

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
ГосНИИ ГА**

**SCIENTIFIC BULLETIN
OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF CIVIL AVIATION**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ (№ 357)

№ 46

**Москва
2024**

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

Основан в 1952 году

Учредитель. Издатель. Редакция:

Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
Российская Федерация, 125438, Москва, ул. Михалковская, д. 67, корп. 1

Founder, Publisher, Editorial board:

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation
Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation

Научный вестник ГосНИИ ГА включён в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук.

Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation is included in the List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences.

Подписной индекс в Интернет-каталоге
«Пресса России» 70663
© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2024

Редакционная коллегия

Главный редактор – И. П. Чалик (ГосНИИ ГА)
Зам. главного редактора – А. А. Богоявленский, д-р техн. наук (ГосНИИ ГА)
Ответственный секретарь – И. Н. Шестаков, д-р техн. наук (ГосНИИ ГА)

Члены редакционной коллегии

Н. А. Абдужабаров, канд. техн. наук (*Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Республика Узбекистан*)
Б. С. Алёшин, д-р техн. наук, академик РАН, проф. (*Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия*)
В. И. Горбаченко, д-р техн. наук, проф. (*ПГУ, Пенза, Россия*)
М. С. Громов, лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, канд. техн. наук (*ГосНИИ ГА, Москва, Россия*)
С. В. Далецкий, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (*ГосНИИ ГА, Москва, Россия*)
А. В. Кан, канд. техн. наук (*Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия*)
Е. Е. Карсыбаев, д-р техн. наук, проф. (*Академия гражданской авиации, Алматы, Республика Казахстан*)
А. Я. Книпель, канд. техн. наук (*Авиарегистр России, Москва, Россия*)
А. И. Козлов, заслуженный работник науки и техники Российской Федерации, д-р физ.-мат. наук, проф. (*ГосНИИ ГА, Москва, Россия*)
В. Б. Козловский, д-р техн. наук, проф. (*ПАНХ, Краснодар, Россия*)
Г. А. Крыжановский, заслуженный работник науки и техники Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (*СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия*)
Е. А. Куклев, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (*СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия*)
У. Э. Курманов, канд. техн. наук, доц. (*Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова, Бишкек, Кыргызская Республика*)
В. А. Соколов, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р физ.-мат. наук, проф. (*Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия*)
О. Ю. Страдомский, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, канд. техн. наук (*ГосНИИ ГА, Москва, Россия*)
Р. С. Фадеев, канд. техн. наук (*Ассоциация «Транспортная безопасность», Москва, Россия*)
О. Г. Феоктистова, д-р техн. наук, доц. (*МГТУ ГА, Москва, Россия*)

тел./факс: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Плата за публикацию в Научном вестнике ГосНИИ ГА с аспирантов не взимается

Editorial Board

Chief editor – Chalik I. P., GosNII GA, Moscow, Russia
Deputy chief editor – Bogoyavlenskiy A. A., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Responsible Secretary – Shestakov I. N., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia

The members of the Editorial Board

Abduzhabarov N. A., Cand. Sci. (Eng.), Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Aleshin B. S., Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Prof., National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
Gorbachenko V. I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Penza State University, Penza, Russia
Gromov M. S., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Daletskiy S. V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., GosNII GA, Moscow, Russia
Kan A. V., Cand. Sci. (Eng.), National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
Karsybaev E. E., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academy of Civil Aviation, Almaty, Republic of Kazakhstan
Knivel A. Ya., Cand. Sci. (Eng.), Aviation Register of the Russian Federation, Moscow, Russia
Kozlov A. I., Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Prof., GosNII GA, Moscow, Russia
Kozlovskiy V. B., Dr. Sci. (Eng.), Prof., PANH Helicopters, Krasnodar, Russia
Kryzhanovskiy G. A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
Kuklev E. A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
Kurmanov U. Eh., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdramova, Bishkek, Kyrgyzstan
Sokolov V. A., Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Prof., P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
Stradomskiy O. Yu., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Fadeev R. S., Cand. Sci. (Eng.), Transport Safety Association, Moscow, Russia
Feoktistova O. G., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MSTU CA, Moscow, Russia

tel./fax: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Postgraduates are not charged for the publication of articles in the Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
--

№ 46

2024

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

- Ерохин В. В., Лежанкин Б. В., Болелов Э. А., Урбанский Д. Ю.** Оценка параметров многопозиционной системы наблюдения на основе адаптивного фильтра Калмана 9
- Дроков В. Г., Дроков В. В., Казмиров А. Д., Мурыщенко В. В., Элькес А. А.** Оценка состояния смазываемых узлов трения авиационных двигателей Д-30КП/КП-2 при приёмосдаточных испытаниях 20
- Бельский А. Б., Бурмистров В. П., Лопатин В. В., Чобан В. М.** Предотвращение попадания винтокрылых летательных аппаратов в зону режима «вихревого кольца» на предпосадочных манёврах в режиме висения 32
- Богоявленский А. А., Боков А. Е.** О национальных стандартах в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации и производстве авиационной техники 42
- Олексин С. Л., Шестаков И. Н.** Анализ процесса формирования загруженности контура управления в системе аэронавигационного обслуживания воздушного движения 53
- Калинцев А. С.** Концепция методики учёта тропосферной задержки в широкозонных многопозиционных системах наблюдения при использовании сообщений ADS-B Wx и двухчастотных приёмников ГНСС..... 62

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте

- Горбунов В. П., Чалик И. П.** Адаптация технологий и практик низкобюджетных авиакомпаний в дальнемагистральном сегменте перевозок для повышения транспортной доступности Дальнего Востока 74
- Маркелов М. А., Потураев А. В., Андриенко О. И., Федякин В. И., Кириков Ю. Н.** О противоречиях в требованиях норм лётной годности к диапазону рабочих частот антенн ГЛОНАСС/GPS 86

Горбунов В. П. Метод формирования оптимальной линейки воздушных судов через параметрическое моделирование	96
Борисов Е. Г., Гоцко И. И., Петкау О. Г., Чукалин С. Л., Шестаков И. Н. Определение местоположения источников радиоизлучения при мониторинге пространства пеленгационной парой барражирующих беспилотных летательных аппаратов	106
Фридлянд А. А., Гязова М. М., Меланин В. А. Алгоритм оценки авиационной транспортной доступности регионов России	115
Уласюк Т. Г., Медетбеков Б. Р. Морфологический синтез как основа совершенствования системы обеспечения транспортной безопасности аэропорта	123
Потапова С. Е., Дормидонтов А. В., Аксенова Ю. С. Применение метода фрактального структурирования при оценке устойчивости систем безопасности	131

Интеллектуальные транспортные системы

Мусин С. М., Калий В. А. Реализация алгоритмов управления синхронными генераторами переменной частоты с применением программируемых логических интегральных схем	139
Гаранин С. А., Коньков А. Ю., Шарыпов А. Н. Тенденции в развитии методов защиты данных в распределённых информационных системах авиапредприятия	148

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

No. 46

2024

CONTENTS

Navigation and operation of aircraft

Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A., Urbansky D. Yu. Estimation of parameters of a multi-position surveillance system based on an adaptive Kalman filter	9
Drokov V. G., Drokov V. V., Kazmirov A. D., Muryshchenko V. V., Elkes A. A. Evaluation of condition of lubricated friction units of D-30KP/KP-2 engines after acceptance testing	20
Belskiy A. B., Burmistrov V. P., Lopatin V. V., Choban V. M. Prevention of entry of rotorcraft into the area of “vortex ring” mode for pre-landing maneuvers in hovering mode	32
Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E. On national standards in the field of measurements, testing, instrumental control and ensuring their unity during operation and production of aircraft equipment	42
Oleksin S. L., Shestakov I. N. Analysis of the process of formation of the workload of the control loop in the air navigation service system of air traffic	53
Kalintsev A. S. The concept of a methodology for accounting for tropospheric delay in wide-band multi-position surveillance systems using ADS-B Wx messages and dual-frequency GNSS receivers	62

Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

Gorbunov V. P., Chalik I. P. Adaptation of technologies and practices of low-cost airlines in the long-haul segment transportation in order to improve transport efficiency accessibility of the Far East	74
Markelov M. A., Poturaev A. V., Andrienko O. I., Fedyakin V. I., Kirikov Yu. N. On contradictions in the requirements of the Airworthiness Standards for the operating frequency range of GLONASS/GPS antennas	86

Gorbunov V. P. Method for forming an optimal line of aircraft through parametric modeling	96
Borisov E. G., Gotsko I. I., Petkau O. G., Chukalin S. L., Shestakov I. N. Determining the location of radio emission sources during monitoring of space by a direction finding pair of loitering unmanned aerial vehicles	106
Fridlyand A. A., Gyazova M. M., Melanin V. A. An algorithm for assessing the aviation transport accessibility of Russian regions	115
Ulasyuk T. G., Medetbekov B. R. Morphological synthesis as a basis for improving the airport transport security system	123
Potapova S. E., Dormidontov A. V., Aksenova Yu. S. Application of the fractal structuring method in assessing the stability of security systems	131

Intelligent transport systems

Musin S. M., Kalij V. A. Realization of algorithms of management by synchronous generators of variable frequency with application of programmed logic integrated schemes	139
Garanin S. A., Konkov A. Yu., Sharypov A. N. Trends in the development of data protection methods in distributed information systems of aircraft company	148

Научная статья
УДК 621.396.99

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

В. В. ЕРОХИН¹, Б. В. ЛЕЖАНКИН¹, Э. А. БОЛЕЛОВ², Д. Ю. УРБАНСКИЙ³

¹ Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации, Иркутск, Россия

² Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

³ Восточно-Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-
технических и радиотехнических измерений, Иркутск, Россия

Аннотация. В соответствии с рекомендациями Международной организации гражданской авиации (ИКАО) для защиты от преднамеренных и непреднамеренных искажений информации следует использовать независимые средства наблюдения – вторичные радиолокаторы или многопозиционные системы наблюдения (МПСН). Глобальный аэронавигационный план ИКАО в рамках блока B0-ASUR предполагает развитие систем наблюдения на базе МПСН и автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) в нерадарном воздушном пространстве в целях увеличения пропускной способности воздушного пространства за счёт снижения норм эшелонирования, обеспечения безопасности полётов и эффективности поисково-спасательных операций. Статья посвящена решению актуальной научной задачи по исследованию точностных характеристик МПСН и повышению эффективности определения координат воздушных судов (ВС) в условиях априорной параметрической неопределённости относительно интенсивности шума и принимаемых сигналов. Для повышения достоверности псевдодальномерных измерений предлагается в транспондерах приёмных пунктов МПСН использовать фильтр третьего порядка. Рассмотренный в статье подход позволяет на основе адаптивного фильтра Калмана (АФК) при воздействии случайных возмущений повысить точность оценки времени прихода сигнала, которая в зависимости от интенсивности шумов равномерно распределена в диапазоне от 0 до 15 нс. Повышение точности оценки времени прихода сигнала позволит уменьшить ошибку определения местоположения ВС, конкретное значение которой будет определяться в том числе геометрическим фактором. Показано, что применение АФК, реализующего настройку параметров матричного коэффициента усиления, обеспечивает устойчивое оценивание переменных состояния в условиях, когда законы распределения шумов наблюдений, принятые в модели ошибок МПСН, не соответствуют реальным. Полученные результаты дают возможность повысить точность и эффективность работы МПСН.

Ключевые слова: многопозиционная система наблюдения, адаптивный фильтр Калмана, фильтр третьего порядка, воздушное судно, неопределённость шумов наблюдений, случайные возмущения, аэронавигация

Для цитирования: Ерохин В. В., Лежанкин Б. В., Болелов Э. А., Урбанский Д. Ю. Оценка параметров многопозиционной системы наблюдения на основе адаптивного фильтра Калмана // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 9–19.

