сопротивления для *GWBN_1ps_opt* при $M = 0,84$ очень близка к поляре сопротивления для геометрии *GWBN_1p_opt*, но предсказуемо демонстрирует огромное преимущество по сравнению с исходной конфигурацией *GWBN_1p_orig_symm*.

По мнению автора, этот результат свидетельствует о том, что разработанный оптимизационный алгоритм способен находить решения, «далеко удаленные» от исходной точки, и хорошее приближение к глобальному оптимуму независимо исходной геометрии.

Многоточечная оптимизация

Для улучшения аэродинамических характеристик при высоких околосвуковых числах Маха была проведена многоточечная оптимизация (обозначенная как *GWBN_2p*). Первой точкой этой оптимизации была одноточечная оптимизация *GWBN_1p* (крей-

серские условия), а вторая точка была выбрана на более высоком уровне $M = 0,86$. Двухточечная оптимизация началась с той же исходной конфигурации *GWBN_orig*, что и первая одноточечная оптимизация *GWBN_1p_opt*.

В крейсерских условиях оптимизация *GWBN_2p_opt* уменьшила полное сопротивление на 10 аэродинамических каунтов по сравнению с *GWBN_orig* (от 331 до 321), что соответствует снижению сопротивления для одноточечной оптимизации *GWBN_1p_opt*. При более высоком числе Маха $M = 0,86$ коэффициент сопротивления уменьшился на 6 единиц по сравнению с исходной конфигурацией (с 354 до 348). Подобно одноточечной оптимизации, уменьшение сопротивления в основном произошло за счет уменьшения волнового сопротивления.

Сравнивая двухточечную оптимизацию *GWBN_2p_opt* с одноточечной оптимизацией *GWBN_1p_opt*, мы можем сделать вывод, что выигрыш в полном сопротивлении, достигнутый в *GWBN_1p_opt*, сохраняется в основной расчетной точке, при этом значительно увеличивается при более высоких значениях числа Маха. Распределения давления на верхней поверхности оптимизированной конфигурации показаны на рис. 7–8, а зависимость сопротивления от числа Маха при фиксированном значении коэффициента подъемной силы – на рис. 9.

При $M = 0,84$, аналогично одноточечной оптимизации *GWBN_1p_opt*, многоточечная оптимизация *GWBN_2p_opt* привела к положительному результату. Перераспределение нагрузки на крыло, уменьшающее зону пониженного давления, и распределения давления. *GWBN_2p_opt* близки к *GWBN_1p_opt*. В связи с добавлением в оптимизацию второй точки при $M = 0,86$ картина распределения давления улучшилась по сравнению с *GWBN_1p_opt*, что и привело к снижению сопротивления при более высоких числах Маха.

Этот вывод далее подтверждается сравнением кривых роста сопротивления от числа Маха. До $M = 0,84$ кривая *GWBN_2p_opt* почти идентична кривой *GWBN_1p_opt*, но, начиная с $M = 0,84$, двухточечная оптимизация неизменно приводила к более низкому уровню сопротивления, что, конечно же, объясняется влиянием более высокой расчетной точки по числу Маха.

В основной точке проектирования в обоих случаях достигнут одинаковый уровень сопротивления, а во второй расчетной точке $M = 0,86$ и при более высоких числах Маха многоточечная оптимизация привела к улучшению аэродинамических характеристик.

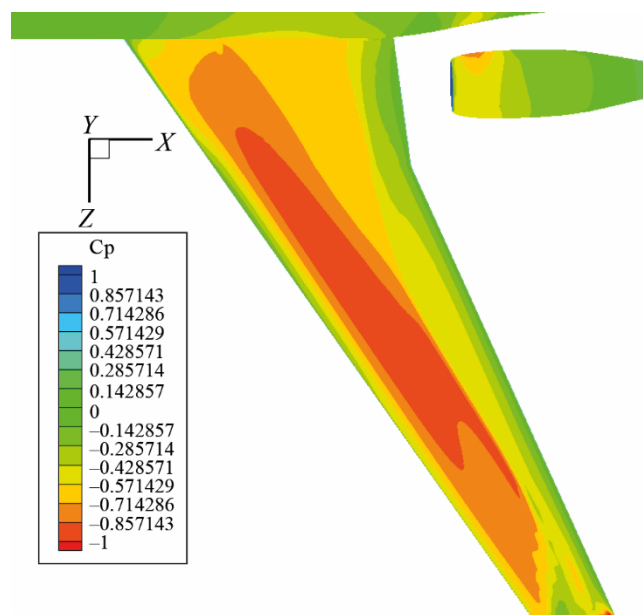


Рис. 7. Двухточечная оптимизация GWBN_2p_opt. Распределение давления. Вид сверху.

$C_Y = 0,50$; $M = 0,84$; $C_X = 321$ аэродинамический каунт

Fig. 7. Two-point optimization GWBN_2p_opt. Pressure distribution. View from above.

$C_Y C_Y = 0.50$; $M = 0.84$; $C_X = 321$ aerodynamic count

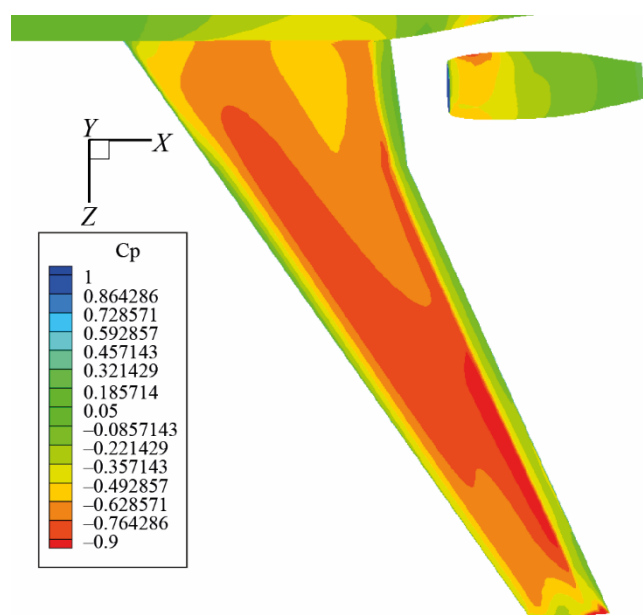


Рис. 8. Двухточечная оптимизация GWBN_2p_opt. Распределение давления. Вид сверху.

$C_Y = 0,50$; $M = 0,86$; $C_X = 348$ аэродинамических каунтов

Fig. 8. Two-point optimization GWBN_2p_opt. Pressure distribution. View from above.

$C_Y = 0.50$; $M = 0.86$; $C_X = 348$ aerodynamic counts

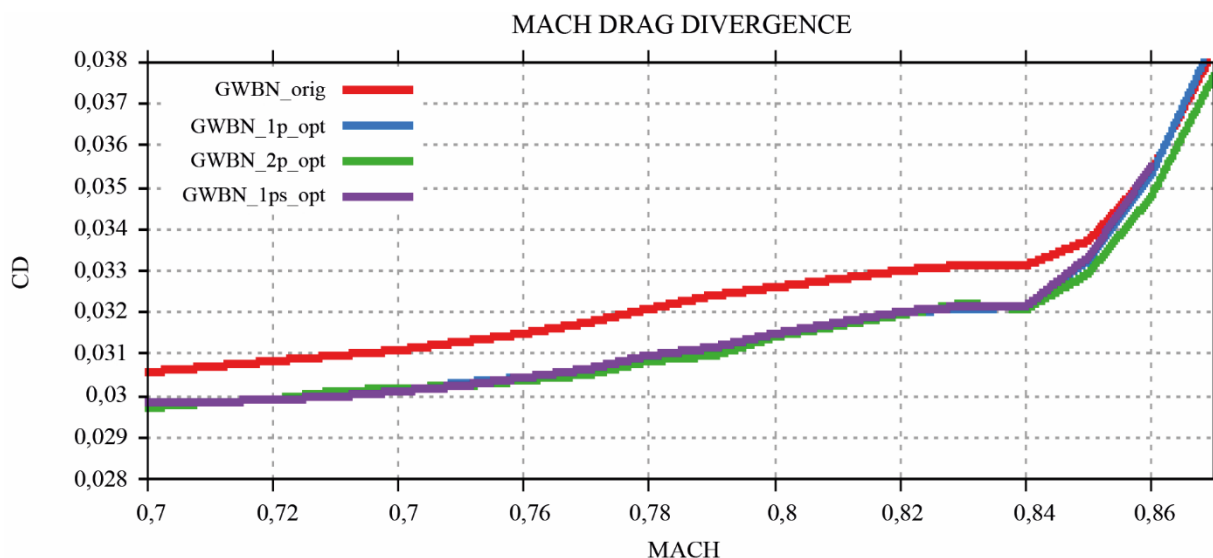


Рис. 9. Зависимость сопротивления от числа Маха при $C_Y = 0,50$

Fig. 9. Dependence of the drag on the Mach number at $C_Y = 0.50$

Это можно объяснить тем, что в заданных расчетных условиях существует ряд близких к оптимальным форм со значением сопротивления в пределах вычислительной точности (которую мы здесь оцениваем одним аэродинамическим каунтом).

Эти решения образуют пул форм, «близких к глобальному оптимуму». Добавление второй точки проектирования сужает область поиска, отдав предпочтение решениям с лучшим взвешенным коэффициентом при высоких числах Маха.

Список источников

1. Obayashi S., Yamaguchi Y., Nakamura T. Multiobjective Genetic Algorithm for Multidisciplinary Design of Transonic Wing Planform // *Journal of Aircraft*. 1997. V. 34. P. 690–693. DOI: 10.2514/2.2231
2. Vicini A., Quagliarella D. Inverse and Direct Airfoil Design Using a Multiobjective Genetic Algorithm // *AIAA Journal*. 1997. V. 35(9). P. 1499–1505. DOI: 10.2514/2.274
3. Mohammadi B., Pironneau O. *Applied Shape Optimization for Fluids*. Oxford : Oxford University Press, 2001.
4. Nadarajah S.K., Jameson A. Studies of the Continuous and Discrete Adjoint Approaches to Viscous Automatic Aerodynamic Shape Optimization // *AIAA Paper*. 2001. № 2530. P. 2001.
5. Vassberg J., Jameson A. *Aerodynamic Shape Optimization Part 1: Theoretical Background*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series – Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design, Brussels, 2006.
6. Vassberg J., Jameson A. *Aerodynamic Shape Optimization Part 2: Sample Applications*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series – Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design, Brussels, 2006.
7. Zingg D.W., Nemec M., Pulliam T.Y. A Comparative Evaluation of Genetic and Gradient-Based Algorithms Applied to Aerodynamic Optimization // *European Journal of Computational Mechanics*. 2008. V. 17. P. 103–126. DOI: 10.3166/remn.17.103-126
8. Jameson A., Martinelli L., Vassberg J. Using Computational Fluid Dynamics for Aerodynamics – A Critical Assessment // *ICAS Paper*. 2002. № 1.10.1.
9. Epstein B., Peigin S. Robust Hybrid Approach to Multiobjective Constrained Optimization in Aerodynamics // *AIAA Journal*. 2004. V. 42. P. 1572–1581. DOI: 10.2514/1.35465
10. Epstein B., Peigin S. Computational Fluid Dynamics driven optimization of blended wing body aircraft // *AIAA Journal*. 2006. V. 44. P. 2736–2745. DOI: 10.2514/1.19757

References

1. Obayashi, S., Yamaguchi, Y. & Nakamura, T. (1997) Multiobjective Genetic Algorithm for Multidisciplinary Design of Transonic Wing Planform. *Journal of Aircraft*. 34. pp. 690–693. DOI: 10.2514/2.2231
2. Vicini, A. & Quagliarella, D. (1997) Inverse and Direct Airfoil Design Using a Multiobjective Genetic Algorithm. *AIAA Journal*. 35(9). pp. 1499–1505. DOI: 10.2514/2.274.
3. Mohammadi, B. & Pironneau, O. (2001) *Applied Shape Optimization for Fluids*. Oxford: Oxford University Press.
4. Nadarajah, S.K. & Jameson, A. (2001) Studies of the Continuous and Discrete Adjoint Approaches to Viscous Automatic Aerodynamic Shape Optimization. *AIAA Paper* 2001. № 2530.
5. Vassberg, J. & Jameson, A. (2006) *Aerodynamic Shape Optimization Part 1: Theoretical Background*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series - Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design. Brussels.
6. Vassberg, J. & Jameson, A. (2006) *Aerodynamic Shape Optimization Part 2: Sample Applications*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Lecture Series - Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design. Brussels.

7. Zingg, D.W., Nemec, M. & Pulliam, T.Y. (2008) A Comparative Evaluation of Genetic and Gradient-Based Algorithms Applied to Aerodynamic Optimization. *European Journal of Computational Mechanics*. 17. pp. 103–126. DOI: 10.3166/remn.17.103-126
8. Jameson, A., Martinelli, L. & Vassberg, J. (2002) Using Computational Fluid Dynamics for Aerodynamics - A Critical Assessment. *ICAS Paper - 2002*. № 1.10.1, Toronto.
9. Epstein, B. & Peigin, S. (2004) Robust Hybrid Approach to Multiobjective Constrained Optimization in Aerodynamics. *AIAA Journal*. 42. pp. 1572–1581. DOI: 10.2514/1.35465
10. Epstein, B. & Peigin, S. (2006) Computational Fluid Dynamics driven optimization of blended wing body aircraft. *AIAA Journal*. 44. pp. 2736–2745. DOI: 10.2514/1.19757

Информация об авторе:

Пейгин Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор ООО «ОПТАКОНТ» (Москва, Россия). E-mail: mishpahat_peiguine@yahoo.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Peigin Sergey V., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Officer, OPTACONT Ltd. (Moscow, Russian Federation). E-mail: mishpahat_peiguine@yahoo.com

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Научная статья
УДК 518.872
doi: 10.17223/7783494/2/5

Исследование математической модели беспроводной сети передачи данных в виде циклической системы случайного множественного доступа

Анатолий Андреевич Назаров¹, Ксения Сергеевна Шульгина², Радмир Ренатович Салимзянов³,
Светлана Владимировна Пауль⁴, Дмитрий Вадимович Шашев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ nazarov.tsu@gmail.com

² shulgina19991999@mail.ru

³ rsalimzyanov@yahoo.com

⁴ paulsv82@mail.ru

⁵ dshashev@mail.ru

Аннотация. Выполнено исследование математической модели беспроводной сети передачи данных в виде циклической системы с повторными вызовами, на вход которой поступают два стационарных пуассоновских потока заявок, продолжительности обслуживания которых имеют экспоненциальную функцию распределения. Применяя метод асимптотического анализа, найдено предельное стационарное распределение вероятностей числа заявок в исследуемой математической модели сети передачи данных.