ESTIMATION OF PARAMETERS OF A MULTI-POSITION SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON AN ADAPTIVE KALMAN FILTER

V. V. EROKHIN¹, B. V. LEZHANKIN¹, E. A. BOLELOV², D. YU. URBANSKY³

¹ Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia

² Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

³ East Siberian Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements, Irkutsk, Russia

Abstract. In accordance with the recommendations of the International Civil Aviation Organization (ICAO) to protect against intentional and unintentional distortions of information, independent surveillance means should be used - secondary radars or multi-position surveillance systems (MPSS). The ICAO Global Air Navigation Plan within the B0-ASUR block involves the development of surveillance systems based on MPSS and automatic dependent surveillance of the broadcast type (ADS-B) in non-radar airspace in order to increase airspace capacity by reducing separation standards, ensuring flight safety and efficiency search and rescue operations. The article is devoted to solving an urgent research problem of studying the accuracy characteristics of MPSS and increasing the efficiency of determining the coordinates of an aircraft under conditions of a priori parametric uncertainty regarding the intensity of noise and received signals. To increase the reliability of pseudo-range-finder measurements, it is proposed to use a third-order filter in transponders of MPSS receiving points. The approach considered in the article allows, based on the adaptive Kalman filter (AFK) under the influence of random disturbances, to increase the accuracy of estimating the signal arrival time, which, depending on the noise intensity, is uniformly distributed in the range from 0 to 15 ns. Increasing the accuracy of estimating the time of arrival of the signal will reduce the error in determining the location of the aircraft, a specific value, which will be determined, among other things, by the geometric factor. It is shown that the use of an AFK, which implements adjustment of the parameters of the matrix gain, provides stable estimation of state variables in conditions when the distribution laws of observation noise adopted in the MPSS error model do not correspond to real ones.

Keywords: multi-position surveillance system, adaptive Kalman filter, third-order filter, aircraft, observation noise uncertainty, random disturbances, adaptation, air navigation

For citation: Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A., Urbansky D. Yu. Estimation of parameters of a multi-position surveillance system based on an adaptive Kalman filter, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 9–19. (In Russ.)

Введение

В соответствии с рекомендациями ИКАО применение современных средств наблюдения направлено на повышение эффективности воздушных перевозок, увеличение пропускной способности воздушного пространства и аэродромов, а также обеспечение безопасности полётов и наземных операций [1]. Концепция внедрения автоматического зависимого наблюдения предполагает его развитие до функционала МПСН за магистральными ВС и ВС авиации общего назначения на всех этапах полёта, что позволит обеспечить необходимую пропускную способность при формировании эффективных траекторий движения, в том числе при реализации концепции свободной маршрутизации полётов. Совершенствование систем наблюдения в аэронавигации также важно для повышения точности планирования операций по обслуживанию прибывающих ВС на аэродромах за счёт использования высокоточной информации о местоположении ВС с высоким темпом обновления¹. Согласно проекту «Стратегии развития аэронавигационной системы Российской Федерации до 2030 года»² применение МПСН повысит точность наблюдения и, в перспективе, снизит затраты на наземную инфраструктуру.

¹ Концепция внедрения автоматического зависимого наблюдения на основе единого стандарта с развитием до функционала многопозиционных систем наблюдения в Российской Федерации: утв. распоряжением Минтранса России от 25 апреля 2018 года № 68.

² Проект Стратегии развития аэронавигационной системы России до 2030 года. Руководящие документы, информационные и аналитические материалы ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», 2021.

МПСН входят в состав современных средств наблюдения. Принцип функционирования МПСН основан на разностно-дальномерном методе определения местоположения в пространстве, при котором сигнал, переданный транспондером ВС, принимается пространственно-разнесёнными наземными станциями в разные моменты времени. МПСН широко применяются для навигационно-временного обеспечения наземных и воздушных объектов, точность определения координат которых зависит от значения геометрического фактора ослабления сигналов на трассе распространения радиоволн, влияния шумов и помех. При этом в реальных условиях функционирования МПСН статистические характеристики шумов и помех, а именно, закон распределения и его параметры зачастую неизвестны [2–4].

С учётом сказанного можно сделать вывод о том, что исследование точностных характеристик МПСН и повышение точности определения координат ВС в условиях априорной параметрической неопределённости относительно интенсивности шума и принимаемых сигналов являются актуальными.

Цель статьи – повышение точности определения параметров траекторного движения ВС в МПСН путём снижения ошибки оценки времени прихода сигнала на основе АФК с учётом априорной неопределённости вероятностных характеристик ошибок измерений.

Постановка задачи

Для повышения достоверности разностно-дальномерных измерений предлагается в следящей системе приёмника наземной станции МПСН использовать фильтр третьего порядка, выполняющий обработку двух наблюдений: псевдодальномерного $\xi_{\tau,t}$ и псевдодоплеровского $\xi_{\omega,t}$ [5, 6]:

$$\xi_{\tau,t} = \tau_t + n_{\tau,t}, \quad (1)$$

$$\xi_{\omega,t} = \omega_t + n_{\omega,t}, \quad (2)$$

где τ_t – время задержки огибающей сигнала; ω_t – доплеровское смещение частоты; $n_{\tau,t}$ – шум наблюдения по задержке огибающей сигнала с дисперсией $D_{n_{\tau,t}}$; $n_{\omega,t}$ – шум наблюдения по частоте с дисперсией $D_{n_{\omega,t}}$; t – время.

Модель изменения оцениваемых параметров представим уравнениями [5, 6]:

$$\tau_t = \tau_{t-1} + TV_{\tau,t-1}, \quad (3)$$

$$V_{\tau,t} = V_{\tau,t-1} + n_{V,t-1}, \quad (4)$$

$$\omega_t = 2\pi f_0 V_{\tau,t}, \quad (5)$$

где $n_{V,t}$ – дискретный белый гауссовский шум с дисперсией $D_{n_{V,t}}$; T – интервал времени наблюдения; $V_{\tau,t}$ – скорость изменения времени задержки; f_0 – несущая частота сигнала.

Вектор состояния оцениваемых параметров приёмника наземной станции МПСН выглядит следующим образом:

$$\lambda_t = [\tau_t \ V_{\tau,t} \ \omega_t]^T, \quad (6)$$

Уравнение наблюдения представим в векторно-матричном виде:

$$\xi_t = H_t \lambda_t + \mathbf{n}_t,$$

где $H_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица перехода пространства состояний в пространство разностно-дальномерных измерений приёмника наземной станции МПСН; ξ_t – вектор псевдодальномерно-псевдодоплеровских наблюдений; $\mathbf{n}_t$ – вектор шумов наблюдений.

Задача определения местоположения на основе мультilaterационной технологии заключается в определении координат ВС путём обработки моментов прихода сигналов от бортовых транспондеров на приёмных станциях МПСН на основе метода разностно-дальномерных измерений.

Синтез алгоритма

Выполним синтез алгоритма псевдодальномерных измерений (1), (2) применительно к априорной модели динамики переменных вектора состояния, которая для повышения достоверности псевдодальномерных измерений по сравнению с фильтром 2-го порядка определяется выражениями (3)–(5) [5] на основе фильтра третьего порядка оптимального по критерию:

$$J_t = \text{tr} M \{ (\lambda_t - \hat{\lambda}_t)(\lambda_t - \hat{\lambda}_t)^T \} = \min,$$

где tr – след матрицы; λ_t – вектор состояния; $\hat{\lambda}_t$ – оценка вектора состояния; M – символ операции математического ожидания; J_t – минимум следа ковариационной матрицы (критерий оптимальности).

Уравнение прогноза вектора состояния оцениваемых параметров приёмника наземной станции МПСН запишем следующим образом:

$$\tilde{\lambda}_t = \Phi_t \hat{\lambda}_{t-1}, \quad (7)$$

где матрица динамики имеет следующий вид:

$$\Phi_t = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2\pi f_0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Прогноз матрицы ковариации описывается выражением

$$P_t = \Phi_t P_{t-1} \Phi_t^T + G_t Q_t G_t^T, \quad (8)$$

где P_t – ковариационная матрица ошибок фильтрации вектора состояния; Q_t – ковариационная матрица шумов процесса.

Матрицу интенсивности шумов измерений G_t конкретизируем следующим образом:

$$G_t = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение оценки переменных вектора состояния на основе фильтра Калмана (ФК) имеет вид:

$$\hat{\lambda}_t = \tilde{\lambda}_t + K_t (\xi_t - H_t \tilde{\lambda}_t), \quad (9)$$

где K_t – матричный коэффициент усиления ФК, который рассчитывается по формуле:

$$K_t = \Phi_t P_{t-1} \Phi_t^T H_t^T [H_t \Phi_t P_{t-1} \Phi_t^T H_t^T + R_t]^{-1}, \quad (10)$$

где R_t – матрица ковариации шумов наблюдений.

Невязку фильтра Калмана представим в виде:

$$\Delta_t = \xi_t - H_t \tilde{\lambda}_t. \quad (11)$$

Тогда уравнение (9) для апостериорной оценки вектора состояния запишем следующим образом:

$$\hat{\lambda}_t = \tilde{\lambda}_t + K_t \Delta_t. \quad (12)$$

Матрицу ковариаций ФК представим в виде

$$P_t = \{I - K_t H_t\} P_{t|t-1}, \quad (13)$$

где I – единичная матрица.

В условиях априорной параметрической неопределённости относительно интенсивности шума фактические значения элементов матрицы ковариаций шума наблюдения R_t неизвестны. Матрица R_t может быть определена путём статистического анализа невязки с последующим применением адаптивного фильтра Калмана (АФК) [7–10].

С целью адаптации процесса фильтрации предлагается применить масштабирующую матрицу, чтобы получить такую матрицу R_t , при которой действительные (фактические) ошибки оценивания времени прихода сигнала $\delta_\tau = \tau - \hat{\tau}$ и их расчётные (теоретические) среднеквадратические значения $\sigma_\tau = \sqrt{P_\tau}$, получаемые в результате решения уравнения (13) относительно прогноза ковариационной матрицы P_t , совпадали. Отличие действительных и расчётных значений приводит к увеличению элементов матрицы R_t , соответствующих дисперсиям шумов наблюдений, которые имеют наибольшую интенсивность. Таким образом, при формировании вектора оценок переменных состояния АФК не учитывает измерения с большими ошибками.

Для настройки матрицы ковариации шума в алгоритм ФК вводится специальная матрица, состоящая из нескольких масштабных коэффициентов S_t [7–9]. Изменения ковариации шума наблюдения приводят к изменению элементов матрицы S_t , что непосредственно повлияет на матричный коэффициент усиления АФК:

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T \left[H_t P_{t|t-1} H_t^T + S_t R_t \right]^{-1}. \quad (14)$$

где $P_{t|t-1} = \Phi_t P_{t-1} \Phi_t^T$, $S_t = \left[\frac{1}{w} \sum_{j=k-w+1}^k \Delta_j \Delta_j^T - H_t P_{t|t-1} H_t^T \right] R_t^{-1}$, w – размер скользящего окна, k – количество отсчётов, j – отсчёт вектора невязки фильтра Калмана.

В случае увеличения интенсивности шумов наблюдения и отклонению их от модельных значений, принятых в алгоритме, элементы матрицы масштабных коэффициентов S_t , которые представляют некорректные элементы вектора невязок Δ_t , возрастают. Это приводит к росту значений элементов в соответствующих столбцах матричного коэффициента усиления K_t . На основе вариантов схемных реализаций классического ФК [10] предложена упрощённая структурная схема стохастической системы оценки вектора состояния на основе АФК (рис. 1).