Ключевые слова: беспроводная сеть, циклическая система с повторными вызовами, метод асимптотического анализа

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Назаров А.А., Шульгина К.С., Салимзянов Р.Р., Пауль С.В., Шашев Д.В. Исследование математической модели беспроводной сети передачи данных в виде циклической системы случайного множественного доступа // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 58–65. doi: 10.17223/7783494/2/5

Original article
doi: 10.17223/7783494/2/5

Mathematical Model of Wireless Network as a Cyclic Random Access Queueing System

Anatoly A. Nazarov¹, Ksenia S. Shulgina², Radmir R. Salimzyanov³,
Svetlana V. Paul⁴, Dmitry V. Shashev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ nazarov.tsu@gmail.com

² shulgina19991999@mail.ru

³ rsalimzyanov@yahoo.com

⁴ paulsv82@mail.ru

⁵ dshashev@mail.ru

Abstract. In this paper, we investigate mathematical model of wireless network in the form of cyclic queueing system with retrials, two input stationary Poisson processes and exponential distribution service times. Applying asymptotic analysis method, we obtain limiting stationary distribution of the number of customers in considered queueing model of data network.

Keywords: wireless network, cyclic retrial queue, asymptotic analysis method

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Nazarov, A.A., Shulgina, K.S., Salimzyanov, R.R., Paul, S.V. & Shashev, D.V. (2023) Mathematical Model of Wireless Network as a Cyclic Random Access Queueing System. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeiatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 58–65. doi: 10.17223/7783494/2/5 (In Russian).

Введение

Беспроводные сети передачи информации являются важным направлением современной телеком-

муникационной индустрии. Причиной этому, в первую очередь, являются глобальная автоматизация и роботизация различных областей науки и тех-

ники, развитие специализированных сетей обмена данными (например, VANET и FANET [1]) и т.д. Такие сети используются как в гражданской, так и в военной областях. Их применение позволяет получить широкий спектр услуг: мониторинг шума и света, загрязнений окружающей среды, движения транспортных средств и противоугонная защита, контроль по предотвращению обрушения старых зданий и мостов, экстренная медицинская услуга. В частности, сеть FANET (Flying Ad Hoc Networks) включает беспилотные летающие аппараты (БПЛА), используемые для удаленного получения изображений, мониторинга стихийных бедствий, видеотрансляции и др.

Повсеместное использование сетей FANET способствует появлению нескольких явных проблем с точки зрения терминов безопасности. С одной стороны, сети FANET имеют проблемы информационной безопасности (ИБ), что, в свою очередь, ставит под вопрос обеспечение доверительной беспроводной сети передачи данных, характеристики которой должны быть обеспечены при использовании таких сетей в городской инфраструктуре. С другой стороны: обеспечение должного уровня безопасности для окружающей среды при использовании таких сетей. Основной причиной возникновения таких проблем является динамическая природа этих сетей, высокая мобильность и, соответственно, быстрое изменение топологий, большие расстояния между БПЛА, нетерпеливые пользователи и частая непродолжительность связи.

Внедрение таких беспроводных технологий для решения различных задач жизнедеятельности способствует росту уровня значимости ИБ существующих информационных систем. С другой стороны, такое внедрение возможно только при разработке специальных механизмов обеспечения безопасности их работы и должного уровня ИБ, которые, в свою очередь, обусловлены особенностями и характеристиками беспроводных сетей.

Один из возможных подходов, позволяющих решить эту проблему, требует фундаментального и детального изучения систем передачи данных с применением аппарата математического моделирования, способного подтвердить границы применимости и функциональные характеристики.

Беспроводные широкополосные сети на сегодняшний день являются оперативными, мобильными, привлекательными по цене и по возможности реализуемых приложений. В основе беспроводных сетей лежит технология широкополосного или шумоподобного сигнала, которая предусматривает деление всей используемой широкой полосы на несколько подканалов, по которым закодированная информация передается либо параллельно по всем

подканалам сразу, либо по очереди, переключаясь от канала к каналу. Во втором случае отводится время для подключения к каналу, в течение которого будет передаваться информация. Проблема разделения общего ресурса связи сети решается выбором протокола множественного доступа абонентов сети к общему ресурсу. Для эффективного разделения общего ресурса связи могут быть использованы циклические протоколы либо протоколы множественного, в том числе случайного доступа. Проблема выбора класса протоколов эффективного доступа в данном исследовании решается методами математического моделирования и математически корректным исследованием предложенных моделей. Адекватными математическими моделями протоколов случайного доступа являются RQ-системы (Retrial Queueing System), а для циклических протоколов – системы поллинга. Те и другие являются математическими моделями систем массового обслуживания.

В данной работе рассматривается циклическая система с повторными вызовами [2–4], в которой цикл является суммой интервалов доступа к общему ресурсу каждого из абонентов сети [5–8]. Особенностью предлагаемой модели является то, что продолжительности таких интервалов случайные (в частности, детерминированные) и не зависимые не только между собой, но и от входящих потоков заявок и продолжительностей их обслуживания [9–10]. На вход предлагаемой циклической системы поступают два простейших потока заявок, интервалы подключения прибора к RQ-системам (входящий поток и соответствующая ему орбита) имеют экспоненциальную функцию распределения. Для исследования используется метод асимптотического анализа [9–10] в предельном условии большой задержки заявок на орбитах. Ставится задача определения вероятностных характеристик такой циклической сети связи множественного доступа.

Математическая модель и постановка задачи

Рассмотрим циклическую систему с повторными вызовами (рис. 1), на вход которой поступают два простейших потока событий с интенсивностями λ_1 и λ_2 соответственно. Заявки каждого потока формируют свою орбиту неограниченного объема.

Будем называть пару n -го потока и соответствующую ему орбиту « n -й RQ-системой», $n = 1, 2$. Прибор посещает RQ-системы в циклическом порядке, начиная с первой и заканчивая второй, потом цикл повторяется. Время нахождения прибора у n -й RQ-системы с повторными вызовами имеет экспоненциальную функцию распределения с параметром α_n , $n = 1, 2$. В течение этого времени прибор обслуживает заявки, которые поступают из n -го входяще-

го потока и с орбиты. Время обслуживания заявок имеет экспоненциальную функцию распределения с параметрами μ_n , $n = 1, 2$. Если поступившая заявка входящего потока обнаруживает прибор занятым или неподключенным, она мгновенно уходит на соответствующую орбиту, где осуществляет случай-

ную задержку в течение экспоненциального времени с параметром σ_n , $n = 1, 2$, после которой вновь обращается к прибору. Будем рассматривать циклическую RQ-систему, когда после истечения времени подключения к n -й RQ-системе заявка уходит на соответствующую орбиту.

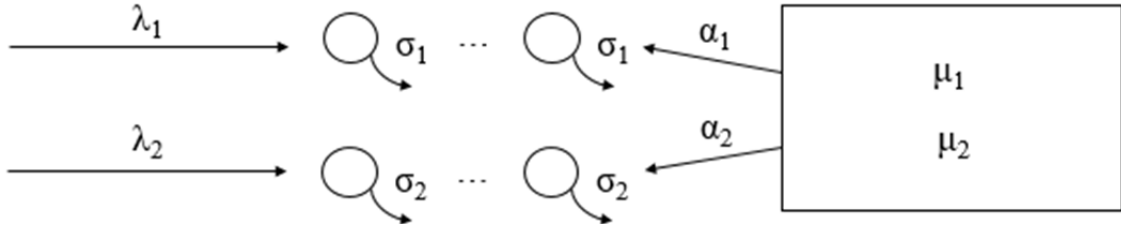


Рис. 1. Циклическая система с повторными вызовами
Fig. 1. Cyclic retrial queue

Обозначим процесс $k(t)$ – состояние прибора в момент времени t . Этот процесс может принимать следующие значения: 0 – прибор подключен к первой RQ-системе и свободен; 1 – прибор подключен к первой RQ-системе и занят; 2 – прибор подключен ко второй RQ-системе и свободен; 3 – прибор подключен ко второй RQ-системе и занят. Также введем случайные процессы: $i_1(t)$ – число заявок на первой орбите в момент времени t ; $i_2(t)$ – число заявок на второй орбите в момент времени t .

Ставится задача нахождения стационарного распределения вероятностей числа заявок на первой и второй орбитах и состояний прибора. Для этого рассмотрим трехмерный марковский процесс $\{k(t), i_1(t), i_2(t)\}$. Для распределения вероятностей

$$P\{k(t) = k, i_1(t) = i_1, i_2(t) = i_2\} = P_k(i_1, i_2, t)$$

составим систему Колмогорова и запишем ее в стационарном режиме

$$\begin{aligned} &-(\lambda_1 + \lambda_2 + i_1\sigma_1 + \alpha_1)P_0(i_1, i_2) + \lambda_2 P_0(i_1, i_2 - 1) + \\ &+ \mu_1 P_1(i_1, i_2) + \alpha_2 P_2(i_1, i_2) + \alpha_2 P_3(i_1, i_2 - 1) = 0, \\ &-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \alpha_1)P_1(i_1, i_2) + \lambda_1 P_0(i_1, i_2) + \\ &+ \sigma_1(i_1 + 1)P_0(i_1 + 1, i_2) + \lambda_1 P_1(i_1 - 1, i_2) + \lambda_2 P_1(i_1, i_2 - 1) = 0, \\ &-(\lambda_1 + \lambda_2 + i_2\sigma_2 + \alpha_2)P_2(i_1, i_2) + \lambda_1 P_2(i_1 - 1, i_2) + \\ &+ \mu_2 P_3(i_1, i_2) + \alpha_1 P_0(i_1, i_2) + \alpha_1 P_1(i_1 - 1, i_2) = 0, \\ &-(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \alpha_2)P_3(i_1, i_2) + \lambda_2 P_2(i_1, i_2) + \\ &+ \sigma_2(i_2 + 1)P_2(i_1, i_2 + 1) + \lambda_2 P_3(i_1, i_2 - 1) + \lambda_1 P_3(i_1 - 1, i_2) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Перейдем к частичным характеристическим функциям

$$H_k(u_1, u_2) = \sum_{i_1=0}^{\infty} \sum_{i_2=0}^{\infty} e^{ju_1 i_1} e^{ju_2 i_2} P_k(i_1, i_2), \quad k = \overline{0, 3},$$

обозначив $j = \sqrt{-1}$. Систему для частичных характеристических функций запишем в матричной форме, обозначив векторы

$$\mathbf{H}(u_1, u_2) = \{H_0(u_1, u_2), H_1(u_1, u_2), H_2(u_1, u_2), H_3(u_1, u_2)\},$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_1} = \left\{ \frac{\partial H_0(u_1, u_2)}{\partial u_1}, \frac{\partial H_1(u_1, u_2)}{\partial u_1}, \frac{\partial H_2(u_1, u_2)}{\partial u_1}, \frac{\partial H_3(u_1, u_2)}{\partial u_1} \right\},$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_2} = \left\{ \frac{\partial H_0(u_1, u_2)}{\partial u_2}, \frac{\partial H_1(u_1, u_2)}{\partial u_2}, \frac{\partial H_2(u_1, u_2)}{\partial u_2}, \frac{\partial H_3(u_1, u_2)}{\partial u_2} \right\}$$

и матрицы

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_1) & \lambda_1 & \alpha_1 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \alpha_1) & 0 & 0 \\ \alpha_2 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_2) & \lambda_2 \\ 0 & 0 & \mu_2 & -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2 + \alpha_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2 & 0 & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Получим систему, в которой скалярное уравнение получено путем умножения матричного уравнения на вектор единичного столбца $\mathbf{e}$.

$$\begin{aligned} &\mathbf{H}(u_1, u_2) \{ \mathbf{A} + e^{ju_1} \mathbf{B} + e^{ju_2} \mathbf{C} \} + \\ &+ j\sigma_1 \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_1} \{ \mathbf{I}_0 - e^{-ju_1} \mathbf{I}_1 \} + j\sigma_2 \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_2} \{ \mathbf{I}_2 - e^{-ju_2} \mathbf{I}_3 \} = 0. \\ &(e^{ju_1} - 1) \left\{ \mathbf{H}(u_1, u_2) \mathbf{B} + j\sigma_1 e^{-ju_1} \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_1} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ &+ (e^{ju_2} - 1) \left\{ \mathbf{H}(u_1, u_2) \mathbf{C} + j\sigma_2 e^{-ju_2} \frac{\partial \mathbf{H}(u_1, u_2)}{\partial u_2} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (2) является основой для дальнейших исследований. Мы решим ее методом асимптотического анализа в предельном условии согласованно большой задержки заявок на орбитах $\sigma_1 \rightarrow 0$ и $\sigma_2 \rightarrow 0$.