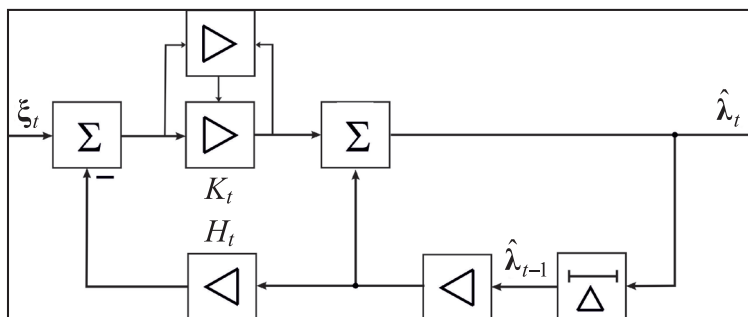


Рис. 1. Схема системы оценки вектора состояния на основе АФК

Результаты моделирования синтезированного алгоритма и исследования его характеристик

В статье выполнено исследование характеристик МПСН на основе исходных данных, представленных в Сертификационных требованиях³ [11]. Для канала обмена данными имитировались шумы системы и измерений. При выполнении исследований алгоритма АФК, представленного уравнениями (9)–(14) следящей системы за задержкой сигнала, начальное значение матрицы ковариации шума измерений R_t берётся из единичной матрицы I .

Результаты исследований характеристик синтезированного алгоритма представлены на рис. 2–9. На рис. 2 показаны фактическая ошибка определения времени задержки $\delta_\tau = \tau - \hat{\tau}$ и расчётное среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_\tau = \sqrt{P_\tau}$ (P_τ – диагональный элемент ковариационной матрицы ошибок оценивания P_t).

На рис. 2, рис. 3 показаны графики изменения СКО оценки σ_τ и σ_{V_τ} , а также фактические ошибки оценивания δ_τ и δ_{V_τ} , полученные на основе классического ФК, выражения (9)–(13). Графики показывают динамику изменения ошибок фильтрации, когда реальное СКО шума наблюдения превышает расчётное значение в 5 раз. Очевидно, что фактическая ошибка оценивания δ_τ превышает расчётное значение СКО σ_τ , что свидетельствует о расхождении процесса оценивания.

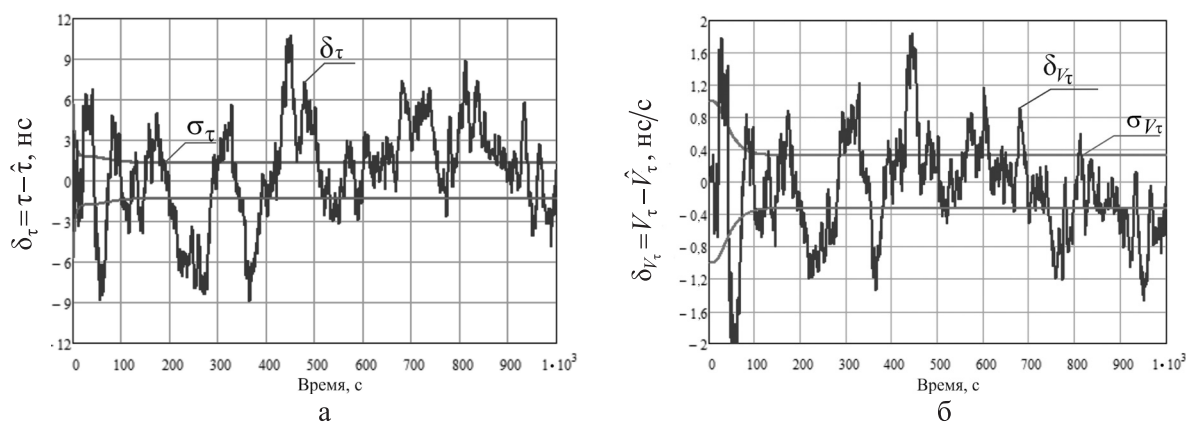


Рис. 2. Ошибка оценки времени задержки – а, и ошибка скорости изменения времени задержки – б, полученные ФК при расхождении

Сравнение рис. 2, а и рис. 2, б показывает, что в ситуациях, когда действительные значения интенсивности шума наблюдения D_{n_τ} отличаются от принятых в алгоритме ФК R_t , процесс получения оценки на выходе классического ФК может оказаться расходящимся ($\delta_\tau > 3\sigma_\tau$).

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики ошибок оценок и СКО, полученных при реализации алгоритма (9)–(14). Очевидно, что с применением АФК фактические ошибки оценки времени задержки и скорости изменения времени задержки находятся в «коридоре» расчётных значений σ_τ и σ_{V_τ} на выходе фильтра.

Таким образом, в таких же условиях априорной параметрической неопределённости шумов наблюдений применение АФК позволяет в среднем на (5–7) нс повысить точность оценивания переменных вектора состояния относительно классического ФК.

На рис. 5, а и рис. 5, б представлены графики изменения коэффициентов усиления АФК.

Из графиков рис. 5, а и рис. 5, б видно как изменяются элементы матричного коэффициента усиления в зависимости от дисперсии шумов наблюдений.

³ Сертификационные требования (Базис) к многопозиционным системам наблюдения широкозонным [согл. письмом Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации № 08-04/5228ИС от 15 мар. 2018г.]. 10 с.

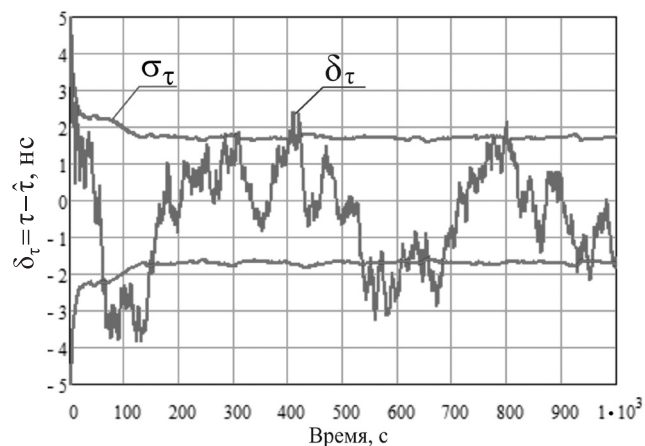


Рис. 3. Ошибка оценки времени задержки, полученная на выходе АФК

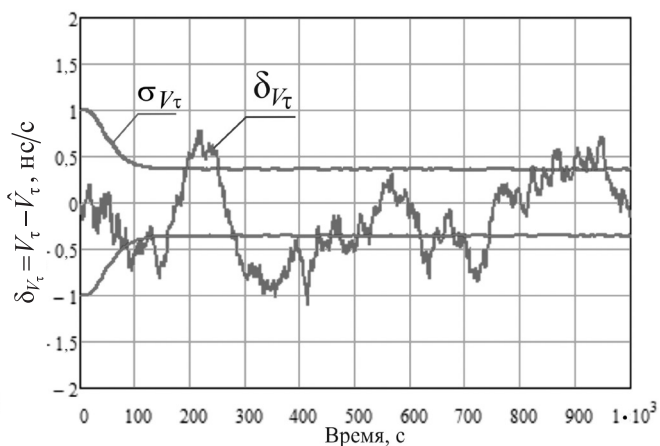


Рис. 4. Ошибка оценки скорости изменения времени задержки, полученная АФК

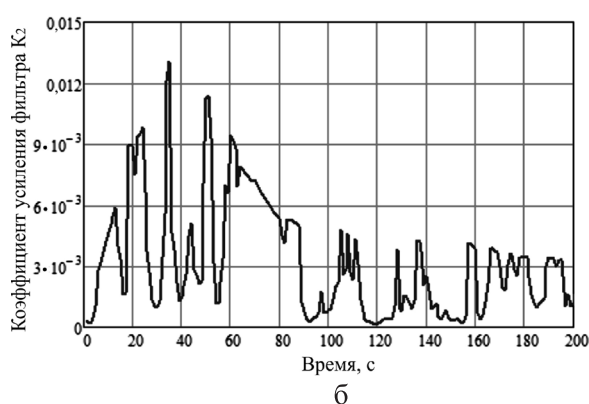
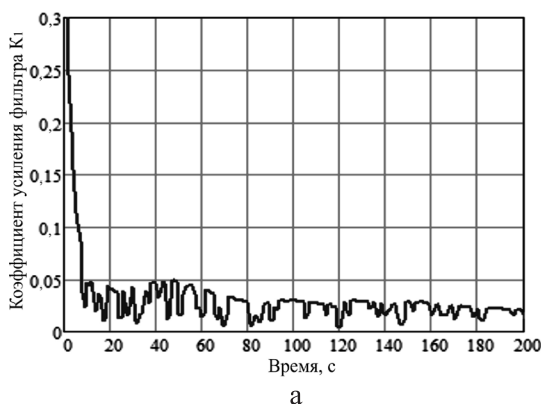


Рис. 5. Графики изменения коэффициентов усиления фильтра: K_1 – а; K_2 – б

На рис. 6, а представлены графики расчётной (теоретической) дисперсии ошибки оценки времени задержки, полученные на выходах традиционного и адаптивного ФК в составе ковариационной матрицы ошибок оценки. На рис. 6, б приведены графики фактической дисперсии ошибки оценки времени задержки, полученные для классического и адаптивного ФК.

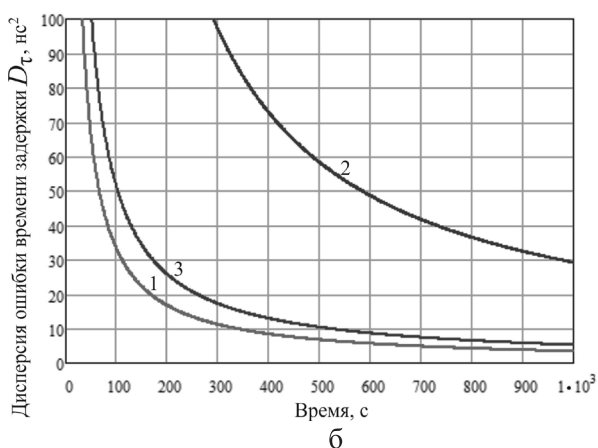
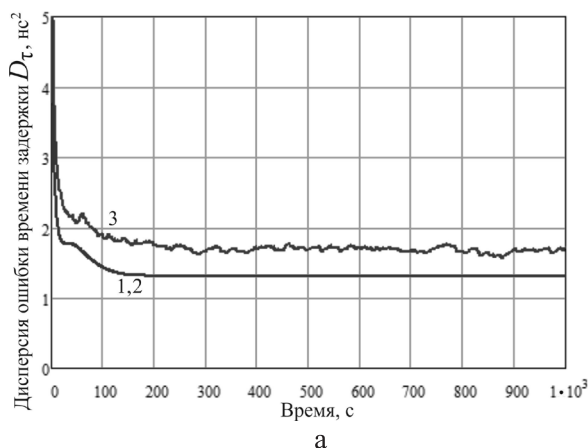


Рис. 6. Дисперсия ошибки оценки времени задержки: расчётная – а; фактическая – б
На графиках: 1 – традиционный ФК при отсутствии расходимости; 2 – традиционный ФК при расходимости; 3 – адаптивный ФК

Сравнение рис. 6, а и рис. 6, б показывает, что дисперсия ошибки оценки времени задержки, полученная в результате решения уравнения (13), относительно ковариационной матрицы P_t в алгоритме АФК увеличилась на 0,5 нс по сравнению с аналогичными расчётами в алгоритме классического ФК. При этом происходит уменьшение действительной дисперсии ошибки оценки времени задержки сигнала и повышение стабильности оценки параметров.

На рис. 7 представлены результаты исследования гипотетической ситуации для случая совпадения модельных и фактических значений дисперсии шумов измерений. На рис. 7, а представлены графики расчётной (теоретической) дисперсии ошибки оценки времени задержки, полученные на выходах традиционного ФК и АФК в составе ковариационной матрицы ошибок оценивания.