В системе уравнений (2) обозначим $\sigma_1 = \gamma_1 \sigma$, $\sigma_2 = \gamma_2 \sigma$, $\sigma = \varepsilon$ и введем следующие замены:

$$u_1 = w_1 \varepsilon, \quad u_2 = w_2 \varepsilon, \quad \mathbf{H}(u_1, u_2) = \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon).$$

Получим систему

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon) \{ \mathbf{A} + e^{j\varepsilon w_1} \mathbf{B} + e^{j\varepsilon w_2} \mathbf{C} \} + j\gamma_1 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_1} \{ \mathbf{I}_0 - e^{-j\varepsilon w_1} \mathbf{I}_1 \} + \\ + j\gamma_2 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_2} \{ \mathbf{I}_2 - e^{-j\varepsilon w_2} \mathbf{I}_3 \} = 0. \\ (e^{j\varepsilon w_1} - 1) \left\{ \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon) \mathbf{B} + j\gamma_1 e^{-j\varepsilon w_1} \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_1} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + (e^{j\varepsilon w_2} - 1) \left\{ \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon) \mathbf{C} + j\gamma_2 e^{-j\varepsilon w_2} \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_2} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \quad (3) \end{aligned}$$

С помощью метода асимптотического анализа будет получена предельная характеристическая функция числа заявок на орбитах в условии согласованно большой задержки заявок на орбитах. Будет построена аппроксимация распределения вероятностей числа заявок на орбитах с использованием полученных асимптотических характеристик.

Асимптотический анализ первого порядка

Теорема 1. Пусть $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – число заявок на первой и второй орбитах соответственно, тогда выполняется следующее предельное равенство:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} M \exp \{ jw_1 \gamma_1 \sigma i_1(t) + jw_2 \gamma_2 \sigma i_2(t) \} = \exp \{ jw_1 a_1 + jw_2 a_2 \},$$

где a_1 и a_2 являются корнями матричных уравнений

$$\mathbf{r} \{ \mathbf{B} - \gamma_1 a_1 \mathbf{I}_1 \} \mathbf{e} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{r} \{ \mathbf{C} - \gamma_2 a_2 \mathbf{I}_3 \} \mathbf{e} = 0, \quad (5)$$

вектор вероятностей состояний прибора $\mathbf{r}$ является корнем уравнения

$$\mathbf{r} \{ \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \} - \gamma_1 a_1 \mathbf{r} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} - \gamma_2 a_2 \mathbf{r} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} = 0. \quad (6)$$

Здесь γ_1 , γ_2 , w_1 и w_2 являются параметрами метода асимптотического анализа.

Доказательство. В системе (3) устремим $\varepsilon \rightarrow 0$, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(w_1, w_2) \{ \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \} + j\gamma_1 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2)}{\partial w_1} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} + \\ + j\gamma_2 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2)}{\partial w_2} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} = 0. \\ jw_1 \left\{ \mathbf{F}(w_1, w_2) \mathbf{B} + j\gamma_1 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2)}{\partial w_1} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + jw_2 \left\{ \mathbf{F}(w_1, w_2) \mathbf{C} + j\gamma_2 \frac{\partial \mathbf{F}(w_1, w_2)}{\partial w_2} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \quad (7) \end{aligned}$$

Решение системы (7) будем искать в виде

$$\mathbf{F}(w_1, w_2) = \mathbf{r} \Phi(w_1, w_2),$$

где $\mathbf{r}$ – вектор стационарных распределений состояний прибора. Получим

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \{ \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \} + j\gamma_1 \mathbf{r} \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi(w_1, w_2)} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} + \\ + j\gamma_2 \mathbf{r} \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi(w_1, w_2)} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} = 0, \\ jw_1 \left\{ \mathbf{r} \mathbf{B} + j\gamma_1 \mathbf{r} \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi(w_1, w_2)} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + jw_2 \left\{ \mathbf{r} \mathbf{C} + j\gamma_2 \mathbf{r} \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi(w_1, w_2)} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \quad (8) \end{aligned}$$

Так как отношения $j \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi(w_1, w_2)}$ и

$j \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi(w_1, w_2)}$ не зависят от w_1 и w_2 , то функция

$\Phi(w_1, w_2)$ имеет вид

$$\Phi(w_1, w_2) = \exp \{ jw_1 a_1 + jw_2 a_2 \}.$$

Тогда $j \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi(w_1, w_2)} = -a_1$, $j \frac{\partial \Phi(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi(w_1, w_2)} = -a_2$.

Вектор стационарного распределения вероятностей $\mathbf{r}$ состояния прибора удовлетворяет условию нормировки, тогда систему уравнений (8) перепишем в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{r} \{ \mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} \} - \gamma_1 a_1 \mathbf{r} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} - \gamma_2 a_2 \mathbf{r} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} = 0, \\ \mathbf{r} \{ \mathbf{B} - \gamma_1 a_1 \mathbf{I}_1 \} \mathbf{e} = 0, \\ \mathbf{r} \{ \mathbf{C} - \gamma_2 a_2 \mathbf{I}_3 \} \mathbf{e} = 0, \\ \mathbf{r} \mathbf{e} = 1. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Таким образом, получили системы уравнений, численное решение которых позволит нам найти величины a_1 и a_2 – асимптотические средние числа заявок на первой и второй орбитах соответственно и $\mathbf{r}$ – вектор вероятностей состояний прибора. Реализация метода асимптотического анализа на первом этапе или доказанная теорема 1 позволяют найти только средние предельные значения числа заявок на орбитах. Для более детального исследования процессов $i_1(t)$ и $i_2(t)$ рассмотрим асимптотику второго порядка.

Асимптотический анализ второго порядка

Теорема 2. В контексте теоремы 1 верно следующее предельное равенство:

$$\begin{aligned} \lim_{\substack{\sigma_1 \rightarrow 0 \\ \sigma_2 \rightarrow 0}} M \exp \left\{ jw_1 \sqrt{\sigma_1} \left(i_1(t) - \frac{a_1}{\sigma_1} \right) + jw_2 \sqrt{\sigma_2} \left(i_2(t) - \frac{a_2}{\sigma_2} \right) \right\} = \\ = \exp \left\{ \frac{jw_1^2}{2} K_{11} + \frac{jw_2^2}{2} K_{22} + jw_1 \cdot jw_2 \cdot K_{12} \right\}, \end{aligned}$$

где K_{11} , K_{12} , K_{22} – корреляционные моменты, которые определяются равенствами

$$\begin{aligned} K_{11} &= \frac{((\mathbf{g}_{11} + \mathbf{g}_{12} - \mathbf{z}_1)(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + a_1\gamma_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1)\mathbf{e}}{(\gamma_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1)\mathbf{e}}, \\ K_{12} &= \frac{((\mathbf{g}_{21} + \mathbf{g}_{22} - \mathbf{z}_2)(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + (\mathbf{g}_{11} + \mathbf{g}_{12} - \mathbf{z}_1)(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3))\mathbf{e}}{(\mathbf{r}(\gamma_1\mathbf{I}_1 + \gamma_2\mathbf{I}_3))\mathbf{e}}, \\ K_{22} &= \frac{((\mathbf{g}_{21} + \mathbf{g}_{22} - \mathbf{z}_2)(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + a_2\gamma_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3)\mathbf{e}}{(\gamma_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3)\mathbf{e}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь вектор вероятностей состояний прибора $\mathbf{r}$ является решением уравнения (6), а векторы $\mathbf{g}_{11}$, $\mathbf{g}_{12}$, $\mathbf{g}_{21}$, $\mathbf{g}_{22}$, $\mathbf{z}_1$, $\mathbf{z}_2$ являются решениями неоднородных систем уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{11}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \gamma_1\mathbf{r}\{\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1\}, \\ \mathbf{g}_{12}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \gamma_2\mathbf{r}\{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3\}, \\ \mathbf{z}_1(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \mathbf{r}(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1), \\ \mathbf{g}_{11}\mathbf{e} &= 0, \mathbf{g}_{12}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_1\mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{21}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \gamma_1\mathbf{r}\{\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1\}, \\ \mathbf{g}_{22}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \gamma_2\mathbf{r}\{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3\}, \\ \mathbf{z}_2(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \mathbf{r}(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3), \\ \mathbf{g}_{21}\mathbf{e} &= 0, \mathbf{g}_{22}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_2\mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Доказательство. В системе уравнений (2) сделаем замены

$$\mathbf{H}(u_1, u_2) = \exp\left(ju_1 \frac{a_1}{\sigma_1} + ju_2 \frac{a_2}{\sigma_2}\right) \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2),$$

получим систему

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2) \{ \mathbf{A} + e^{ju_1}\mathbf{B} + e^{ju_2}\mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - e^{-ju_1}\mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - e^{-ju_2}\mathbf{I}_3) \} + \\ + j\sigma_1 \frac{\partial \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2)}{\partial u_1} \{ \mathbf{I}_0 - e^{-ju_1}\mathbf{I}_1 \} + j\sigma_2 \frac{\partial \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2)}{\partial u_2} \{ \mathbf{I}_2 - e^{-ju_2}\mathbf{I}_3 \} = 0, \\ (e^{ju_1} - 1) \left\{ \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2) (\mathbf{B} - e^{-ju_1} a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + j\sigma_1 e^{-ju_1} \frac{\partial \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2)}{\partial u_1} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + (e^{ju_2} - 1) \left\{ \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2) (\mathbf{C} - e^{-ju_2} a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + j\sigma_2 e^{-ju_2} \frac{\partial \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2)}{\partial u_2} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

В системе (12) сделаем замены

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma_1\sigma, \quad \sigma_2 = \gamma_2\sigma, \quad \sigma = \varepsilon^2, \quad u_1 = w_1\varepsilon, \quad u_2 = w_2\varepsilon, \\ \mathbf{H}^{(2)}(u_1, u_2) &= \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon), \end{aligned}$$

тогда получим систему

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon) \{ \mathbf{A} + e^{j\varepsilon w_1}\mathbf{B} + e^{j\varepsilon w_2}\mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - e^{-j\varepsilon w_1}\mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - e^{-j\varepsilon w_2}\mathbf{I}_3) \} + \\ + j\varepsilon\gamma_1 \frac{\partial \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_1} \{ \mathbf{I}_0 - e^{-j\varepsilon w_1}\mathbf{I}_1 \} + \\ + j\varepsilon\gamma_2 \frac{\partial \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_2} \{ \mathbf{I}_2 - e^{-j\varepsilon w_2}\mathbf{I}_3 \} = 0, \\ (e^{j\varepsilon w_1} - 1) \left\{ \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon) (\mathbf{B} - e^{-j\varepsilon w_1} a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + j\varepsilon\gamma_1 e^{-j\varepsilon w_1} \frac{\partial \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_1} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + (e^{j\varepsilon w_2} - 1) \left\{ \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon) (\mathbf{C} - e^{-j\varepsilon w_2} a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + j\varepsilon\gamma_2 e^{-j\varepsilon w_2} \frac{\partial \mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon)}{\partial w_2} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Будем искать решение полученной системы уравнений (13) в виде

$$\mathbf{F}^{(2)}(w_1, w_2, \varepsilon) = \Phi_2(w_1, w_2) \{ \mathbf{r} + j\varepsilon w_1\mathbf{f}_1 + j\varepsilon w_2\mathbf{f}_2 \} + O(\varepsilon^2).$$

Подставим решение в (13), разложим экспоненты в ряд Тейлора, разделим уравнения системы на $j\varepsilon\Phi_2(w_1, w_2)$ и перейдем к пределу при $\varepsilon \rightarrow 0$.

$$\begin{aligned} w_1 \{ \mathbf{f}_1 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) + \mathbf{r}(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) \} + \\ + w_2 \{ \mathbf{f}_2 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) + \mathbf{r}(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) \} + \\ + \gamma_1\mathbf{r} \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi_2(w_1, w_2)} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} + \gamma_2\mathbf{r} \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi_2(w_1, w_2)} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} = 0, \\ w_1 \left\{ (w_1\mathbf{f}_1 + w_2\mathbf{f}_2)(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + a_1\gamma_1 w_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1 + \gamma_1\mathbf{r} \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi_2(w_1, w_2)} \mathbf{I}_1 \right\} \mathbf{e} + \\ + w_2 \left\{ (w_1\mathbf{f}_1 + w_2\mathbf{f}_2)(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + a_2\gamma_2 w_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3 + \gamma_2\mathbf{r} \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi_2(w_1, w_2)} \mathbf{I}_3 \right\} \mathbf{e} = 0. \end{aligned}$$

Заметим, что скалярная функция $\Phi_2(w_1, w_2)$ определяется в виде

$$\begin{aligned} \Phi_2(w_1, w_2) &= \exp \left\{ \frac{(jw_1)^2}{2} K_{11} + \frac{(jw_2)^2}{2} K_{22} + jw_1 \cdot jw_2 \cdot K_{12} \right\}, \\ \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_1}{\Phi_2(w_1, w_2)} &= -(w_1 K_{11} + w_2 K_{12}), \\ \frac{\partial \Phi_2(w_1, w_2) / \partial w_2}{\Phi_2(w_1, w_2)} &= -(w_2 K_{22} + w_1 K_{12}). \end{aligned}$$

Имеем

$$\begin{aligned} w_1 \{ \mathbf{f}_1 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) + \\ + \mathbf{r}(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) - \gamma_1\mathbf{r}K_{11} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} - \\ - \gamma_2\mathbf{r}K_{12} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} \} + w_2 \{ \mathbf{f}_2 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) + \\ + \mathbf{r}(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) - \gamma_2\mathbf{r}K_{22} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} - \gamma_1\mathbf{r}K_{12} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} \} = 0, \\ w_1^2 \{ \mathbf{f}_1 (\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + a_1\gamma_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1 - \gamma_1\mathbf{r}K_{11}\mathbf{I}_1 \} \mathbf{e} + \\ + w_2^2 \{ \mathbf{f}_2 (\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + a_2\gamma_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3 - \gamma_2\mathbf{r}K_{22}\mathbf{I}_3 \} \mathbf{e} + \\ + w_1 w_2 \{ \mathbf{f}_2 (\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + \mathbf{f}_1 (\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) - \mathbf{r}K_{12}(\gamma_1\mathbf{I}_1 + \gamma_2\mathbf{I}_3) \} \mathbf{e} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотрим отдельно уравнения системы (14):

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \\ = -\mathbf{r}(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + \gamma_1\mathbf{r}K_{11} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \} + \gamma_2\mathbf{r}K_{12} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \}, \\ \mathbf{f}_2 (\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) &= \\ = -\mathbf{r}(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + \gamma_2\mathbf{r}K_{22} \{ \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3 \} + \gamma_1\mathbf{r}K_{12} \{ \mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1 \}. \end{aligned} \quad (15)$$

Система (15) – неоднородная система линейных алгебраических уравнений для $\mathbf{f}_1$ и $\mathbf{f}_2$. Решение системы (15) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_1 &= \mathbf{C}\mathbf{r} + K_{11}\mathbf{g}_{11} + K_{12}\mathbf{g}_{12} - \mathbf{z}_1, \\ \mathbf{f}_2 &= \mathbf{C}\mathbf{r} + K_{12}\mathbf{g}_{21} + K_{22}\mathbf{g}_{22} - \mathbf{z}_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\mathbf{C}$ – константа, вероятности $\mathbf{r}$ определены выше, а векторы $\mathbf{g}_{11}$, $\mathbf{g}_{12}$, $\mathbf{g}_{21}$, $\mathbf{g}_{22}$, $\mathbf{z}_1$, $\mathbf{z}_2$ являются частными решениями неоднородной системы (15), удовлетворяющими условиям

$$\mathbf{g}_{11}\mathbf{e} = 0, \mathbf{g}_{12}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_1\mathbf{e} = 0, \mathbf{g}_{21}\mathbf{e} = 0, \mathbf{g}_{22}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_2\mathbf{e} = 0.$$

Получим системы для нахождения частных решений неоднородной системы (15):

$$\mathbf{g}_{11}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \gamma_1\mathbf{r}\{\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1\},$$

$$\mathbf{g}_{12}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \gamma_2\mathbf{r}\{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3\},$$

$$\mathbf{z}_1(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \mathbf{r}(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1),$$

$$\mathbf{g}_{11}\mathbf{e} = 0, \mathbf{g}_{12}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_1\mathbf{e} = 0.$$

$$\mathbf{g}_{21}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \gamma_1\mathbf{r}\{\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1\},$$

$$\mathbf{g}_{22}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \gamma_2\mathbf{r}\{\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3\},$$

$$\mathbf{z}_2(\mathbf{A} + \mathbf{B} + \mathbf{C} - a_1\gamma_1(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1) - a_2\gamma_2(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_3)) = \mathbf{r}(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3),$$

$$\mathbf{g}_{21}\mathbf{e} = 0, \mathbf{g}_{22}\mathbf{e} = 0, \mathbf{z}_2\mathbf{e} = 0.$$

Решив последнюю систему, получим векторы $\mathbf{g}_{11}$, $\mathbf{g}_{12}$, $\mathbf{g}_{21}$, $\mathbf{g}_{22}$, $\mathbf{z}_1$, $\mathbf{z}_2$, подставив которые в выражения для $\mathbf{f}_1$ и $\mathbf{f}_2$, а затем в уравнение для нахождения величин K_{11} , K_{22} и K_{12} :

$$K_{11} = \frac{((\mathbf{g}_{11} + \mathbf{g}_{12} - \mathbf{z}_1)(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + a_1\gamma_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1)\mathbf{e}}{(\gamma_1\mathbf{r}\mathbf{I}_1)\mathbf{e}},$$

$$K_{12} = \frac{((\mathbf{g}_{21} + \mathbf{g}_{22} - \mathbf{z}_2)(\mathbf{B} - a_1\gamma_1\mathbf{I}_1) + (\mathbf{g}_{11} + \mathbf{g}_{12} - \mathbf{z}_1)(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3))\mathbf{e}}{(\mathbf{r}(\gamma_1\mathbf{I}_1 + \gamma_2\mathbf{I}_3))\mathbf{e}},$$

$$K_{22} = \frac{((\mathbf{g}_{21} + \mathbf{g}_{22} - \mathbf{z}_2)(\mathbf{C} - a_2\gamma_2\mathbf{I}_3) + a_2\gamma_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3)\mathbf{e}}{(\gamma_2\mathbf{r}\mathbf{I}_3)\mathbf{e}}.$$

Теорема доказана.

Найденная асимптотика второго порядка показывает, что асимптотическое распределение вероятностей числа $i_1(t)$ и $i_2(t)$ заявок на первой и второй орбитах в рассматриваемой циклической системе является нормальным распределением с асимптотическими средними: a_1/σ_1 , a_2/σ_2 , дисперсиями: K_{11}/σ_1 , K_{22}/σ_2 и коэффициентом корреляции числа заявок на первой и второй орбитах $K_{12}/\gamma_1\gamma_2\sigma$.

Численный анализ

Для построения плотности распределения вероятностей двумерного нормального распределения числа заявок на первой и второй орбитах была использована система математических вычислений Mathcad. Задав необходимые начальные параметры: $\lambda_1 = 0.2$, $\lambda_2 = 0.4$, $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = 2$, $\alpha_1 = 0.7$, $\alpha_2 = 0.6$, $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 2$, $\sigma = 0.01$, $\sigma_1 = \gamma_1\sigma$, $\sigma_2 = \gamma_2\sigma$, построим плотность распределения вероятностей двумерного нормального распределения числа заявок на первой и второй орбитах

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot$$

$$\exp\left\{\frac{-1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left(\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x_1 - \mu_1)(x_2 - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right\},$$

$$\text{где } \mu_1 = a_1/\sigma_1, \mu_2 = a_2/\sigma_2, \sigma_1 = \sqrt{\frac{K_{11}}{\sigma_1}}, \sigma_2 = \sqrt{\frac{K_{22}}{\sigma_2}},$$

$$\rho = \frac{K_{12}}{\gamma_1\gamma_2\sigma}, \text{ а коэффициенты } a_1, a_2, K_{11}, K_{12}, K_{22} \text{ были}$$

найжены с помощью первой и второй асимптотики в теоремах 1 и 2. Построим график плотности двумерного нормального распределения числа заявок на первой и второй орбитах (рис. 2).

Для определения точности полученных предельных результатов сравним их с эмпирическим распределением, полученным в результате работы имитационной модели. Точность асимптотических результатов будем оценивать с помощью расстояния Колмогорова между аналитическим и эмпирическим распределениями. В таблице приведены значения этих расстояний для различных параметров σ для первой (Δ_1) и второй (Δ_2) орбит.

Расстояние Колмогорова Δ_1 и Δ_2

Δ	$\sigma = 1$	$\sigma = 0.1$	$\sigma = 0.01$	$\sigma = 0.001$
Δ_1	0.0701	0.0129	0.0029	0.0011
Δ_2	0.1533	0.0194	0.0027	0.0006

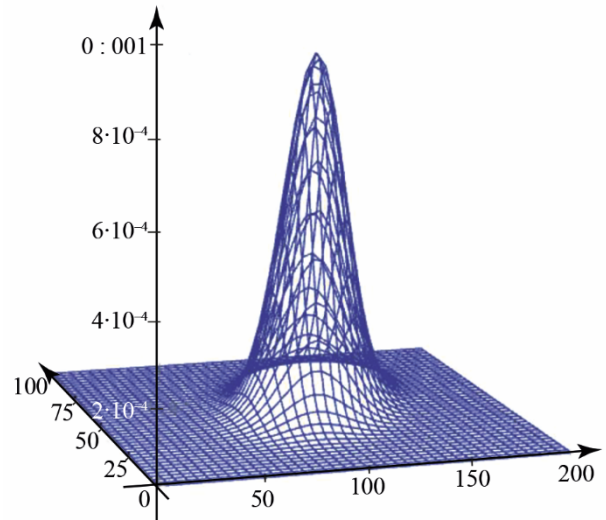


Рис. 2. График плотности $f(x_1, x_2)$ асимптотического двумерного нормального распределения числа заявок на первой и второй орбитах

Fig. 2. Graph of the increase $f(x_1, x_2)$ of the asymptotic two-dimensional normal distribution of the number of applications for the first and second orbits

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что точность аппроксимации растет с уменьшением параметра σ . Полу жирным в таблице выделены те значения, при которых будем считать точность

аппроксимаций удовлетворительной. Из полученных значений можно сделать вывод, что аппроксимация, полученная с помощью асимптотического анализа, дает хорошие результаты при низкой интенсивности повторного обслуживания ($\sigma \leq 0.1$).

Заключение

Таким образом, найденная асимптотика первого и второго порядка показывает, что асимптотическое распределение вероятностей числа $i_1(t)$ и $i_2(t)$ заявок на первой и второй орбитах в рассматриваемой циклической системе является нормальным распределе-

нием с асимптотическими средними: a_1/σ_1 , a_2/σ_2 , дисперсиями: K_{11}/σ_1 , K_{22}/σ_2 и коэффициентом корреляции числа заявок на первой и второй орбитах $K_{12}/\gamma_1\gamma_2\sigma$.

Отметим также, что в исследовании осуществлены первые шаги по описанию сетей FANET в терминах теории массового обслуживания, что в дальнейшем позволит построить наиболее адекватные математические модели таких сетей и определять их ключевые характеристики с точки зрения архитектуры и передачи данных.

Список источников

1. Pasandideh F., J.P.J. da Costa, Kunst R. et al. A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(18). Art. 4459. P. 1–25. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Вишневецкий В.М., Семёнова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007. 312 с.
3. Вишневецкий В.М., Семёнова О.В. Математические методы исследования систем поллинга // *Автоматика и телемеханика*. 2006. № 2. С. 3–56.
4. Nazarov A., Paul S. A Cyclic Queueing System with Priority Customers and T-Strategy of Service // *CCIS*. 2016. V. 678. P. 182–193. DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_17
5. Artalejo J.R., Gómez-Corral A. Retrial queueing systems: A computational approach. Berlin : Springer, 2008. 267 p.
6. Falin G.I., Templeton J.G.C. Retrial Queues. London : Chapman and Hall, 1997. 328 p.
7. Alfa A.S., Isotupa K.P.S. An M/PH/k retrial queue with finite number of sources // *Computers and Operations Research*. 2004. V. 31(9). P. 1455–1464. DOI: 10.1016/S0305-0548(03)00100-X
8. Artalejo J.R. Algorithmic Methods in Retrial Queues. Dordrecht : Springer. Series Annals of operations research, 2006. V. 141.
9. Nazarov A., Paul S., Gudkova I. Asymptotic analysis of markovian retrial queue with two-way communication under low rate of retrial condition // *31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS-2017) : proceedings*. Budapest, Hungary, May 23–26, 2017. Sbr.-Dudweiler, 2017. P. 687–693.
10. Nazarov A., Phung-Duc T., Paul S. Heavy outgoing call asymptotics for MMPP/M/1/1 retrial queue with two-way communication // *Communications in Computer and Information Science*. 2017. V. 800: 16th International Conference on Information Technologies and Mathematical Modelling (ITMM-2017). Kazan, 2017. P. 28–41.

References

1. Pasandideh, F., da Costa, J.P.J., Kunst, R. & etc. (2022) A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies. *Remote Sensing*. 14 (18). Art. 4459. pp. 1–25. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Vishnevsky, V.M. & Semyonova, O.V. (2007) *Polling systems: theory and application in broadband wireless networks*. Moscow : Technosfera.
3. Vishnevsky, V.M. & Semyonova, O.V. (2006) Mathematical methods for studying polling systems. *Automation and Remote Control*. 2. pp. 3–56.
4. Nazarov, A. & Paul, S. (2016) A Cyclic Queueing System with Priority Customers and T-Strategy of Service. *CCIS*. 678. pp. 182–193. DOI: 10.1007/978-3-319-51917-3_17
5. Artalejo, J.R. & Gómez-Corral, A. (2008) *Retrial queueing systems: A computational approach*. Berlin : Springer.
6. Falin, G.I. & Templeton, J.G.C. (1997) *Retrial Queues*. London : Chapman and Hall.
7. Alfa, A.S. & Isotupa, K.P.S. (2004) An M/PH/k retrial queue with finite number of sources. *Computers and Operations Research*. 31 (9). pp. 1455–1464. DOI: 10.1016/S0305-0548(03)00100-X
8. Artalejo, J.R. (2006) Algorithmic Methods in Retrial Queues. In: *Annals of operations research*. Vol. 141. Dordrecht : Springer.
9. Nazarov, A., Paul, S. & Gudkova, I. (2017) Asymptotic analysis of markovian retrial queue with two-way communication under low rate of retrial condition. In: *31st European Conference on Modelling and Simulation (ECMS-2017) : proceedings*. Budapest, Hungary, May 23–26, 2017. Sbr.-Dudweiler. pp. 687–693.
10. Nazarov, A., Phung-Duc, T. & Paul, S. (2017) Heavy outgoing call asymptotics for MMPP/M/1/1 retrial queue with two-way communication. *Communications in Computer and Information Science*. 800. pp. 28–41.