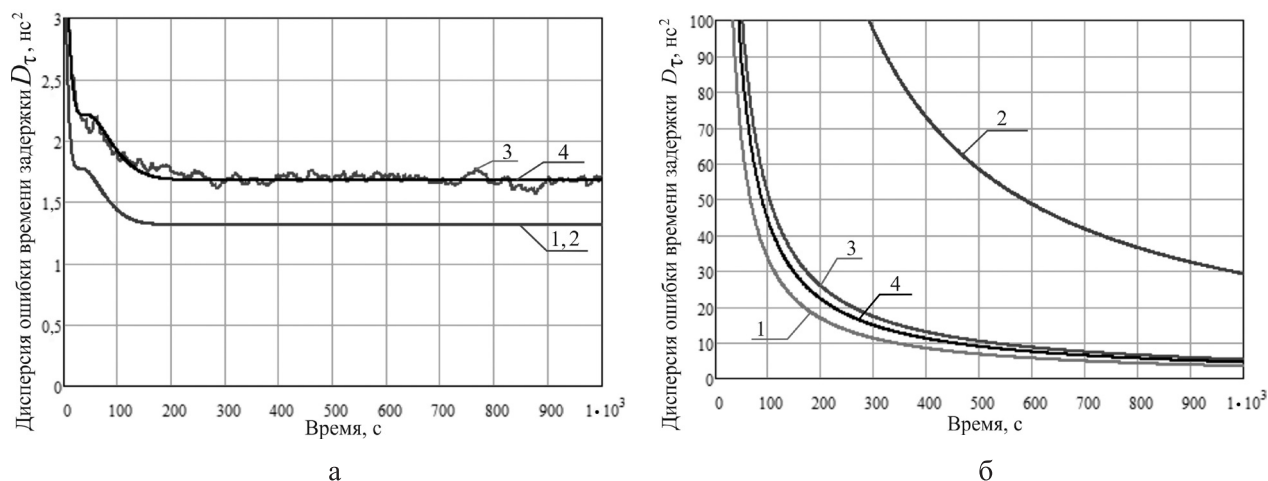


Рис. 7. Дисперсия ошибки оценки времени задержки в рассматриваемой гипотетической ситуации: расчётная – а; фактическая – б

На графиках: 1 – ФК при отсутствии расходимости; 2 – ФК при расходимости; 3 – АФК; 4 – ФК при совпадении модельной и фактической дисперсии шумов измерений

Анализ результатов показывает наличие эффекта расходимости классического ФК при воздействии шумов, в то же время применение АФК для оценки параметров МПСН позволяет устранить эффект расходимости и повысить на (5–7) нс точность оценки времени задержки сигнала для исходных данных, принятых при моделировании точности оценки параметров МПСН.

В результате адаптации элемент невязки, обусловленный большим значением ошибки, оказывает меньшее влияние на процесс оценивания вектора состояния λ , что позволяет действительную ошибку на выходе АФК уменьшить в 2 раза по сравнению с классическим ФК, вне зависимости от ошибок наблюдения.

При проведении исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, вопросы обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения авторами не рассматривались. Поэтому в дальнейшем перед практическим применением полученных результатов потребуется провести метрологическую экспертизу разработанной методологии с учётом принципов и критериев, изложенных в [12], а также метрологическую аттестацию этой методологии для оценки числовых значений ошибок с использованием алгоритмов, представленных в [13], в том числе для исключения возникновения метрологических рисков негативных ситуаций.

Заключение

Предложенный в статье подход позволяет повысить точность оценки времени задержки сигнала на (5–7) нс для исходных данных, принятых при моделировании, и эффективность определения местоположения ВС в МПСН при воздействии случайных возмущений. Полученные

авторами результаты показывают наличие эффекта расходимости классического ФК при воздействии шумов, в то же время применение АФК позволяет устранить эффект расходимости и повысить точность оценки параметров МПСН. Применение АФК, реализующего настройку параметров матричного коэффициента усиления, обеспечивает возможность устойчивого оценивания переменных состояния в условиях отличия реальной дисперсии шума наблюдения D_{n_t} от значения, принятого в алгоритме при формировании элементов матрицы R_t . Процесс адаптации заключается в изменении масштабных коэффициентов матричного коэффициента усиления фильтра и матрицы ковариации шумов наблюдений, что обеспечивает оценки времени задержки прихода сигнала на уровне (2–3) нс МПСН.

В условиях априорной неопределённости вероятностных характеристик ошибок измерений для повышения точности определения местоположения ВС в МПСН предлагается в следящей системе приёмника наземной станции МПСН использовать фильтр третьего порядка на основе алгоритма адаптивного фильтра Калмана, применение которого приведёт к снижению ошибки оценки времени прихода сигнала (5–7) нс.

Полученные результаты предполагается внедрить в многопозиционных системах наблюдения, основанных на мультilaterационных технологиях АЗН-В, «Альманах» и «Мера» на базе филиала «Аэронавигация Восточной Сибири» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Дос 9924 ИКАО. Руководство по авиационному наблюдению. Изд. 3. ИКАО, Монреаль, 2020. 432 с.
2. Болелов Э. А., Гевак Н. В., Кудинов А. Т., Лежанкин Б. В., Ерохин В. В., Межетов М. А. Системы наблюдения на воздушном транспорте. Конкретные средства наблюдения. Многопозиционные системы наблюдения. Москва: ИД Академии Жуковского, 2023. 80 с. <https://elibrary.ru/UPSCGQ>
3. Арефьев Р. О., Туринцев С. В., Туринцева М. С. Применение помехоустойчивого кодирования при обработке сообщений локальной корректирующей станции // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2021. С. 22–32. <https://elibrary.ru/YMDPPC>
4. Межетов М. А., Шалаев А. А. Реализация алгоритма распознавания сигналов в системе мониторинга авиационных линий связи // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвящённой празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2022. С. 71–79. <https://elibrary.ru/WVIACD>
5. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Радиотехника, 2010. 800 с.
6. Лежанкин Б. В., Ерохин В. В., Марюхненко В. С. Системный анализ задачи определения местоположения воздушного судна в многопозиционной системе наблюдения // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2019. № 1(2). С. 46–61. <https://elibrary.ru/ZDOOGT>
7. Эркек Т. Ю., Гаджиев Ч. Оценка параметров относительного движения спутников при групповом полёте с помощью адаптивного обобщённого фильтра Калмана // Гирокоспия и навигация. 2023. Т. 31. № 2(121). С. 86–105. <https://elibrary.ru/KQZBSP>
8. Hajiyev C., Soken H. E. Robust estimation of UAV dynamics in the presence of measurement faults. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, vol. 25(1), pp. 80–89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000095)

9. Huang S., Wu Z., Misra A., A practical, robust and fast method for location localization in range-based systems. *Sensors*, 2017, vol. 17(12), 2869. <https://doi.org/10.3390/s17122869>
10. Bruce. P. Gibbs. *Advanced Kalman filtering, least-squares and modeling: a practical handbook*. John Wiley & Sons, Inc. 2011, 627 p.
11. Машошин А. О. Вопросы избыточности в задаче определения местоположения воздушного судна разностно-временным методом // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. № 224. С. 147–156.
12. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Об опыте проведения метрологической экспертизы технической документации на авиационную технику: критерии, методология, результаты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14(325). С. 40–55.
13. Богоявленский А. А. Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31–41.

References

1. Doc 9924 ICAO. Aeronautical Surveillance Manual. 3th ed. ICAO, Montreal, 2020, 398 p.
2. Bolotov E. A., Gevak N. V., Kudinov A. T., Lezhankin B. V., Erokhin V. V., Mezhetov M. A. *Sistemy nablyudeniya na vozdushnom transporte. Konkretnye sredstva nablyudeniya. Mnogopozitsionnye sistemy nablyudeniya [Air transport surveillance systems. Specific surveillance facilities. Multiposition surveillance systems]*. Moscow. Publishing House of the Zhukovsky Academy, 2023, 80 p. (In Russ.)
3. Arefev R. O., Turintsev S. V., Turintseva M. S. Primenenie pomekhoustoichivogo kodirovaniya pri obrabotke soobshchenij lokal'noj korrektruyushchej stantsii. *Current problems and prospects for the development of civil aviation. Collection of works of XI International Scientific and Practical Conference*, Irkutsk, 14–15 October 2021, vol. 2, Irkutsk Branch of the MSTU CA Publ., pp. 22–32. (In Russ.)
4. Mezhetov M. A., Shalaev A. A. Realizatsiya algoritma raspoznavaniya signalov v sisteme monitoringa aviatsionnykh liniy svyazi. *Current problems and prospects for the development of civil aviation. Collection of works of XI International Scientific and Practical Conference*, Irkutsk, 13–14 October 2022, vol. 2, Irkutsk Branch of the MSTU CA Publ., pp. 71–79. (In Russ.)
5. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya. Pod red. A. I. Perova, V. N. Harisova. 4th ed., revised and extended. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)
6. Lezhankin B. V., Erokhin V. V., Mariukhnenko V. S. System analysis of the problem of determining the location of the aircraft in the multipositional observation system, *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*, 2019, no. 1(2), pp. 46–61. (In Russ.)
7. Erkek T. Y., Hajiyevev Ch. Estimation of the relative states of satellite formation flights using the adaptive extended Kalman filter, *Gyroscopy and navigation*, 2023, no. 2(121), pp. 86–105. (In Russ.)
8. Hajiyevev C., Soken H. E. Robust estimation of UAV dynamics in the presence of measurement faults. *Journal of Aerospace Engineering*, 2012, vol. 25(1), pp. 80–89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000095).
9. Huang S., Wu Z., Misra A., A practical, robust and fast method for location localization in range-based systems. *Sensors*. 2017, vol. 17(12), 2869. <https://doi.org/10.3390/s17122869>.
10. Bruce. P. Gibbs. *Advanced Kalman filtering, least-squares and modeling: a practical handbook*. John Wiley & Sons, Inc. 2011, 627 p.
11. Mashoshin A. O. Voprosy izbytochnosti v zadache opredeleniya mestopolozheniya vozdushnogo sudna raznostno-vremennym metodom. *Civil Aviation High Technologies*. 2016, no. 224, pp. 147–156. (In Russ.)
12. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E. On the experience of conducting metrological examination of technical documentation for aviation equipment: criteria, methodology, results, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 14(325), pp. 40–55. (In Russ.)
13. Bogoyavlensky A. A. Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements during the operation of ground-based automated control systems for on-board equipment of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 37, pp. 31–41. (In Russ.)

Информация об авторах

Ерохин Вячеслав Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия, ww_erohin@mail.ru

Лежанкин Борис Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия, lezhbor@mail.ru

Болелов Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, e.bolelov@mstuca.aero

Урбанский Дмитрий Юрьевич, инженер, Восточно-Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Иркутск, Россия, urbdim.ru@gmail.com

Authors information

Erokhin Vyacheslav V., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of Department, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, ww_erohin@mail.ru

Lezhankin Boris V., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, lezhbor@mail.ru

Bolelov Eduard A., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, e.bolelov@mstuca.aero

Urbansky Dmitry Yu., Engineer, East Siberian Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Engineering Measurements, Irkutsk, Russia, urbdim.ru@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.02.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 18.06.2024.

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 10.06.2024; accepted for publication 18.06.2024.