Информация об авторах:

Назаров Анатолий Андреевич – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nazarov.tsu@gmail.com

Шульгина Ксения Сергеевна – магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shulgina19991999@mail.ru

Салимзянов Радмир Ренатович – магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: rsalimzyanov@yahoo.com

Пауль Светлана Владимировна – доктор физико-математических наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: paulsv82@mail.ru

Шашев Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dshashev@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Nazarov Anatoly A., Dr.Sc. (Engineering), Professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nazarov.tsu@gmail.com

Shulgina Ksenia S., master degree student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shulgina19991999@mail.ru

Salimzyanov Radmir R., master degree student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: rsalimzyanov@yahoo.com

Paul Svetlana V., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: paulsv82@mail.ru

Shashev Dmitry V., Cand.Sc. (Engineering), Associate Professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dshashev@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Информационные сообщения

Информационное сообщение
УДК 629.73(470+571):339.986
doi: 10.17223/7783494/2/6

О перспективах беспилотной авиации в Томской области

Сергей Николаевич Хурсевич¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, khsn@list.ru*

Аннотация. Описаны тенденции и региональные особенности развития беспилотной авиации в Томской области. Представлены варианты инновационных решений, которые обеспечат развитие беспилотных технологий.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, беспилотник, авиационные перевозки, внешние пилоты, коммерческие пилоты, пилотируемая и беспилотная авиация

Для цитирования: Хурсевич С.Н. О перспективах беспилотной авиации в Томской области // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 66–67. doi: 10.17223/7783494/2/6

Information report
doi: 10.17223/7783494/2/6

Prospects of unmanned aircraft systems in the Tomsk Region

Sergey N. Khursevich¹

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, khsn@list.ru*

Abstract. Trends, regional peculiarities of unmanned aviation development in the Tomsk region are considered in the article. Variants of innovative solutions that will ensure the development of unmanned technologies are presented.

Keywords: Unmanned Aviation Systems, unmanned aerial vehicle, aviation operations, external pilot, commercial drone pilot, manned and unmanned aircraft

For citation: Khursevich, S.N. (2023) Prospects of unmanned aircraft systems in the Tomsk Region. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 66–67. doi: 10.17223/7783494/2/6 (In Russian).

В 2022 г. Томская область стала первым регионом в России, где был введён экспериментальный правовой режим по эксплуатации беспилотников (Постановление Правительства РФ «Об установлении экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций и утверждении Программы экспериментального правового режима в сфере цифровых инноваций по эксплуатации беспилотных авиационных систем в Томской области» от 24 марта 2022 г. № 458).

Помимо возможности использования опыта, накопленного в рамках развития экспериментального правового режима, для анонсированного Президентом России Национального проекта по развитию беспилотных авиационных систем существенное значение имеют следующие региональные особенности:

Во-первых, спектр платёжеспособного спроса на авиационные перевозки и авиаработы в Томской области является одним из самых широких в

стране и охватывает задачи от мониторинга лесных пожаров и наземной инфраструктуры ТЭК до ведения авиасельхозработ и доставки грузов в районы, приравненные к районам Крайнего Севера, что позволяет обеспечить прикладное применение БАС всех типов.

Во-вторых, томские вузы и предприятия сочетают компетенции, которых достаточно для производства всех видов комплектующих, критически важных для производства БАС, что значительно упрощает решение инфраструктурных, кадровых, маркетинговых и организационных задач.

В-третьих, научно-производственный и лётно-испытательный потенциал Томской области позволяет отработать в её воздушном пространстве различные варианты построения цифровой системы организации воздушного движения, которая позволит безопасно летать пилотируемой и беспилотной авиации.

В соответствии с поручениями Президента Российской Федерации, к сентябрю текущего года должна быть обеспечена сертификация лётной годности не менее 10 беспилотных авиационных систем. Томская область может внести свой вклад в решение этой задачи, предоставив возможность подтверждать лётную годность беспилотников одновременно с выполнением прикладных задач.

Наряду с лётными испытаниями будет идти поиск оптимальных бизнес-моделей использования беспилотников. Эту задачу мы планируем решать в тесном сотрудничестве с ООО «БАС», которое первым в России получило от Росавиации сертификат эксплуатанта беспилотных авиационных систем.

Коммерциализация сервисов, предоставляемых с использованием беспилотников, иногда затруднена из-за административных ограничений. Наиболее остро эти ограничения проявляются в процедуре рассекречивания геопространственных данных. В настоящее время нами совместно с АО «ГЛОНАСС», подготовлены предложения по быстрому рассекречиванию данных дистанционного зондирования Земли.

Чем больше будет появляться беспилотников, тем важнее станут задачи совершенствования организации воздушного движения. В ходе взаимодействия с АО «ГЛОНАСС», ООО «ЛЭМЗ-Т» и другими организациями подготовлены варианты инновационных технических решений. Тестирование новых

решений может вестись в рамках экспериментального правового режима Томской области.

Наконец, требуется решить задачу подготовки персонала для эксплуатации беспилотников. В Томской области создана первая программа массового обучения и тестирования внешних пилотов любительских дронов. Параллельно разработан учебник для подготовки коммерческих пилотов. На площадке аэродрома Берёзкино будут проходить занятия и сдаваться практические экзамены на управление тяжёлыми беспилотными воздушными судами.

Все перечисленные задачи в конечном счёте обеспечат развитие беспилотных технологий в полном соответствии с Концепцией технологического развития России на период до 2030 г.

Для системного решения этой задачи в настоящее время в Томской области создаётся Научно-производственный центр беспилотных авиационных систем. Реализуемые им проекты-маяки направлены на объединение образовательной, исследовательской, конструкторской и производственной базы, а также опытных и серийных производств с целью формирования спроса и предложения на высокотехнологичные и инновационные беспилотные авиационные системы.

Для избрания оптимальной методологии реализации перечисленных задач принципиально важна глубокая научная проработка.

Информация об авторе:

Хурсевич Сергей Николаевич – кандидат экономических наук, советник губернатора Томской области, старший научный сотрудник Центра развития науки, технологий и образования в области обороны и обеспечения безопасности государства Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: khsn@list.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Khursevich Sergey N., Cand.Sc. (Economics), Advisor to the Governor of the Tomsk Region; Senior Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: khsn@list.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Информационное сообщение
УДК 629.73(470+571):339.986
doi: 10.17223/7783494/2/7

Подходы к систематизации подготовки внешних пилотов гражданских беспилотных авиационных систем. Первые шаги

Василий Сергеевич Хурсевич¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, wkhvs@list.ru*

Аннотация. Статья посвящена вопросам организации массового обучения и тестирования внешних пилотов любительских дронов и внешних коммерческих пилотов. Серия нормативных правовых актов Минтранса России, с одной стороны, зафиксировала отказ регулятора от решения этой задачи для лёгких дронов, с другой – обеспечила возможность для широкого творчества в этой сфере. Решение задачи массовой качественной подготовки предполагает использование международного и национального опыта, а также применение нетривиальных управленческих решений.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, подготовка внешних пилотов-любителей, подготовка внешних коммерческих пилотов, экзаменация внешних пилотов

Для цитирования: Хурсевич В.С. Подходы к систематизации подготовки внешних пилотов гражданских БАС. Первые шаги // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 68–71. doi: 10.17223/7783494/2/7

Information report
doi: 10.17223/7783494/2/7

Approaches to systematization of training of external pilots of civil Unmanned Aviation Systems. The first steps

Vasiliy S. Khursevich¹

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, wkhvs@list.ru*

Abstract. The article is devoted to the organization of mass training and examination of unmanned aviation systems (UAS) recreational pilots and UAS commercial pilots. A series of regulatory legal acts of the Ministry of Transport of Russia, on the one hand, recorded the regulator's refusal to solve this problem for light drones, and on the other – provided an opportunity for broad creativity in this area. Solving the problem of mass qualitative training involves the use of international and national experience, as well as the use of non-trivial management solutions.

Keywords: Unmanned Aircraft Systems, training of external recreational pilots, training of external commercial pilots, examination of external pilots

For citation: Khursevich, V.S. (2023) Approaches to systematization of training of external pilots of civil Unmanned Aviation Systems. The first steps. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 68–71. doi: 10.17223/7783494/2/7 (In Russian).

Разработка Национального проекта по развитию беспилотных авиационных систем (далее – БАС) предполагает комбинацию мер по стимулированию спроса на беспилотную авиационную технику, расширению её предложения на рынке с интенсификацией исследований в этой сфере. Очевидно, что результатами проекта станет резкое увеличение количества годных к эксплуатации беспилотных воздушных судов (далее – БВС), готовых к выполнению широкого спектра авиационных работ и авиационных перевозок. В этих условиях готовность техники к эксплуатации будет полностью зависеть от наличия квалифицированного персонала, эксплуатирующего БАС, занятого их обслуживанием и ремонтом, и т.п. Таким образом, выполнение поставленной

Президентом РФ задачи по включению учебных курсов и модулей по управлению беспилотными системами в образовательные программы [1] имеет принципиальное значение.

В настоящее время в России подготовка внешних пилотов осуществляется по десяткам программ среднего и высшего профессионального образования, дополнительного образования, профессионального обучения. Параллельно с лицензированными образовательными организациями сотни частных лиц продают услуги по подготовке «операторов БПЛА», «пилотов дронов», «FPV-пилотов» и т.п. Хаос в программах подготовки усугубляется в результате исключения из перечня авиационного персонала внешних пилотов гражданских беспилотных воздушных судов с

максимальной взлётной массой 30 кг и менее, независимо от цели эксплуатации беспилотников (развлекательный полёт или коммерческий) и характера использования ими воздушного пространства (в пределах прямой видимости или за пределами) [2].

Таким образом, с одной стороны, по мере реализации Национального проекта по развитию беспилотных авиационных систем количество БВС в российском воздушном пространстве увеличится в несколько раз или даже на несколько порядков. С другой – отсутствие целостного подхода к подготовке внешних пилотов чревато ростом авиационных происшествий и инцидентов. Масштаб проблемы можно оценить исходя из того, что в настоящее время количество только официально зарегистрированных в Росавиации БВС превышает 70 тыс., что почти на порядок больше суммарной численности всех пилотируемых воздушных судов гражданской авиации [3].

Для определения вариантов решения назревшей проблемы необходимо проанализировать зарубежный опыт. Из всего многообразия вариантов регулирования подготовки в различных странах наиболее интересным представляется опыт FAA. Это обусловлено тем, что опыт FAA получен в условиях эксплуатации 880 тыс. БВС [4] в самом загруженном в мире воздушном пространстве, в котором ежедневно выполняется более 45 000 рейсов [5].

Согласно правилам FAA, все БВС подлежат регистрации либо в качестве рекреационных (развлекательных), либо в качестве коммерческих. К рекреационным БВС относятся дроны:

- весом 249 г – 24,9 кг;
- цель полёта – спорт/удовольствие;
- воздушное пространство полёта – G;
- высота полёта – до 120 м.

Внешний пилот рекреационного дрона обязан сдать тест «TRUST» на проверку достаточности его знаний для безопасной эксплуатации его БВС. Данный тест сдаётся онлайн.

В случае если цели или веса БВС не вписываются в ограничения рекреационного дрона, внешний пилот должен быть подготовлен до уровня коммерческого пилота в соответствии с требованиями Part 107 или других авиационных правил. Для сдачи экзамена необходимо изучить теоретические материалы, размещённые на сайте FAA [6].

Учебные материалы представляют собой существенно сокращённый и адаптированный под особенности управления БАС курс, созданный на основе стандартного курса частного пилота (PPL). Данный курс включает в себя метеорологию, воздушное право, аэронавигацию и т.д. Для получения сертификата Part 107 необходимо сдать очный экзамен в сертифицированном FAA-центре.

Согласно статистике FAA, зарегистрировано 526 288 рекреационных дронов и выдано 498 217 сертификатов «TRUST». Кроме того, зарегистрировано 349 580 коммерческих дронов, которые эксплуатируются 325 507 сертифицированными удалёнными пилотами. Таким образом, количество зарегистрированных БВС приблизительно равно количеству подготовленных внешних пилотов как в части рекреационных, так и в части коммерческих дронов. Незначительная разница, вероятно, связана со случаями эксплуатации нескольких дронов одним внешним пилотом [4].

В России обязательность регистрации в Росавиации БВС взлётной массой выше 150 г не сопровождается обязательностью прохождения обучения даже в объёме краткого инструктажа по правилам его безопасной эксплуатации. Более того, зарегистрированные дроны не разделяются на коммерческие и любительские. Всё это создаёт неоправданные риски тяжёлых происшествий, связанных как со столкновением с другими воздушными судами, так и с нанесением травм людям, а также повреждением наземных объектов. Кроме того, низкая грамотность владельцев БВС провоцирует неумышленные нарушения ими правил использования воздушного пространства и неосознанные ошибки в использовании принадлежащих им дронов.

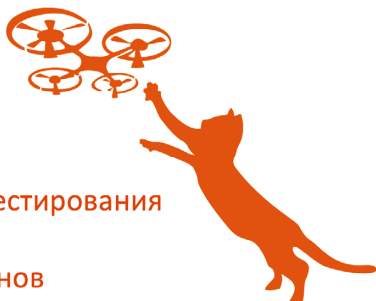
В условиях, когда нарушения носят массовый и непрогнозируемый характер, органы власти провоцируются на «всерные запреты на применение беспилотников» [7] сверх необходимого и достаточного уровня. Массовая авиационная безграмотность владельцев БАС приводит к тому, что государство вынужденно балансирует между двумя полярными позициями: либо смириться с полной анархией, либо ввести сплошной запрет на использование дронов (обеспечить который на практике крайне непросто). В сложившихся условиях значение ликвидации массовой авиационной безграмотности для развития отрасли сложно переоценить.

Первым шагом на пути постепенного исправления ситуации могло бы стать создание российского варианта инструктажа по правилам безопасной эксплуатации любительских дронов. Очевидно, что среди пользователей развлекательных БАС лишь единицы готовы потратить от нескольких десятков до нескольких сотен часов на полноценное овладение навыками внешнего пилота. Максимум, на что готова подобная категория пользователей, – это пройти краткий инструктаж о правилах безопасной эксплуатации БАС с предельно простой и удобной системой тестирования знаний. Таким образом, никакие платные многодневные офлайн-занятия не позволят обеспечить массовый ликбез владельцев

дронов. Задача состоит в совмещении краткого учебного контента и тестирования успешности его усвоения. Первой подобной программой стал разработанный на факультете инновационных технологий Томского государственного университета «Курс обучения и тестирования внешних пилотов любительских дронов» (сокращённо – КОТ) [9].

КОТ

**Курс Обучения и Тестирования
внешних пилотов
любительских дронов**



КОТ работает следующим образом:

- после регистрации на сайте drontest.tsu.ru последовательно открываются 4 раздела;
- каждый раздел включает в себя несколько страниц учебного материала;
- в конце раздела необходимо ответить на 5–7 вопросов;
- при правильном ответе переходим к следующему разделу;
- при ошибке повторяем изученный материал и отвечаем ещё раз.

Успешно сдавший тест может распечатать соответствующий сертификат, подлинность которого можно проверить по QR-коду.

За месяц после открытия курса КОТ общее количество пользователей, успешно сдавших тест, стало сопоставимо с 10% от общего количества зарегистрированных в России БВС. Это позволяет рассчитывать на то, что при должном информировании теоретически может быть обеспечена сплошная подготовка большей части владельцев любительских дронов.

Гораздо более сложной задачей является организация подготовки внешних пилотов профессиональных БАС. Многолетнее ожидание утверждения авиационными властями типовых программ завершилось принятием решения о том, что «эксплуатант, выполняющий авиационные работы на беспилотном воздушном судне с максимальной взлётной массой 30 кг и менее, должен организовать подготовку и контроль квалификации лиц, осуществляющих управление беспилотным воздушным судном» [8]. Указанный нормативный правовой акт уполномочил любого эксплуатанта не только на самостоятельную разработку и реализацию программ подготовки, но и на контроль её качества.

При полётах в зоне прямой видимости на сверхмалых высотах уровень ответственности коммерческого

внешнего пилота не сильно отличается от уровня ответственности внешнего пилота-любителя. Однако коммерческое использование дрона предполагает возможность штатных полётов вне зоны прямой видимости и практическую неизбежность таких полётов при нештатной работе БВС. В этой связи особую актуальность приобретает задача формирования типового учебного контента, изучение которого было бы необходимо и достаточно для безопасной профессиональной эксплуатации БАС. В развитых странах данный контент, как правило, формируется на базе типового учебного контента частного пилота самолёта и вертолёт с сокращением теоретической части в 4–5 раз, её дополнением разделами об особенностях эксплуатации беспилотных воздушных судов и практически полной переработкой программ практической подготовки. Экзамен по знанию теории процедурно неотличим от экзамена PPL.

Вероятно, для организации качественной подготовки внешних коммерческих пилотов БВС максимальной взлётной массой до 30 кг целесообразно использовать методологию создания «Курса обучения и тестирования» (КОТ). Для этого на первом этапе необходимо создать настолько лаконичный теоретический курс, насколько это удастся авторскому коллективу без ущерба для безопасности эксплуатации. Затем максимально широкий круг специалистов должен быть привлечён к доработке этого курса. Аналогичным образом необходимо сформировать методические материалы для практической подготовки. Подобные меры позволят обеспечить методическое единство подготовки, выполняемой по заказу различных эксплуатантов. Очевидно, что первый учебник вдохновит другие авторские коллективы на разработку своих версий учебного контента.

Задача первого учебника ни в коем случае не состоит в монополизации задач подготовки внешних пилотов. Во-первых, в условиях динамичного развития беспилотной авиации любая монополизация приведёт к отставанию учебных программ от жизни. Во-вторых, при наличии сотен отечественных и иностранных производителей и эксплуатантов беспилотной авиатехники задача монополизации просто не имеет решения. В этой связи задача первого учебника сводится к тому, чтобы:

- обеспечить качественную подготовку внешних пилотов и объективный контроль их знаний, навыков и умений;
- задать максимально высокую планку для будущих разработчиков учебного контента;
- сформировать авторский коллектив, способный на быструю доработку учебного контента;

– предоставить авиационным властям базовый контент и дееспособный авторский коллектив для разработки учебного контента для БВС максимальной взлётной массой свыше 30 кг.

В настоящее время в Томском государственном университете разработан первоначальный вариант

контента для учебника коммерческих внешних пилотов.

Это позволит структурировать и систематизировать работу сколь угодно широкого авторского коллектива, формирование которого является одной из приоритетных текущих задач.

Список источников

1. Выступление В.В. Путина на совещании по развитию беспилотной авиации. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/71016> (дата обращения: 10.06.2023).
2. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 октября 2022 г. № 419 «Об утверждении Перечня авиационного персонала гражданской авиации Российской Федерации».
3. Государственный реестр гражданских воздушных судов Российской Федерации. URL: <https://favt.gov.ru/opendata-table?id=2500&ysclid=lir3pql6lv84157823> (дата обращения: 10.06.2023).
4. Drones. URL: <https://www.faa.gov/uas> (дата обращения: 10.06.2023).
5. National Airspace System. URL: https://www.faa.gov/air_traffic/nas (дата обращения: 10.06.2023).
6. Certificated Remote Pilots including Commercial Operators. URL: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators (дата обращения: 10.06.2023).
7. Итоги 2022 года для рынка беспилотной авиации. URL: https://aeronext.aero/press_room/analytics/292234 (дата обращения: 10.06.2023).
8. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 октября 2022 г. № 420 «О внесении изменений в некоторые нормативные правовые акты Министерства транспорта РФ по вопросам регулирования деятельности лиц, осуществляющих управление беспилотными гражданскими воздушными судами максимальной взлётной массой 30 килограмм и менее».
9. Курс обучения и тестирования внешних пилотов любительских дронов. URL: <https://drontest.tsu.ru> (дата обращения: 10.06.2023).

References

1. Vystuplenie V.V. Putina na soveshhanii po razvitiyu bespilotnoj aviatsii [Speech by V.V. Putin at a meeting on the development of unmanned aircraft]. [Online]. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/71016> (Accessed: 10.06.2023).
2. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 19 oktjabrja 2022 g. № 419 «Ob utverzhdenii Perechnja aviacionnogo personala grazhdanskoj aviatsii Rossijskoj Federacii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 19, 2022 No. 419 “On Approval of the List of Civil Aviation Personnel of the Russian Federation”].
3. Gosudarstvennyj reestr grazhdanskih vozdušnyh sudov Rossijskoj Federacii [State Register of the Civil Aircraft of the Russian Federation]. [Online]. URL: <https://favt.gov.ru/opendata-table?id=2500&ysclid=lir3pql6lv84157823> (Accessed: 10.06.2023).
4. Drones. [Online]. URL: <https://www.faa.gov/uas> (Accessed: 10.06.2023).
5. National Airspace System. [Online]. URL: https://www.faa.gov/air_traffic/nas (Accessed: 10.06.2023).
6. Certificated Remote Pilots including Commercial Operators. [Online]. URL: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators (Accessed: 10.06.2023).
7. Itogi 2022 goda dlja rynka bespilotnoj aviatsii [Results of 2022 for the unmanned aircraft market]. [Online]. URL: https://aeronext.aero/press_room/analytics/292234 (Accessed: 10.06.2023).
8. Prikaz Ministerstva transporta RF ot 19 oktjabrja 2022 g. № 420 “O vnesenii izmenenij v nekotorye normativnye pravovye akty Ministerstva transporta RF po voprosam regulirovanija dejatel'nosti lic, osushhestvlyajushhih upravlenie bespilotnymi grazhdanskimi vozdušnymi sudami maksimal'noj vzljotnoj massoj 30 kilogramm i menee” [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of October 19, 2022 No. 420 “On Amendments to Certain Regulatory Legal Acts of the Ministry of Transport of the Russian Federation on Regulating the Activities of Persons Controlling Unmanned Civil Aircraft with a Maximum Takeoff Weight of 30 kg or Less”].
9. Kurs obuchenija i testirovanija vnesnih pilotov ljubitel'skih dronov [Training and testing course for external pilots of unprofessional drones]. [Online]. URL: <https://drontest.tsu.ru> (Accessed: 10.06.2023).

Информация об авторе:

Хурсевич Василий Сергеевич – инженер-исследователь Центра развития науки, технологий и образования в области обороны и обеспечения безопасности государства Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: wkhvs@list.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Khursevich Vasily S., engineer-researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation) E-mail: wkhvs@list.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Информационное сообщение
УДК 629.73(470+571):339.986
doi: 10.17223/7783494/2/8

Беспилотье в России: маркетплейс как драйвер отрасли

Николай Ивашов¹

¹ ООО «Флай Дрон», Москва, Россия, info@flydrone.ru

Аннотация. Компания «Флай Дрон» дает прогноз развития беспилотной индустрии в стране и предлагает инструмент, который поможет ей преодолеть временные сложности, фигурально выражаясь, набрать должную высоту.

Ключевые слова: беспилотник, дрон, коптер, цифровая платформа, аэромобильность, аэрологистика, агродрон, маркетплейс, информационные технологии, полеты, авиация

Для цитирования: Ивашов Н. Беспилотье в России: маркетплейс как драйвер отрасли // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 72–74. doi: 10.17223/7783494/2/8

Information report
doi: 10.17223/7783494/2/8

Unmanned vehicles in Russia: marketplace as an industry driver

Nikolai Ivashov¹

¹ Fly Dron Ltd., Moscow, Russian Federation, info@flydrone.ru

Abstract. The Fly Dron company gives a forecast for the development of the unmanned vehicles industry in Russia and offers a tool that will help it get out of the crisis.

Keywords: unmanned aerial vehicle, drone, copter, digital platform, air mobility, air logistics, agricultural drone, marketplace, information technologies, flights, aviation

For citation: Ivashov, N. (2023) Unmanned vehicles in Russia: marketplace as an industry driver. *Tekhnologii bezopasnosti zhizhnedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 72–74. doi: 10.17223/7783494/2/8 (In Russian).

В настоящее время отечественное беспилотье переживает не самый простой период своего развития. Запреты на полеты дронов во многих регионах России, введенные местными властями из-за террористической угрозы, являются серьезным сдерживающим фактором для всей отрасли. Ведущие игроки рынка отмечают избыточность ограничений, однако вынуждены воспринимать их как данность.

В то же время можно констатировать, что те компании, которые не опустят руки, смогут после завершения беспилотного локаута с выгодой для себя поучаствовать в перераспределении рынка. В данном контексте чрезвычайно важным является подготовиться к взрывному росту количества полетов, ожидающемуся на выходе из «черной» для дронеров полосы.

Компания «Флай Дрон», разработавшая систему единого окна цифровых сервисов жизненного цикла беспилотных воздушных судов, уже сейчас готова предоставить всем их пользователям возможность комфортного и легального пользования воздушного пространства, а также коммерциализировать свои

навыки. Кроме того, среди наших разработок имеется специальный сервис для муниципальных властей – личный кабинет, благодаря которому руководство того или иного региона сможет эффективно справиться с любым потоком поступающих заявок на использование дронами воздушного пространства.

В данном контексте важно иметь адекватное представление о том, что в ближайшем будущем будет представлять собой гражданский «беспилотный» рынок и какие услуги на нем будут пользоваться наибольшим спросом. Общий тренд таков, что до сих пор наиболее распространенной областью применения беспилотных авиационных систем в РФ с коммерческими целями являлось проведение съемок местности и мониторинга объектов. Есть основания полагать, что объемы, в которых такого рода миссии в настоящее время проводятся, в ближайшем будущем должны как минимум сохраняться. Причем даже если запреты будут оставаться в силе. А уж после раскручивания гаек, снятия регуляторных ограничений и доработки нормативно-правовой базы тут и вовсе можно ждать прорыва. Ведь в этом

заинтересованы многие крупные компании и государственные структуры из таких важных в масштабах страны экономических сфер, как ТЭК и транспорт. В качестве примеров можно привести «Газпром» и РЖД, давно уже взявшие на вооружение оснащенные необходимым для мониторинга оборудованием дроны и нашедшие в данной области надежных исполнителей работ. Также в мониторинговом поле играют МЧС, «Авиалесоохрана» и некоторые другие госструктуры.

Одновременно стоит ожидать, что очень активно будет развиваться и рынок сельскохозяйственных работ, проводимых при помощи беспилотников. В том числе и благодаря вводимым государством послаблениям в части регулирования полетов агродронов. Такого рода миссии могут, согласно нашей оценке, уже через несколько лет занять от 40 до 50% всего беспилотного рынка. Ведь повышение урожайности на 5–10% благодаря беспилотным технологиям – это очень лакомый кусок для агропрома.

Еще одно перспективнейшее направление – это логистика. К 2025–2030 гг. страну, возможно, ожидает настоящий логистический дробум. Конечно, для начала доставка при помощи дронов будет осуществляться лишь в труднодоступные районы. Затем дело дойдет и до так называемой доставки последней мили в городах. Крупнейшие e-commerce площадки уже сейчас внимательно присматриваются к городской аэромобильности. Конечно, для выстраивания полноценных логистических схем потребуется обучение квалифицированного персонала, создание маршрутной сети беспилотников, наземной инфраструктуры для контроля и наблюдения за БВС, дронопортов и посадочных площадок, организация полнокомплексного техобслуживания дронов. Для того чтобы разработать решения в указанных сферах, сейчас самое подходящее время. Как говорится, сани надо готовить летом.

Следующим же этапом станет уход от управления дронами-доставщиками внешним пилотом, автоматизация большинства процессов, использование искусственного интеллекта для проведения полетов и переход к их автономности. При выполнении вышеперечисленных условий стоимость летного часа окажется с экономической точки зрения привлекательной, а логистические схемы с использованием беспилотников – сверхэффективными. Ну а вслед за логистикой неминуем приход эры пассажирских перевозок посредством дронов. И «первой ласточкой» здесь станет, конечно, аэротакси.