Научная статья
УДК 629.735.03.063.7

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СМАЗЫВАЕМЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Д-30КП/КП-2 ПРИ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В. Г. ДРОКОВ¹, В. В. ДРОКОВ¹, А. Д. КАЗМИРОВ¹, В. В. МУРЫЩЕНКО¹, А. А. ЭЛЬКЕС²

¹ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

² ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия

Аннотация. При проведении приёмо-сдаточных испытаний (ПСИ) для контроля состояния узлов трения двигателей Д-30КП/КП-2 предложен СВЧ плазменный метод, позволяющий количественно оценивать параметры частиц изнашивания в пробах масел, отобранных из коробок приводов, и пробах смывов с основного маслофильтра. Разработаны статистические модели исправного состояния двигателя, рекомендованного к эксплуатации после ПСИ. Найдены диагностические признаки по параметрам частиц изнашивания, позволяющие на этапе ПСИ с наибольшей вероятностью выявлять двигатели с возможным повреждением. Для двигателей, прошедших ПСИ, имеющих повышенные параметры частиц относительно контрольных значений, даны рекомендации по дальнейшему отбору проб масел и смыва с маслофильтра для снижения вероятности возникновения инцидента в эксплуатации.

Ключевые слова: приёмо-сдаточные испытания, техническое состояние, частицы изнашивания, маслосистема, статистическая модель двигателя, авиационный двигатель, методика диагностирования, СВЧ плазменный анализатор, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Дроков В. Г., Дроков В. В., Казмиров А. Д., Мурыщенко В. В., Элькес А. А. Оценка состояния смазываемых узлов трения авиационных двигателей Д-30КП/КП-2 при приёмо-сдаточных испытаниях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 20–31.

EVALUATION OF CONDITION OF LUBRICATED FRICTION UNITS OF D-30KP/KP-2 ENGINES AFTER ACCEPTANCE TESTING

V. G. DROKOV¹, V. V. DROKOV¹, A. D. KAZMIROV¹, V. V. MURYSHCHENKO¹, A. A. ELKES²

¹ Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

² PJSC “UEC-Saturn”, Rybinsk, Russia

Abstract. When conducting acceptance testing, a microwave plasma analyzer was proposed as a method for monitoring the condition of friction units of D-30KP/KP-2 engines. The analyzer allows you to quantitatively evaluate the parameters of wear particles in samples taken from drive boxes and washouts from the main oil filter. Statistical models of the engine condition recommended for operation after acceptance testing have been developed. Diagnostic signs have been found based on the parameters of wear particles, which make it possible at the acceptance testing stage to most likely identify engines with possible damage. For engines with increased particle parameters during acceptance testing, recommendations were given for further sampling of oils and rinsing from the oil filter in order to reduce the likelihood of an incident in operation.

Keywords: acceptance tests, technical condition, wear particles, oil system, statistical model of the engine, aircraft engine, diagnostic technique, microwave plasma analyzer, operation of aircraft

For citation: Drovkov V. G., Drovkov V. V., Kazmirov A. D., Muryshchenko V. V., Elkes A. A. Evaluation of condition of lubricated friction units of D-30KP/KP-2 engines after acceptance testing, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 20–31. (In Russ.)

Введение

Статистические данные по авиационным двигателям Д-30КП/КП-2 показывают, что часть повреждений, связанных с отказами узлов, омываемых смазочным маслом, с наибольшей вероятностью происходит в начальный период их эксплуатации. Так, например, по указанному типу двигателей было возвращено из эксплуатации по браковочному признаку «стружка в масле» $\approx 20\%$ от общего числа двигателей с наработкой ≤ 500 ч [1]. По результатам заводских исследований выявлено, что большинство событий связано с качеством изготовления поверхностей трения деталей, правильностью сборки сопряжений, нагрузкой, температурой поверхностей узлов трения, качеством смазки. Такое положение вещей известно и связано с процессом приработки смазываемых деталей [2, 3]. Тем не менее значительное количество публикаций, посвящённых приработке, свидетельствует о том, что этот вопрос с повестки моторостроителей не снят [3–5].

Двигатель при проведении ПСИ находится на стенде, как правило, ≤ 15 ч. Очевидно, что такого времени для большей части двигателей недостаточно для полного завершения процесса приработки.

В этой связи было высказано предположение, что часть двигателей, возвращённых в ремонт по браковочному признаку «стружка в масле», отправлялась на предприятия с начальными признаками повреждений, развитие которых в процессе эксплуатации авиационной техники приводило к их досрочному съёму.

Причиной повышенного уровня отказов в начале эксплуатации является недостаточное совершенство методов контроля, приводящее к тому, что двигатели со скрытыми повреждениями выходят из строя вскоре после начала работы. Основным средством снижения интенсивности отказов в начальный период эксплуатации является совершенствование контроля выпускаемых двигателей и повышение эффективности заводских испытаний готовой продукции.

Целями работы являлись:

- оценка возможности использования СВЧ плазменного анализатора в качестве метода контроля технического состояния при проведении ПСИ двигателей Д-30КП/КП-2;
- разработка методик измерения параметров частиц изнашивания по пробам масел с передней и задней коробок приводов и смылов с маслофильтров для двигателей Д-30КП/КП-2 при проведении ПСИ;
- разработка двух эталонных математических статистических моделей исправных двигателей, прошедших ПСИ по результатам СВЧ плазменного анализа проб масел и смылов с основного маслофильтра МФС-30;
- разработка методики выявления двигателей с повышенными параметрами частиц изнашивания и возможными признаками повреждений;
- выработка рекомендаций по снижению количества досрочно возвращаемых двигателей из эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Изменение износа деталей во времени в общем случае можно представить в виде модели, которая приводится в [6] (рис. 1).

В начальный период работы (1 уч.), называемый периодом приработки, наблюдается довольно быстрый износ деталей. Продолжительность этого периода в разных источниках оценивается от 6 до 100 ч и обычно составляет (1,5–2,0) % ресурса узла трения.

После приработки наступает период установившегося режима изнашивания, определяющий долговечность сопряжений, так называемый период нормальной эксплуатации газотурбинного двигателя (ГТД) (2 уч.). На этом этапе измеренная величина массовой доли частиц изнашивания не меняется с наработкой, её величина является граничным значением, характеризующим нормальный износ деталей двигателя.

Третий период (3 уч.) – период катастрофического изнашивания – характеризует предельное состояние механизма и ограничивает ресурс: износ нарастает, повреждение прогрессирует, размер частиц увеличивается до 60 мкм.

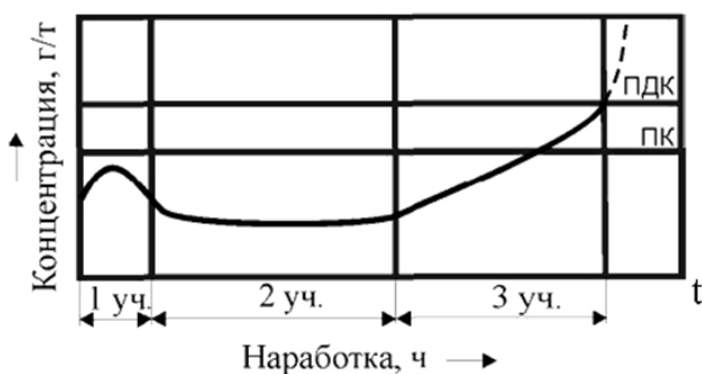


Рис. 1. Характер изменения содержания (массовой доли) частиц изнашивания в пробе масла при эксплуатации [6]

На рис. 1: ПК – повышенная концентрация, повышенное содержание частиц в масле, при котором двигатель допускается эксплуатировать под «особым контролем»; ПДК – предельно допустимая концентрация, предельно допустимое содержание, при достижении которого двигатель подлежит отстранению от эксплуатации.

На стадии приработки (1 уч.) могут наблюдаться частицы изнашивания в виде сфер, пластинок и чешуек размером (1–20) мкм. Максимальный размер частиц, образующихся в процессе приработки, достигает 100 мкм, но после окончания процесса приработки эти частицы оседают на фильтрах и уже не оказывают влияния на нормальное изнашивание, а при установившемся изнашивании (2 уч.) – в виде пластинок и чешуек размером ≤ 15 мкм [4].

Узлы двигателя, омываемые смазочным маслом, после ПСИ признаются годными к эксплуатации в случаях отсутствия стружки на контрольных элементах, низкого уровня вибрации и не превышающей заданного контрольного значения величины массовой доли металлической примеси в пробе масла, измеренной спектральным методом.

Исправность узлов маслосистемы несложно определить при установившемся равновесном режиме изнашивания (2 уч.). В этом случае для каждого из трёх указанных методов оценки состояния двигателей имеется нормативная документация с контрольными значениями параметров. Если измеренные значения параметров не превышают контрольных – двигатель признаётся исправным.

Значительно сложнее оценить достоверность технического состояния двигателя по результатам спектральных измерений после проведения ПСИ (1 уч.). При малой наработке двигателя практически невозможно отличить приработку от повышенного износа.

Можно предполагать, что на данном этапе разброс по параметрам частиц изнашивания от двигателя к двигателю, в частности по размерам частиц изнашивания, может быть значительным. С целью подтверждения данного предположения после стендовых испытаний двигателей

Д-30КП/КП-2 были отобраны пробы смывов с маслофильтров и для некоторых из них проведены измерения размеров металлических частиц с помощью микрорентгеноспектрального анализатора JXA-8200 (Jeol Ltd., Япония). Методика выделения частиц и измерения размеров описана в [7].

На рис. 2, рис. 3 показаны распределения металлических частиц изнашивания по размерам в пробах смывов двигателей Д-30КП-2, прошедших ПСИ.

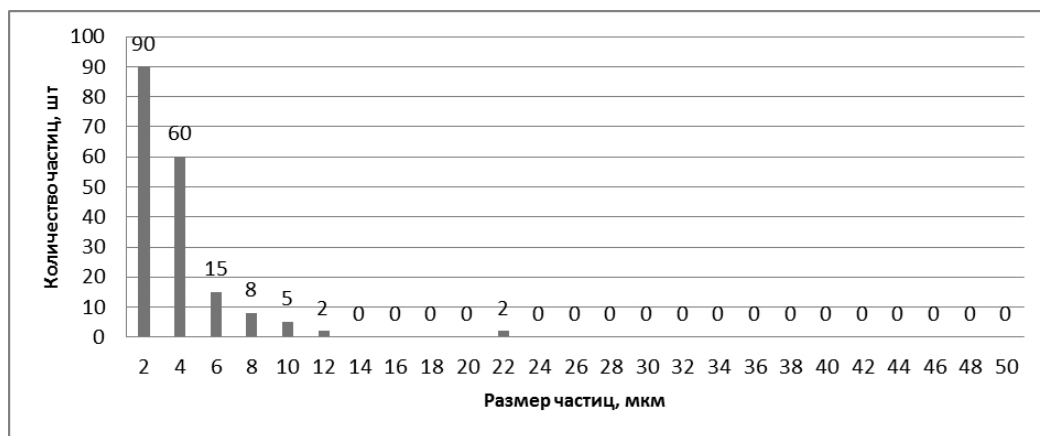


Рис. 2. Диаграмма распределения по размерам частиц, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 № 190-041 после ПСИ, наработка – 5 ч 29 мин

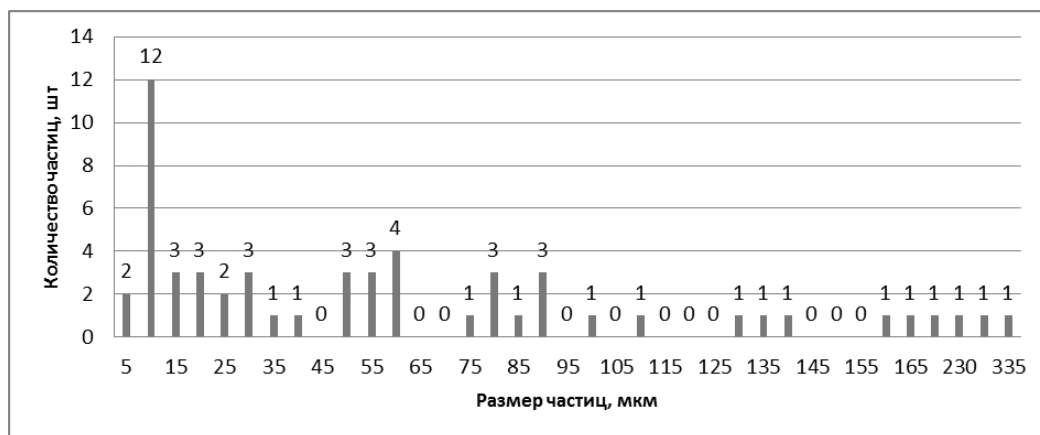


Рис. 3. Диаграмма распределения по размерам частиц, смытых с маслофильтра исправного двигателя Д-30КП-2 № 42-085 после ПСИ, наработка – 6 ч 13 мин

Из рис. 2 и рис. 3 следует, что для рассматриваемых двигателей при сравнительно близких значениях наработки распределения частиц по размерам значительно различаются. Так распределение на рис. 2 имеет ярко выраженный максимум, в то время как для двигателя № 42-085 (рис. 3) распределение оказалось фактически равномерным. При этом правая сторона распределения для двигателя № 190-041 ограничена размером частиц 22 мкм, а в двигателе № 42-085 распределение заканчивается при размерах частиц 335 мкм. Если принимать диагностическое решение по состоянию рассматриваемых двигателей только с учётом формы распределений, то, вероятнее всего, первый двигатель можно рекомендовать к эксплуатации, для второго процесс приработки не завершён, и для оценки его состояния необходимы соответствующее оборудование и методика диагностирования.

В [8] для оценки технического состояния узлов, омываемых смазочным маслом авиационных двигателей, был использован СВЧ плазменный (сцинтилляционный) метод анализа.

Анализировались пробы масел и смывы с маслофильтров, направленных из эксплуатирующих организаций. Пробы после проведённых приёмо-сдаточных испытаний на анализ не поступали.

В процессе разработки и отработки методики оценки состояния двигателей Д-30КП/КП-2/КУ/КУ-154 по результатам анализа проб, доставленных из эксплуатации СВЧ плазменным методом, набран необходимый статистический материал по параметрам частиц изнашивания для исправных двигателей. По полученным результатам построены эталонные статистические модели исправных двигателей для проб масла и смыва с маслофильтра, а также методика диагностирования, с помощью которых оценивалось техническое состояние двигателей в диапазонах наработок (0–500) ч, (500–1000) ч, (1000–2000) ч, (2000–3000) ч и >3000 ч [9–11]. Достоверность выявления повреждений в двигателях по результатам СВЧ плазменных измерений с точностью до узла составила не менее 90 % [12]. Достоверность диагностирования достигнута за счёт высокой информативности метода и использования в качестве дополнительного источника информации о процессах изнашивания пробы смыва с основного маслофильтра.

В настоящей работе рассмотрено использование СВЧ плазменного метода для выявления двигателей с повышенными параметрами частиц изнашивания и вероятными признаками повреждений после проведения ПСИ.

Для достижения сформулированных выше целей был набран представительный массив проб. На анализ поступили пробы с передней коробки приводов (ПКП) и задней коробки приводов (ЗКП) – по 83 шт. с каждой. Были также получены пробы смывов с основного маслофильтра МФС-30 в количестве 81 шт.

Все пробы отобраны с двигателей Д-30КП/КП-2, прошедших капитальный ремонт. Пробы с ЗКП и ПКП представляли собой пробы масла МС-8П, содержащие частицы изнашивания. Пробы с МФС-30 – смыв в нефрас. Нарботка двигателей после ПСИ составляла <15 ч. Двигатели после ПСИ были направлены в эксплуатацию, а набранный массив проб – на анализ.

Измерения параметров частиц изнашивания проводились на СВЧ плазменном (сцинтилляционном) анализаторе САМ-ДТ-01-2 [8]. Для градуировки анализатора использовался государственный стандартный образец (ГСО), изготовленный на основе натуральных частиц изнашивания, и стандартный образец (СО) Conostan, изготовленный на основе металлоорганической примеси.

По результатам анализа обнаружено, что в представленных пробах равновесное количество частиц изнашивания, циркулирующих в маслосистеме, от двигателя к двигателю может различаться более чем на порядок. Так в двигателе № 489-064 суммарное количество частиц по всем элементам в ПКП составило 11596 см^{-3} , а в двигателе № 21-650 всего 667 см^{-3} (табл. 1).

Таблица 1

Таблица параметров частиц изнашивания для некоторых из исследованных двигателей

Приёмо-сдаточные испытания (ПСИ)								
№	№ двиг	ПКП			ЗКП			МФС-30
		$\Sigma N, \text{ см}^{-3}$	C (Fe), г/т	C (Cu), г/т	$\Sigma N, \text{ см}^{-3}$	C (Fe), г/т	C (Cu), г/т	$\Sigma N, \text{ см}^{-3}$
1	489-064	11596	1,52	2,23	8989	1,37	2,00	1342
2	37-717	1352	0,93	0,84	1398	0,89	0,87	15385
3	21-650	667	0,80	0,47	664	0,58	0,46	2503
4	286-078	910	0,54	0,87	545	0,36	0,73	0
5	190-041	3647	2,64	1,50	3045	2,15	1,33	4864

Примечание: ΣN – суммарное количество частиц по всем элементам, зарегистрированное в пробе, C (Fe) и C (Cu) – массовая доля элемента, измеренная в пробе.

В двигателе № 489-064, несмотря на значительное суммарное количество частиц в ПКП и ЗКП ($\Sigma \text{ПКП}=1\,1569\text{ см}^{-3}$, $\Sigma \text{ЗКП}=8989\text{ см}^{-3}$) маслофильтром МФС-30 зарегистрировано сравнительно малое количество частиц ($\Sigma \text{МФС-30}=1\,342\text{ см}^{-3}$). Это означает, что размер частиц изнашивания значительно меньше размеров ячеек маслофильтра, и маслофильтр улавливает небольшую долю частиц.

Имелся двигатель, например, № 37-717, где в ПКП и ЗКП суммарное количество частиц по всем элементам составило $\Sigma \text{ПКП}=1\,352\text{ см}^{-3}$ и $\Sigma \text{ЗКП}=1\,398\text{ см}^{-3}$, а маслофильтром уловлено $\Sigma \text{МФС-30}=1\,5385\text{ см}^{-3}$. Это свидетельствует о наличии в маслосистеме двигателя сравнительно крупных частиц, и большую часть таких частиц улавливает маслофильтр.

Таким образом, результаты исследования проб с 83 двигателей, поступивших на ПСИ после капитального ремонта, показали большой разброс по параметрам частиц. Так максимальный размер частиц от двигателя к двигателю мог изменяться от 20 до 335 мкм, количество частиц менялось более чем на порядок. Величина массовой доли железа различалась более чем в 5 раз (см. двигатели ПКП № 286-078, № 190-041). Различие по меди меньше – в 2–3 раза.

Эталонная статистическая математическая модель по параметрам частиц изнашивания исправного двигателя Д-30КП/КП-2, прошедшего ПСИ

Для построения моделей использовалась схема, предложенная в работе [11]. Для этого параметры частиц изнашивания, измеренные в пробах масел и смывах с маслофильтров с двигателей, прошедших ПСИ, проанализированы на наличие выбросов и аномальных результатов. Для выявления аномальных результатов применялась стандартная статистическая процедура построения диаграммы размаха изменения данных с выделением медианы 50 %, внутренних и внешних границ, вычисленных на основе квартилей (25, 75) %. Анализ проводился с помощью стандартного статистического пакета STATISTICA. Статистические модели строились отдельно для проб масла с ПКП и ЗКП и проб смывов с маслофильтров.

Из всего количества проб масла (166) только одна проба с ПКП двигателя № 489-064 по параметру «количество составов сложных частиц» была определена как экстремальный выброс и исключена из выборки.

По пробам смывов с маслофильтров выяснено следующее.

Предыдущий опыт работы показал, что в исправных двигателях Д-30КП/КП-2 размер частиц изнашивания ≤ 70 мкм. В двигателе № 189-021 после ПСИ их максимальный размер составил 145 мкм, поэтому данный двигатель был исключён из общей выборки при построении статистической модели исправного двигателя. Были обнаружены ещё 2 двигателя, максимальный размер частиц в которых превышал 100 мкм: для двигателя № 189-031 максимальный размер составил 174 мкм, для двигателя № 42-085 – 335 мкм.

Таким образом, вместо исходного списка из 247 проб для построения эталонных статистических моделей двигателей после ПСИ использовалось 165 проб масел, 78 проб смывов с МФС-30.

По результатам измерений параметров частиц были построены эталонные статистические модели для ПКП, ЗКП и для смыва с маслофильтра. В качестве граничных значений принималась односторонняя оценка (в сторону превышения) 2σ и 3σ .

Было проведено сравнение параметров частиц изнашивания с двигателями после ПСИ с ранее разработанной эталонной моделью для наработки после последнего ремонта (ППР) (0–500) ч [10], которое показало, что более 90 % исследованных двигателей после ПСИ по данной модели попадали в разряд «особый контроль», либо «неисправный двигатель». Поэтому при оценке технического состояния узлов двигателя, омываемых смазочным маслом, модель с диапазоном наработки (0–500) ч разбита на две модели: с наработками (0–15) ч (состояние двигателя после ПСИ) и (15–500) ч (состояние двигателя в эксплуатации).

Обсуждение результатов

Превышение параметра(ов) в исследуемом двигателе выше уровня $(\bar{x}+3\sigma)$ эталонного двигателя с формальной точки зрения означает, что с вероятностью близкой к 99 % двигатель имеет повреждение, либо не завершён процесс приработки. Однако к двигателям, вышедшим по параметрам за уровень $(\bar{x}+3\sigma)$, при проведении ПСИ должен быть особый подход, заключающийся в следующем.

При принятии диагностического решения должен учитываться «вес» параметров, имеющих превышения. «Вес» параметра определяют, как правило, «сложные» частицы, типа Fe-Cu, Cu-Ag, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Al-Cu, Fe-Ni. Количество зарегистрированных частиц с такими составами указывает на возможное повреждение узла(ов) двигателя.

Установлено, что регистрация небольшого числа одноэлементных частиц ванадия и (либо) частиц сплава с ванадием типа Fe-Cr-Ni-V в количестве (3–5) штук с большой вероятностью свидетельствует о начале повреждения.

При обнаружении одноэлементных частиц типа Al, Mg, Cu связи с ухудшением технического состояния двигателя не выявлено.

В табл. 2 приведены результаты измерений пробы масла с ПКП, параметры которой вышли за $(\bar{x}+3\sigma)$. Как отмечалось выше, данная проба оказалась единственной среди 166 исследованных проб масел, отобранных с коробок приводов, где параметры частиц превысили контрольное значение $(\bar{x}+3\sigma)$.

Таблица 2

Параметры частиц изнашивания в пробе масла с ПКП двигателя № 489-064, превысившие граничное значение $(\bar{x}+3\sigma)$

№ двиг.	Состав	Измеренное значение	Контрольное значение $(\bar{x}+3\sigma)$
489-064	Cr-Mg-Fe	1,50	1,40
	Al-Cu	41,00	34,22
	Cr-Cu	6,00	5,48
	Ni-Cu	4,67	4,04
	Cr-Mg-Cu	3,33	3,05
	Al-Mg-Fe-Cu	3,00	2,61
	Mg-Ag	3,67	3,41
	Fe-Cu-Ag	2,00	1,93

Из табл. 2 видно, что зарегистрированное количество «сложных» частиц в пробе масла с ПКП может свидетельствовать как о незавершившейся приработке, так и о начале повышенного изнашивания двигателя. В пробе смыва с МФС-30 для данного двигателя превышений контрольных значений параметров частиц не выявлено. Это означает отсутствие в маслосистеме двигателя частиц размером ≥ 70 мкм при размере ячеек фильтра МФС-30 $\approx (70-75)$ мкм.