Помимо вышеперечисленных сфер, в ходе развития русского беспилотья заметно вырастут ниши для дронов в строительстве, медиабизнесе (съемки для киноиндустрии и телевидения), образовании (подго-

товка операторов). Все это повлечет за собой появление достаточно большого количества пользователей дронов, не имеющих отношения к крупному бизнесу, но готовых применять свои навыки для зарабатывания денег в указанных сегментах беспилотного рынка. А значит, востребованными им окажутся соответствующие инструменты. И у компании «Флай Дрон» такой инструмент есть уже сейчас. Это маркетинг, позволяющий тем, у кого есть дроны, и тем, кто нуждается в получении беспилотных услуг, найти друг друга и заключить цифровой контракт на нашей платформе.

Кстати, любой пользователь может одновременно выступать в любом из вышеперечисленных качеств – в одном договоре может быть заказчиком работ, а в другом исполнителем. Публикация заказов на работы производится путем заполнения стандартизированной карточки, в которой фиксируются основные требования к работе – район их проведения, тип, календарный план. Подбор подходящих исполнителей работ под требования заказчика может производиться и автоматически платформой, и вручную. Все поступающие заявки от заинтересованных лиц проходят через процедуру сравнения и выводятся в удобном для анализа виде.

После того как заказчик и выбранный им исполнитель договорились об условиях работы, платформа «Флай Дрон» позволяет подписать между ними цифровой контракт (автоматически генерируется на основе условий заказа или подгружается заказчиком в виде своей версии договора). Ну а платформа контролирует исполнение работ в соответствии с календарным планом, своевременно предупреждает стороны о приближении контрольных сроков работ, а также позволяет формировать необходимую документацию по приемосдаточным процедурам этапов работ.

На основе выставляемых оценок по итогам завершения работы стороны перекрестно оценивают друг друга, оставляя отзывы. Из субъективных оценок по конкретным договорам складывается объективный рейтинг каждого участника. Стоит особо отметить, что маркетинг позволяет систематизировать взаимодействие сторон договора по широкому спектру типов работ от различных типов мониторинга и перевозки до оцифровки полученных результатов или, например, проведения шоу дронов. Встроенный в маркетинг мессенджер позволяет не только оперативно взаимодействовать пользователям на стадии подготовки к выполнению работ и в рамках заключенных договоров, но и служит источником юридических фактов взаимодействия сторон.

Вышеописанный инструмент не является чем-то из далекого будущего, а готов к использованию

уже сейчас. А та пауза, в которой все мы оказались в силу объективных и субъективных причин, лишь поспособствует его совершенствованию с применением современных информационных технологий в режиме тестовой эксплуатации. Тут можно прове-

сти параллель с периодом ковидных ограничений, которые для кого-то стали не безвременьем, а временем открывающихся возможностей. И «Флай Дрон» призывает коллег по отрасли возможности эти не упустить.

Информация об авторе:

Ивашов Николай – PR-директор ООО «Флай Дрон» (Москва, Россия). E-mail: info@flydrone.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Ivashov Nikolay, PR Director, Fly Dron Ltd. (Moscow, Russian Federation). E-mail: info@flydrone.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Информационное сообщение
УДК 629.73(470+571):339.986
doi: 10.17223/7783494/2/9

Проблемы развития административной модели формирования рынка беспилотных авиационных систем на современном этапе

Вадим Николаевич Цыганаш¹

¹Ассоциация организаций и лиц, выполняющих авиационные работы и оказывающих авиационные услуги,
Москва, Россия, Tsiganash@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу динамики процесса формирования подотрасли гражданской авиации – авиационных работ на беспилотных авиационных системах. Фокусируя внимание читателя на неизбежности качественного перехода от стратегического управления как государственным проектом формирования подотрасли БАС, к созданию отраслевых механизмов развития подотрасли, статья указывает на объективные проблемы и противоречия, связанные с данным переходом, описывает возможные пути и механизмы их преодоления.

Ключевые слова: государственное управление, стратегия развития, гражданская авиация, авиаработы, беспилотные системы, рынок авиационных работ, стратегический анализ, проектный анализ

Для цитирования: Цыганаш В.Н. Проблемы развития административной модели формирования рынка БАС на современном этапе // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 2. С. 75–80. doi: 10.17223/7783494/2/9

Information report
doi: 10.17223/7783494/2/9

Problems of the development of the administrative model for the formation of the market of Unmanned Aviation Systems at the present stage

Vadim N. Tsyganash¹

¹Association of organizations and persons performing aviation work and providing aviation services,
Moscow, Russian Federation, Tsiganash@mail.ru

Abstract. The article presents the analysis of the dynamics of the process of formation of the civil aviation sub-sector – aviation works on unmanned aerial systems. Focusing the reader's attention on the inevitability of a qualitative transition from strategic administration, as a state project, of the formation of the UAS sub-sector to the creation of sectoral mechanisms for the development of the sub-sector, the article points to the objective problems and contradictions associated with this transition, describes possible ways and mechanisms to overcome them.

Keywords: public administration, development strategy, civil aviation, aviation works, unmanned systems, aviation works market, strategic analysis, project analysis

For citation: Tsyganash, V.N. (2023) Problems of the development of the administrative model for the formation of the market of Unmanned Aviation Systems at the present stage. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 2. pp. 75–80. doi: 10.17223/7783494/2/9 (In Russian).

Анализ публичных выступлений руководителей государства по вопросу не оставляют никакого сомнения в том, что на уровне постановки задач стратегического планирования было выявлена, доказана и принята к реализации органами политического управления концепция необходимости БАС.

Вопросы подготовки административно-управленческих решений в области БАС в общем виде обсуждались на Президиуме Совета при Президенте РФ по модернизации экономики и инновационному развитию до 2015 г. С 2015 г. вопрос о развитии БАС включен в план деятельности Правительства

РФ, как следствие с 2015 г. формируются и финансируются проекты научно-технологической инициативы (НТИ) с привлечением автономных некоммерческих организаций (АНО), как базовые для осмысления и разработки контуров проекта формирования экосистемы БАС в Российской Федерации в среднесрочной и близкой перспективе. Проводимая последовательно, неизменно и неуклонно административно-управленческая и, главное, бюджетно-финансовая политика руководства Российской Федерации в сфере БАС, а также ее технико-юридическая реализация на уровне Правительства РФ позволяют од-

нозначно утверждать, что фокус внимания политического руководства РФ (в отличие от множества вопросов, периода 2013–2021 гг., бесследно исчезнувших) не поменялся. Актуальность вопросов выхода на рынок БАС и глобальной конкурентоспособности Российской Федерации остается для политического руководства РФ предельно высокой.

С 2021 г. разворачиваются колоссальные по организационным усилиям мероприятия по стимулированию, разработке и стандартизации, развитию отрасли БАС (рис. 1).

Разработаны и утверждены Правительством РФ дорожные карты реализации проектов (рис. 2). Определяются сервисные функции и круг заказчиков (рис. 3).



Рис. 1. Структура национального проекта по БАС

Fig. 1. Structure of the unmanned aviation systems (UAS) national project

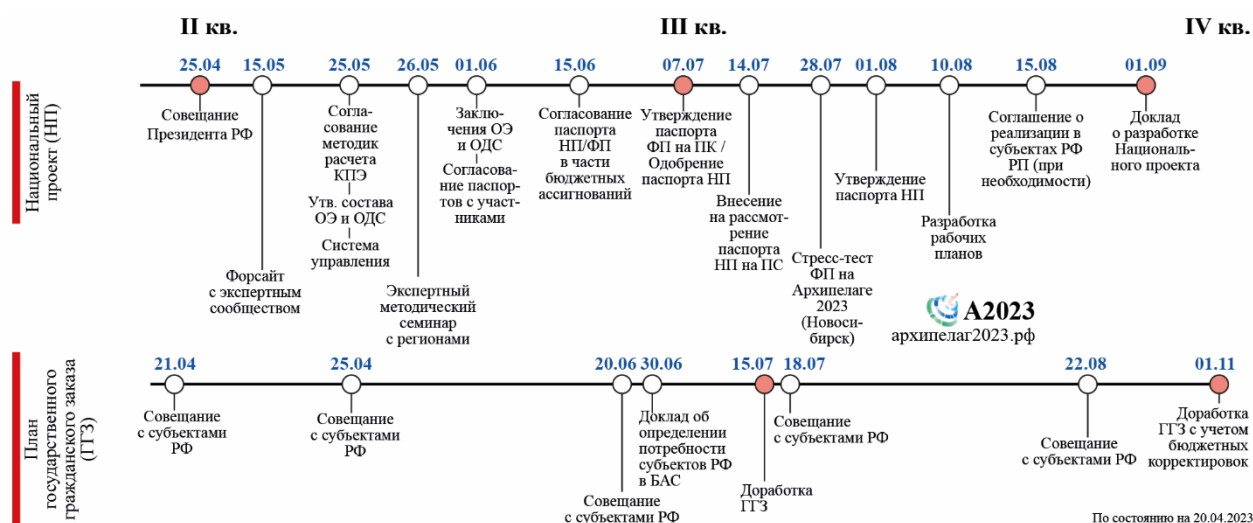


Рис. 2. Дорожная карта по разработке национального проекта «Беспилотные авиационные системы»

Fig. 2. Roadmap of the development of the national project named “Unmanned Aviation Systems”

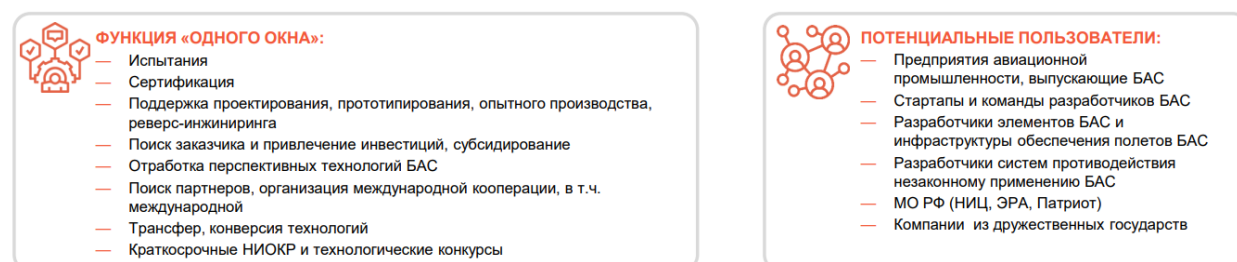


Рис. 3. Функционал научно-производственных центров испытаний и компетенций в сфере БАС и его конечные потребители

Fig. 3. Functionality of the research and production centers for testing and competencies in the field of UAS and its users

Административная машина, которая, надо отдать должное, в течение 8 лет упорно продвигала беспилотную повестку, наконец доехала до своих пассажиров: заказчиков и исполнителей услуг и, открыв двери салона, предлагает им свое видение мира беспилотного будущего.

Погружаясь в эту картину мира, отраслевые специалисты начинают задаваться вопросами о том, как именно предлагаемая модель помогает решать те противоречия, которые сегодня сформированы в области развития БАС.

Их вопросы обусловлены тем, что задачи первоначального этапа формирования беспилотной отрасли – доказать необходимость нацпроекта по беспилотным системам, сформировать административные механизмы механизмы, обеспечивающие актуальность беспилотной повестки в ряду других, не менее значимых проблем, совершенно естественно отличаются от задач, возникающих на этапе практической реализации проекта.

С попаданием в точку начала практической реализации проекта по развитию беспилотной авиации система отношений качественно усложнилась, а предлагаемый административно-правовой механизм – нет.

Это качественное усложнение связано, во-первых, с иным кругом участников – в проекте появляются эксплуатанты, заказчики, контрольные органы и т.д., которых не было на первом этапе. Во-вторых, с изменением стратегических задач: от доказывания необходимости существования беспилотных систем – к формированию эффективных бизнес-моделей. В-третьих, с востребованностью иных механизмов решения задачи: коммуникативных, организационных, нормативных.

Состояние отношений на старте формирования отрасли БАС можно охарактеризовать несколькими

крупными противоречиями, которые по указанным выше причинам не были предусмотрены действующей моделью продвижения проекта. Каждое из них возникло в процессе его развития и отражает баланс интересов игроков в поле формирования индустрии БАС (прогнозируемые потребности в финансировании системы научно-производственных центров испытаний и компетенций в сфере БАС – по данным экспертно-методического семинара «Создание на территории региона научно-производственных центров БАС». URL: <https://leader-id.ru/events/434114>):

– противоречие между ограниченными возможностями применения БАС в исключительном качестве более дешевого эквивалента отдельных авиационных операций и устоявшимся механизмом удовлетворения интересов ключевых заказчиков при помощи пилотируемой авиации (здесь имеется в виду как организационный, так и экономический аспект проблемы);

– противоречие между потребностью в локальных услугах и централизованным механизмом их планирования (здесь имеется в виду влияние корпоративных отношений заказчиков на организацию бизнес-процессов по удовлетворению спроса на услуги с помощью БАС);

– противоречие между сложившимися в институтах контроля практиками минимизации рисков, основанными на рисках пилотируемой авиации и измеряемыми по высшему уровню – сохранению жизни, и потребностью в иных практиках, соразмерных риску падения БАС на землю;

– противоречие между отсутствием моделей расчетных отраслевых экономических эффектов применения БАС и формированием бюджетных затрат на реализацию проектного инвестирования в сумме 232 млрд 200 млн руб. (таблица).

Прогнозируемые потребности в финансировании системы научно-производственных центров испытаний и компетенций в сфере БАС

Параметр	Год							
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Общее количество крупных НПЦ	1	6	11	14	14	14	14	14
Расходы по крупным НПЦ, млн руб.**	900	7 500	10 000	9 700	7 000	7 000	7 000	7 000
Общее количество Сп НПЦ		3	7	10	10	10	10	10
Расходы по Сп НПЦ, млн руб.***		9 600	15 200	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000
Общее количество малых НПЦ		5	15	35	50	70	80	82
Расходы по малым НПЦ, млн руб.****		1 500	4 000	9 000	11 500	16 000	17 000	16 600
Краткосрочные НИОКР, млн руб.		1 500	2 000	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Среднесрочные НИОКР, млн руб.		1 000	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Суммарно по НИОКР, млн руб.		2 500	3 500	4 500	4 500	4 500	4 500	4 500
Суммарно по системе НПЦ	900	18 600	29 200	33 900	26 500	31 000	32 000	31 600
ИТОГО	900	21 100	32 700	38 400	31 000	35 500	36 500	36 100

Примечание.