Элементный состав частиц, показанный в табл. 2, свидетельствует об отсутствии частиц «большого веса», характеризующих повышенный износ тел качения и обойм подшипников типа Cr-Ni-Fe, Cr-Ni-Fe-V и т. п. Зарегистрированные частицы типа Fe-Cu-Ag, Al-Cu, как правило, характеризуют износ сепараторов, а состав Ni-Cu – касание гребешков лабиринтного

уплотнения. Из табл. 2 следует, что уровни измеренных значений параметров близки к контрольным. Существенное различие наблюдается только для частиц состава Al-Cu, характеризующих повышенный износ сепаратора подшипника(ов). Поэтому с большой долей уверенности можно предполагать, что элементный состав частиц и уровни превышений контрольных уровней в двигателе № 489-064 не свидетельствуют о признаках начала развития повреждения. В дальнейшем выяснено, что высокие параметры частиц изнашивания при ПСИ вошли в норму через 100 ч наработки и впоследствии двигатель эксплуатировался без замечаний.

Анализ проб смывов с МФС-30 позволил выявить 11 двигателей с параметрами, превышающими значение ($\bar{x}+3\sigma$). Для восьми двигателей «вес» превысивших параметров оказался небольшим, превышения были явно связаны с приработкой. Параметры, превысившие контрольные уровни для трёх оставшихся двигателей, и их состояние по данным завода-изготовителя приведены в табл. 3.

Таблица 3

Список двигателей и результаты измерений параметров частиц в пробах смывов с МФС-30, превысивших границу ($\bar{x}+3\sigma$)

№ п/п	№ двигателя	№ двигателя	Превышение ($\bar{x}+3\sigma$)
1	37-729	СНЭ/ППР 4059/2078 ч, 2276/1017 циклов. ИНЦИДЕНТ. 17.07.2023. При осмотре двигателя на земле обнаружено повреждение шлицев вала насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Специалистами ИАС выполнена работа по замене насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Проведено опробование двигателя по полному графику, замечаний нет. Двигатель допущен к подконтрольной эксплуатации.	Cr-Fe Cr-Mg-Fe Cr-Mg-Cu Ni-Mg-Cu Al-Fe-Cu Cr-Ni-Fe-Cu Mg-Fe-Cu Al-Mg-Fe-Cu Cr-Mg-Fe-Cu Al-Cr-Mg-Fe- CuAl-Mg-Cu- Ag
2	186-092	Снят в ремонт при ППР 321 ч по забоинам лопаток. Наработка СНЭ/ППР 4466/321 ч, 2043/222 циклов. На 01.12.2023 на завод не предъявлен.	Ag Cr-Ni Cr-Ni-Fe-Al Cr-Ni- Fe-Mg Cr-Fe-Cu
11	189-021	При ППР 403 ч повышенные значения контрольного сигнала по ИВУ-1М. ИНЦИДЕНТ. При наработке ППР 403 ч повышенный износ межвального роликоподшипника. После ремонта в эксплуатации. Наработка на 07.11.2023 СНЭ/ППР 5613/2003 ч, 2756/1173 циклов.	Cr Al-Cu

В табл. 3 показаны результаты измерений параметров частиц двигателя № 37-729, количество которых, превысившее значение ($\bar{x}+3\sigma$), немногим отличается от результатов для двигателя № 489-064, представленных в табл. 2. Однако «вес» параметров в двигателе № 37-729 отличается в большую сторону от двигателя № 489-064. Наблюдаются частицы, связанные с хромом, зарегистрированы частицы Cr-Ni-Fe-Cu, зарегистрирован состав Fe-Cu, связанный с другими элементами. При этом состав Cr-Ni-Fe-Cu может с большой вероятностью свидетельствовать о начале повышенного износа шлицевого соединения омеднённого вала. Эксплуатанту рекомендовано при

ближайшем ТО отобрать на анализ пробы масел и смыва. В данном случае пробы были отобраны при ППР 446 ч с ПКП, ЗКП и МФС-30.

В пробе с МФС-30 для двигателя № 37-729 при ППР 446 ч количество превышений по сравнению с результатом анализа после ПСИ существенно снизилось, наблюдались превышения за границу ($\bar{x}+2\sigma$) только для магния и хрома, «сложных» частиц Cr-Mg, Cr-Fe. Однако при данной наработке выявлены превышения в ЗКП по массовой доле Mg, Fe и Cu, которые во время ПСИ не наблюдались. При этом превышения наблюдались для растворённой фазы металлов (частиц размером ≤ 2 мкм), что характерно для повышенного износа по типу истирания. К сожалению, в дальнейшем пробы на анализ не поступали и при ППР 2078 ч произошёл инцидент. Обнаружено повреждение шлицев вала насоса ДЦН44С-ПЗТ и приводного валика на задней коробке приводов. Отметим, что износ по типу истирания происходит достаточно медленно (опыт показал, что критическое состояние узла возникает через несколько сотен часов), и при своевременном отборе проб на анализ имела возможность инцидент предотвратить.

При разработке статистической эталонной модели двигатель № 189-021 не вошёл в выборку исправных двигателей, поскольку по результатам СВЧ плазменных измерений наблюдались превышения по Cr и Al-Cu. В этой связи проба смыва дополнительно была исследована на микрорентгеноспектральном анализаторе. Полученные результаты показали, что максимум распределения частиц по размерам приходится на диапазон (5–15) мкм, а правый «хвост» достигает 145 мкм. Следующая проба была отобрана и проанализирована при ППР 403 ч.

Сравнение результатов СВЧ плазменного анализа двигателя № 189-021 после ПСИ и при наработке ППР 403 ч показало, что они существенно различаются. Если при ПСИ наблюдались превышения только для Cr и Al-Cu, то при ППР 403 ч фиксировались превышения для Cr, Fe, «сложных» частиц Cr-Fe, Fe-Ag, Cr-Fe-Cu, Cr-Fe-Cu-Ag, а также зарегистрировано 39 частиц, связанных с ванадием. При таких параметрах двигатель однозначно подлежит съёму с крыла.

Эксплуатирующей организацией проведены измерения вибрации двигателя по ИВУ-1М. Величина сигнала в 6 точках составила 100 % при норме не более 30 %. Двигатель был снят с крыла.

Среди 11 двигателей, в которых параметры вышли при проведении ПСИ за уровень ($\bar{x}+3\sigma$), имелся ещё один – № 186-092, где была повторно отобрана проба на анализ при наработке ППР 161 ч. Зарегистрированные после ПСИ частицы типа Ag, Cr-Ni, Cr-Ni-Fe-Al, Cr-Ni-Fe-Mg, Cr-Fe-Cu обладают достаточно большим диагностическим «весом». При ППР 161 ч уровень превышений снизился до ($\bar{x}+2\sigma$), снизился «вес» параметров. Вероятней всего большей «вес» параметров при ПСИ объясняется процессом приработки. В дальнейшем двигатель продолжил эксплуатацию, и при наработке ППР 321 ч двигатель был отстранён по забоинам лопаток, пробы на анализ больше не поступали.

Таким образом, количество частиц изнашивания, их элементный состав и количество составов «сложных» частиц, измеренные СВЧ плазменным (сцинтилляционным) методом, могут быть использованы в качестве эффективных критериев оценки технического состояния двигателей при проведении ПСИ. Это следует из того, что в двух из одиннадцати двигателей по результатам анализа пробы смыва возможное повреждение на этапе ПСИ определено верно, ещё в одном при наработке 161 ч параметры значительно снизились. Из остальных восьми двигателей четыре эксплуатируются без замечаний, два находятся в резерве, один выработал ресурс, ещё одному выполнен локальный ремонт, не связанный с маслосистемой.

Заключение

В качестве метода контроля состояния узлов трения ГТД, омываемых смазочным маслом, при проведении ПСИ предложен СВЧ плазменный анализатор, позволяющий количественно

оценивать параметры частиц изнашивания в пробах, отобранных с коробок приводов и смыва с основного маслофильтра.

Исследованы пробы с 83 двигателей, поступивших на ПСИ после капитального ремонта. Показан большой разброс по параметрам частиц. Так максимальный размер частиц от двигателя к двигателю мог изменяться от 20 до 335 мкм, количество частиц менялось более чем на порядок. Величина массовой доли железа различалась более чем в 5 раз. Различие по меди меньше – в 2–3 раза.

Разработаны статистические модели состояния двигателя, рекомендованного после ПСИ к эксплуатации. Для построения моделей найдены критерии выбраковки двигателей с худшими характеристиками, которые не включались в модели. Статистические эталонные модели разработаны по пробам масел с ПКП, ЗКП и смыва с маслофильтра МФС-30.

При принятии диагностического решения должен учитываться «вес» параметров, по которым наблюдаются превышения. «Вес» параметра определяют, как правило, «сложные» частицы типа Fe-Cu, Cu-Ag, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Al-Cu. Чем больше зарегистрировано таких частиц, тем хуже состояние двигателя. Установлено, что регистрация небольшого числа одноэлементных частиц ванадия и (либо) частиц сплава с ванадием типа Fe-Cr-Ni-V в количестве (3–5) штук с большой вероятностью свидетельствует о начале повреждения. При обнаружении одноэлементных частиц типа Al, Mg, Cu связи с ухудшением технического состояния двигателя не выявлено.

Результаты измерений СВЧ плазменным методом количества частиц изнашивания, их элементного состава и количества составов «сложных» частиц, могут быть использованы в качестве эффективных критериев оценки технического состояния двигателей при проведении ПСИ. По результатам анализа проб смывов из 81 двигателя выявлено 11, параметры частиц которых вышли за граничное значение ($\bar{x}+3\sigma$). Два из них (двигатели № 189-021 и № 37-729) отстранены от эксплуатации по повреждениям смазываемых узлов трения. С большой долей уверенности можно предполагать, что данные двигатели после ПСИ отправлены с завода с начальными признаками повреждений, которые в процессе дальнейшей их эксплуатации привели к инциденту. Ещё в одном при наработке 161 ч параметры частиц изнашивания значительно снизились. Для оставшихся восьми двигателей отсутствуют замечания по техническому состоянию, связанные с маслосистемой двигателя.

Определено состояние двигателя №489-064 по пробе масла с ПКП. Высокие параметры частиц изнашивания при ПСИ вошли в норму через 100 ч наработки, и в дальнейшем двигатель эксплуатировался без замечаний.

С целью снижения вероятности возникновения инцидентов с двигателями, параметры которых вышли за уровень ($\bar{x}+3\sigma$), отпадает необходимость производить в эксплуатации массовый отбор проб со всех двигателей, прошедших ПСИ. При этом формируется выборка двигателей, имеющих повышенные параметры по результатам ПСИ, для которых должна быть продолжена процедура испытаний для принятия решения о возможности направления их в эксплуатацию или превентивного восстановления в условиях предприятия-изготовителя.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Техническая справка № 44-538241. Анализ причин отказов при выявлении в эксплуатации диагностического признака «стружка в масле» за период 2000–2013 гг. Рыбинск, 2014. 157 с.
2. Сиротин Н. Н., Марчуков Е. Ю., Новиков А. С. Повреждаемость и работоспособность авиационных ГТД. Москва: Наука, 2015. 550 с.