* При условии софинансирования в таком же размере со стороны субъекта РФ или лидера проекта.

** При создании – до 900 млн руб., ежегодно – до 500 млн руб.

*** При создании – до 2 400 млн руб., ежегодно – до 800 млн руб.

**** При создании – до 300 млн руб., ежегодно – до 200 млн руб.

Для этапа формирования рынка эти противоречия объективны. И они требуют решения. Следовательно, если раньше основным вопросом являлось удержание беспилотной повестки в числе актуальных вопросов государственного развития, то основным вопросом сегодняшнего дня является вопрос трансформации предлагаемых механизмов для разрешения имеющихся противоречий.

Каких элементов не хватает существующей модели?

В первую очередь, экономических. Отсутствие описанного в национальном проекте экономического эффекта, т.е. разницы между денежным доходом от деятельности и денежными расходами на осуществление деятельности, – это нонсенс. Это не позволяет видеть в планировании и прогнозировании на федеральном, региональном, муниципальном, корпоративном уровнях бюджетные эффекты от применения БАС, формировать в соответствии с ними заказы, перераспределять средства в пользу беспилотных систем там, где их применение экономически эффективно.

Расчетные экономические модели формируют потребность исполнителей в диверсификации основных средств и снимают аргументы к использованию устоявшихся механизмов удовлетворения интересов ключевых заказчиков при помощи пилотируемой авиации.

Надо отметить, что крупные корпоративные игроки, которые являются владельцами объектов применения БАС и весьма часто владельцами зон ограничения полетов над ними, эти экономические модели сформировали как минимум два года назад и используют их как конкурентное преимущество, наращивая год от года объемы работ, компетенции и предлагая рынку только готовые решения в виде исполняемой услуги по указанной цене.

Но отсутствие экономических кейсов не выгодно и им, поскольку объем их работ оказывается ограничен из-за невозможности формирования крупных региональных и федеральных заказов от органов власти, что в условиях запрета в 66 регионах РФ на применение БАС на любых проектах, кроме связанных с органами власти, практически обнуляет потенциальный рынок.

Отсутствие расчетных экономических моделей оказывает влияние и на местный инвестиционный процесс. По действующим правилам сертификация эксплуатанта влечет издержки: это 300–400 листов документации, подаваемой при сертификации, 2 000–3 000 листов подтверждающей документации и затраты от одного до полутора миллионов рублей в год на поддержание ее в актуальном состоянии. При отсутствии расчетного дисконтируемого де-

нежного потока инвестиции в отрасль БАС для локальных игроков просто теряют смысл.

Вторым элементом, которого не хватает, является механизм формирования местных легальных исполнителей услуги. В условиях, когда крупные корпоративные заказы сгруппированы у нескольких, возможно, у десятков, игроков, объемы региональных рынков оказываются действительно минимальными, а потому не интересными региону с точки зрения формирования какой-либо структуры управления этим рынком. Потребности оказываются замещенными либо путем предложения готовой услуги, либо другими игроками, предоставляющими наземное, но более дорогое решение задач. Например, оборудование свалок видеокамерами вместо авиационного мониторинга и т.д.

Рынок беспилотных систем – это не только реализация крупных проектов. Наоборот, мировая практика показывает, что это рынок местных, локальных услуг. И они многообразны. Развитие рынков, понимаемое как поиск места приложения беспилотных авиационных систем, невозможно без ищущих и находящих такие места локальных игроков.

Легальность и наличие локальных игроков рынка БАС связаны с третьим отсутствующим элементом – изменением нормативно-правовой базы применения БАС.

Ключевая проблема известна – отсутствие нормативной модели, соответствующей технически достижимым уровням надежности и безопасности применения БАС, их сертификации, работы эксплуатантов авиаработ, использования воздушного пространства, избыточность требований при содержательной выхолощенности их влияния на достижение показателей безопасности. Она является следствием применения воздушного законодательства, основанного на заведомом исключении факторов возникновения риска. Такая правовая модель оправдана для пилотируемой авиации, но неприемлема для беспилотной в связи с сохранением системных запретов при более низком уровне угроз.

Вследствие этого в действующем воздушном законодательстве имеется 60 противоречий и неисполнимых норм, каждое из которых предусматривает административную либо уголовную ответственность. В том числе:

- неисполнимость более 20 нормативных требований о сертификации БАС максимальной взлетной массой более 30 кг; неисполнимость требования регистрации права на БАС более 30 кг, сертифицируемого как единичный экземпляр по акту оценки в порядке приказа Минтранса России от 28.02.2023 г. № 61; о внесении квалификационных отметок в свидетельство авиационного персонала для операторов

БАС до 30 кг; о выдаче свидетельства авиационного персонала лицу, управляющему БАС более 30 кг; о выдаче свидетельства авиационного персонала инженерно-технических сотрудников (ИТС), обслуживающих БАС более 30 кг;

– правовая неопределенность в части подтверждения квалификации лиц в соответствии с п. 19 приказа Министерства образования и науки РФ от 1 июля 2013 г. № 499 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам»; правовая неопределенность требований к материально-технической базе эксплуатанта авиаработ на БАС до 30 кг;

– противоречия введенных Постановлением Правительства от 11 марта 2010 г. № 138 в ст. 52.1 ФП ИВП правил использования воздушного пространства для БАС и требований ст. 16 «Порядок использования воздушного пространства», предусматривающей исключительно уведомительный и разрешительный порядок ИВП; требований в п. 124 ФП ИВП об уведомлении органов обслуживания воздушного движения только лицами авиационного персонала и требований ФАП-494, в которых внешние пилоты БАС до 30 кг не являются авиационным персоналом, но имеют право на ИВП; противоречия между требованиями Федеральных законов от 14 апреля 1999 г. № 77-ФЗ «О ведомственной охране», от 28 декабря 2013 г. № 404-ФЗ «О внесении изменений в статью 14 Федерального закона «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», «О гражданской обороне» и требованиями Постановления Правительства РФ от 11 марта 2010 г. № 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации».

Частью этой проблемы является несовпадение нормативных требований Минтранса России по оценке неавиационного персонала при регистрации эксплуатанта авиаработ на БАС до 30 кг и полномочий органов МТУ Росавиации (уполномочены к оценке только авиационного персонала). Вследствие этого формирование кластера эксплуатантов авиаработ на БАС как конечных потребителей персонала затруднено.

Отсутствие нормативных требований к квалификации операторов БАС, не относящихся к авиационному персоналу, при наличии обязанности их оценки органами МТУ Росавиации является одним из факторов отказов при обращении заявителя для регистрации эксплуатанта авиаработ.

Решением является применение риск-ориентированного подхода, который в отличие от существующей модели связывает с уровнем риска не вид деятельности, а условия полета. Однако Россия до настоящего времени не ввела в отличие от Казахстана, Узбекистана такие правила.

И последние два элемента: производство и сертификация и кадровое обеспечение отрасли.

Если посмотреть на имеющиеся решения в области производства и сертификации БАС, то совершенно очевидно, что предлагаемая схема, требующая выполнения всего цикла испытаний БАС по авиационным нормам летной годности, следовательно, сертификации типа либо сертификации на соответствие по акту оценки, не позволяет сформировать массовое применение сертифицированных БАС.

Так, по состоянию на 20.01.2023 было подано всего 8 заявок на сертификацию БАС с БВС свыше 30 кг, среди которых 7 заявок на БВС вертолетного типа и одна на БВС самолетного типа. Наименования БАС и разработчиков представлены на рис. 4.

Разработчик	Наименование БАС	Тип БВС
АО «НЦВ Миль и Камов»	БАС-200	Вертолетного типа
ООО «КБ Русь»	R-2200	
ООО «ВР-Технологии»	VRT 300	
ООО «Индустриальные дроны»	BRAERON A	
ООО «Аура»	Aura T 100	
ООО «ОКБ «Авиарешения»	SKYF-A	
АО «Кронштадт»	Орион	Самолетного типа

Рис. 4. Поданные заявки на сертификацию БАС и разработчиков к январю 2023 г.

Fig. 4. Submitted applications for certification of UAS and developers by January, 2023

По данным АО «АСЦ “Сибниа-Тест”», полученным в результате собеседований при проведении работ по теме «Снижение административных барьеров в области применения БАС», пропускная способность сертификационных центров по сертификации по акту оценки не превышает 50 БАС в год.

Не проще ли вывести вопросы сертификации БАС до 30 кг (которые сегодня существуют в эксплуатации именно потому, что они не сертифицируются) в сферу ФЗ «О техническом регулировании»? Ведь в распоряжении Минпромторга России имеется гораздо большее число

Можно также привести примеры из жизни предприятий о невозможности получения в действующей модели правового регулирования разрешения на первый вылет и добавить правовую неурегулированность более 20 позиций сертификации именно беспилотных авиационных систем связи, не позволяющую получить никакой сертификат, кроме сертификата типа ограниченной категории, т.е. на авиаработы.

Наконец, кадровая проблема. Действующая система НПА и сформированные ею правовые механизмы не позволяют решить задачу формирования эффективной низкозатратной системы подготовки операторского и технического персонала как для

авиаработ БАС, так и в целях удовлетворения личных потребностей.

Система ведомственных НПА Минтранса России в области подготовки операторов БАС ограничивает образовательный потенциал 144 учреждений ВПО и 21 учреждения СПО, реализующих ФГОС ВПО (СПО), и нивелирует механизм, предусмотренный ст. 195.1 ТК РФ о применении Профстандарта для определения квалификации оператора БАС, в связи с отсутствием интегрированного в образовательный процесс Профстандарта утвержденного курса практической учебно-летной подготовки на БАС, программ формирования компетенций для видов авиаработ на БАС, правовых механизмов учета практического налета.

Вследствие этого органы управления гражданской авиацией, эксплуатанты авиаработ высказывают обоснованные сомнения относительно качества подготовки персонала, эффективности и безопасности выполняемых им авиационных работ, что препятствует массовому привлечению БАС к выполнению авиаработ.

В заключение хотелось бы отметить, что вопросы, поднятые в статье, возможно решить. Слово за управленцами.

Информация об авторе:

Цыганаш Вадим Николаевич – доктор филологических наук, исполнительный директор Ассоциации организаций и лиц, выполняющих авиационные работы и оказывающих авиационные услуги (Москва, Россия). E-mail: Tsiganash@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Tsyganash Vadim N., Dr.Sc. (Philology), Executive Director, Association of Organizations and Persons Performing Aviation Works and Providing Aviation Services (Moscow, Russian Federation). E-mail: Tsiganash@mail.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 12.07.2023

The article was submitted 5.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; accepted for publication 12.07.2023

Уважаемые читатели!

Приглашаем Вас принять участие в работе XVIII Международной конференции «Высокоэнергетические и специальные материалы» (HEMs), которая состоится 02–03 ноября 2023 г. в Индии, г. Пуна.

Конференция HEMs берет свое начало в 2004 г. и традиционно проводится на базе российской или зарубежной организации (научно-образовательной или индустриальной).

Конференция HEMs-2023 является одним из важных мероприятий мирового уровня, наглядно демонстрирующих сотрудничество между фундаментальной и прикладной наукой и промышленным комплексом, как российским, так и международным. Сотрудники Томского государственного университета организовывали конференцию с самого ее рождения, принимали участие в каждой из них на уровне ключевых или приглашенных докладчиков. Оргкомитет конференции ведет активную работу с ключевыми участниками, представляющими науку и промышленность Индии, Японии, Италии, Франции, Германии. В работе конференции примут участие более 300 участников из разных стран.

Тематика конференции охватывает фундаментальные и прикладные проблемы применения высокоэнергетических и специальных материалов, исследования и разработки специальных металлических и композиционных материалов, а также современное состояние и перспективы развития следующих направлений:

- ✓ Синтез, характеристика и оценка новых энергетических материалов для различных применений.
- ✓ Разработка и производство современных ВЭМ.
- ✓ Малочувствительные и «зеленые» ВЭМ.
- ✓ Перспективные ракетные топлива.
- ✓ Перспективные взрывчатые составы и устройства.
- ✓ Перспективные артиллерийские системы.
- ✓ Состояние и перспективы развития пиротехники.
- ✓ Нанонаука и нанотехнологии для ВЭМ.
- ✓ Моделирование, структурный анализ, пути и механизмы реакций.
- ✓ Термическое разложение, горение и детонация.
- ✓ Достижения в области специальных материалов и смежных технологий.
- ✓ Контроль качества и обеспечение ВЭМ.
- ✓ Демилитаризация, утилизация отходов, экологические исследования и технологии утилизации ВЭМ.

Организатором XVIII Международной конференции выступает Томский государственный университет совместно с лабораторией исследований высокоэнергетических материалов (High Energy Materials Research Laboratory, HEMRL, Индия). Мероприятие пройдет при поддержке федеральной программы «Приоритет 2030».

Контактная информация: abv1953@mail.ru, khmelevamg@gmail.com

Будем рады видеть Вас среди участников конференции.

С уважением,

*Председатель организационного комитета,
д-р физ.-мат. наук, профессор
Александр Борисович Ворожцов*

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2023. № 2

Редактор К.Г. Шилько
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Дизайн обложки А.А. Аббасова

Подписано к печати 21.07.2023 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 10,2; усл. печ. л. 9,5.
Тираж 1500 экз. Заказ № 5535. Цена свободная.

Дата выхода в свет 02.08.2023 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru



КОТ

Курс Обучения и Тестирования
внешних пилотов
любительских дронов

drontest.tsu.ru