3. Прейс А. А.. Анализ процесса старения авиационных двигателей Д-30Ф6 при эксплуатации // Вестник СибГАУ. 2008. № 4(21). С. 111–114.
4. Степанов В. А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии по параметрам продуктов износа в масле. Рыбинск: ЦИАМ, 2002. 232 с.
5. Новиков А. С., Пайкин А. Г., Сиротин Н. Н. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. Москва: Наука, 2007. 468 с.
6. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок Т 5. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Москва: Машиностроение, 2008. 185 с.
7. Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Павлова Л. А., Скудаев Ю. Д. Результаты микрорентгеноспектральных измерений состава частиц изнашивания в системе смазки авиационных газотурбинных двигателей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. С. 19–29.
8. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В. Состояние и перспективы спектральной трибодиагностики авиационных ГТД. Часть 3. Сцинтилляционный атомно-эмиссионный способ измерения параметров металлических частиц в пробах авиационных масел // Контроль. Диагностика. 2011. № 6(156). С. 17–27.
9. Иноземцев А. А., Дроков В. Г., Дроков В. В., Казмиров А. Д., Калошин А. Е. Состояние и перспективы спектральной трибодиагностики авиационных ГТД. Часть 4. Диагностические параметры и точки отбора пробы масла при оценке технического состояния авиационных ГТД по результатам спектральных измерений // Контроль. Диагностика. 2012. № 9(156). С. 20–28.
10. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Метрологическая экспертиза и анализ точности методики трибодиагностики двигателей Д-30КУ/КП с применением СВЧ плазменного комплекса // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 41–52.
11. Дроков В. Г. Повышение достоверности результатов диагностирования газотурбинных двигателей сцинтилляционным методом с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации воздушных судов: автореф. дис. д-ра техн. наук. ГосНИИ ГА, Москва, 2009. 42 с.
12. Техническая справка № 44-517141 по двигателям Д-30КП/КУ/КУ-154, имевшим неисправности узлов и агрегатов при контроле сцинтилляционным методом за период 2000–2007 гг. Рыбинск, 2008. 20 с.

References

1. Tekhnicheskaya spravka no. 44-538241. Analiz prichin otkazov pri vyyavlenii v ehkspluatatsii diagnosticheskogo priznaka “struzhka v masle” za period 2000–2013 gg. Rybinsk, 2014, 157 p. (In Russ.)
2. Sirotin N. N., Marchukov E. Yu., Novikov A. S. *Povrezhdaemost' i rabotosposobnost' aviatsionnykh GTD [Damage and performance of aircraft gas turbine engines]*. Moscow, Nauka Publ., 2015, 550 p. (In Russ.)
3. Preis A. A. D-30F6 aircraft engine deterioration processes analysis in operation. *Vestnik SibGAU*, 2008, no. 4(21), pp. 111–114. (In Russ.)
4. Stepanov V. A. *Diaagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov transmissii gazoturbinnnykh dvigatelej po parametram produktov iznosa v masle*. Rybinsk, TsIAM Publ., 2002, 232 p. (In Russ.)
5. Novikov A. S., Paikin A. G., Sirotin N. N. *Kontrol' i diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh dvigatelej [Monitoring and diagnostics of the technical condition of gas turbine engines]*. Moscow, Nauka Publ., 2007, 468 p. (In Russ.)
6. Inozemtsev A. A., Nikhamkin M. A., Sandratskij V. L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelej i ehnergeticheskikh ustanovok. Tom 5. Avtomatika i regulirovanie aviatsionnykh dvigatelej i ehnergeticheskikh ustanovok [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. Vol. 5. Automation and regulation of aircraft engines and power plants]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 185 p. (In Russ.)
7. Drovov V. G., Drovov V. V., Muryshchenko V. V., Pavlova L. A., Skudaev Yu. D. Results of micro-rntgen-spectral measurements of the wear particle composition in the lubrication system of aircraft gas turbine engines. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 33, pp. 19–29. (In Russ.)

8. Inozemtsev A. A., Drokov V. G., Drokov V. V. Current status and perspectives of development of the turbo-jet aviation engines spectral tribodiagnostics. Part 3. Scintillation atom-emission method of measurement of parameters of metal particles in the oil samples of aviation engines. *Testing. Diagnostics*, 2011, no. 6(156), pp. 17–27. (In Russ.)
9. Inozemtsev A. A., Drokov V. G., Drokov V. V., Kazmirov A. D., Kaloshin A. E. Current status and perspectives of development of the turbo-jet aviation engines spectral tribodiagnostics. Part 4. Diagnostic parameters and oil sampling points at estimation of operating conditions of turbo-jet engines from results of the spectral measurements. *Testing. Diagnostics*, 2012, no. 9(156), pp. 20–28. (In Russ.)
10. Bogoyavlenskii A. A., Bokov A. E. Metrological expertise and analysis of the accuracy method tribodiagnostics of the D-30KU/KP engines using a SHF Gas-plazmic complex. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 32, pp. 41–52. (In Russ.)
11. Drokov V. G. *Povyshenie dostovernosti rezul'tatov diagnostirovaniya gazoturbinnnykh dvigatelej stsinillyatsionnym metodom s tsel'yu snizheniya riskov vozniknoveniya chrezvychajnykh situatsij pri ehkspluatatsii vozdushnykh sudov*. Avtoref. dis. d-ra. tekhn. nauk. GosNII GA, Moscow, 2009, 42 p. (In Russ.)
12. Tekhnicheskaya spravka No. 44-517141 po dvigatelyam D-30KP/KU/KU-154, imevshim neispravnosti uzlov i agregatov pri kontrole stsinillyatsionnym metodom za period 2000–2007 gg. Rybinsk, 2008, 20 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Дроков Виктор Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия, spectrofib@gmail.com

Дроков Виктор Владиславович, инженер, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия, spectrofib@gmail.com

Казмиров Александр Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия, spectrofib@gmail.com

Мурыщенко Владимир Валерьевич, инженер, НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия, spectrofib@gmail.com

Элькес Александр Александрович, заместитель директора программы Д-30КП/КУ ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия, aleksandr.elkes@uec-saturn.ru

Authors information

Drokov Viktor G., Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrofib@gmail.com

Drokov Viktor V., Engineer, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrofib@gmail.com

Kazmirov Aleksandr D., Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrofib@gmail.com

Muryshchenko Vladimir V., Engineer, Research Institute of Applied Physics of Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrofib@gmail.com

Elkes Aleksandr A., Deputy Program Director D-30KP/KU, PJSC “UEC-Saturn”, Rybinsk, Russia, aleksandr.elkes@uec-saturn.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 23.05.2024.
The article was submitted 29.01.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 23.05.2024.

Научная статья
УДК 629.735.015.3.45

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОПАДАНИЯ ВИНТОКРЫЛЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ЗОНУ РЕЖИМА «ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА» НА ПРЕДПОСАДОЧНЫХ МАНЁВРАХ В РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ

А. Б. БЕЛЬСКИЙ^{1,2}, В. П. БУРМИСТРОВ¹, В. В. ЛОПАТИН¹, В. М. ЧОБАН¹

¹ *Национальный центр вертолётостроения имени М. Л. Миля и Н. И. Камова,
г.п. Томилино, Московская область, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*

Аннотация. Описан способ предотвращения попадания винтокрылых летательных аппаратов (ЛА), в том числе вертолётов, в зону режима «вихревого кольца». На предпосадочных манёврах в режиме висения при попадании воздушного судна (ВС) в «вихревое кольцо» происходит неожиданная и резкая потеря высоты, что приводит к авариям и катастрофам при эксплуатации авиационной техники. Имеющиеся способы обнаружения и сигнализации о приближении к режиму «вихревого кольца» не исключают аварийной ситуации. По предлагаемому авторами способу для предотвращения аварий и катастроф на предпосадочных манёврах в режиме висения осуществляется автоматическое поддержание истинных продольных и вертикальных воздушных скоростей в пределах, при которых исключается попадание ВС в зону режима «вихревого кольца». Для этого проводится измерение продольных и вертикальных истинных воздушных скоростей вертолёта, его текущей массы, текущей вертикальной перегрузки, статического давления и температуры наружного воздуха на высоте полёта. Затем по измеренным параметрам формируются сигналы для системы автоматического управления, которая ограничивает истинные воздушные скорости ВС в пределах, исключающих возможность попадания его в зону режима «вихревого кольца». Предлагаемый способ предотвращения попадания винтокрылого ЛА в режим «вихревого кольца» применим для одновинтовых и соосных схем вертолётостроения. Реализация данного способа позволяет существенно повысить безопасность посадки винтокрылых ЛА и исключить попадание вертолётостроения в режим «вихревого кольца» при автоматической посадке.

Ключевые слова: вертолёт, винтокрылый летательный аппарат, воздушное судно, несущий винт, вихревое кольцо, висение, предпосадочный манёвр, истинная воздушная скорость, перегрузка, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Бельский А. Б., Бурмистров В. П., Лопатин В. В., Чобан В. М. Предотвращение попадания винтокрылых летательных аппаратов в зону режима «вихревого кольца» на предпосадочных манёврах в режиме висения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 32–41.

PREVENTION OF ENTRY OF ROTORCRAFT INTO THE AREA OF “VORTEX RING” MODE FOR PRE-LANDING MANEUVERS IN HOVERING MODE

A. B. BELSKIY^{1,2}, V. P. BURMISTROV¹, V. V. LOPATIN¹, V. M. CHOBAN¹

¹ *National Helicopter Center, Tomilino, Moscow Region, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

Abstract. This article describes a method of preventing rotorcrafts, including helicopters, from falling into the vortex ring state (VRS). When hovering at pre-landing maneuver a rotorcraft might fall into the VRS, which causes a sudden and rapid altitude loss, leading to accidents and loss of aircraft. The available methods of detection and warning about the condition, as well as reducing the risk of danger when approaching the VRS do not prevent from the emergency. According to the method proposed, automatic keeping of true longitudinal airspeed and vertical airspeed within the limits help prevent the helicopter from getting into the VRS. For this, longitudinal and vertical true airspeeds of the helicopter, its current weight, current vertical overload, static pressure and ambient air temperature on flight altitude are to be measured. Then, the measured data helps generate signals for the automatic control system, that keeps true airspeed within the limits thus eliminating the risk of getting into the VRS.

Keywords: helicopter, rotorcraft, aircraft, vortex ring, hanging, pre-landing maneuver, true airspeed, overload, operation of aircraft

For citation: Belskiy A. B., Burmistrov V. P., Lopatin V. V., Choban V. M. Prevention of entry of rotorcraft into the area of “vortex ring” mode for pre-landing maneuvers in hovering mode, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 32–41. (In Russ.)

Введение

Режим «вихревого кольца» является особым режимом работы как одиночных, так и соосных несущих винтов (НВ) вертолётных и других винтокрылых ЛА. Главной особенностью этого режима является глобальное нарушение законов струйного течения потока воздуха в области НВ, которое возникает при малых горизонтальных скоростях ВС на снижении. В этом режиме НВ не создают достаточной тяги, при этом возникает плохая управляемость ЛА, самопроизвольное, непредсказуемое и ускоренное его снижение.

При исследовании режимов вертикального спуска одиночного НВ академик Б. Н. Юрьев [1] показал, что на этих режимах имеют место существенные особенности в работе НВ и в форме создаваемой им струи.

Особенностями этого режима при эксплуатации авиационной техники являются форма вихревого следа НВ и нестационарность вихрей. На режиме висения вихри, сошедшие с лопастей, уносятся вниз потоком, создаваемым НВ. Когда же вертолёт снижается, НВ догоняет отходящие от него вихри. Из-за близости вихрей к плоскости вращения индуктивные скорости на ней возрастают. На рис. 1 показана вихревая пелена воздуха при вращении лопастей со скоростью ω_n , а на рис. 2 – поле скоростей воздуха от одной лопасти после двух оборотов НВ при вертикальном снижении. Это результат расчёта по нелинейной нестационарной теории, разработанной под руководством С. М. Белоцерковского [2].

На рис. 1 и рис. 2 видно, что концевые вихри выходят за пределы плоскости вращения, там их скорость снижения уменьшается и вихревая пелена заворачивается к плоскости вращения, образуя, таким образом, поверхность типа тора. При этом кольцевые потоки, идущие от отброшенного НВ вниз воздуха, подсасываются и вновь отбрасываются вниз.

Описывая результаты опытов на модели винта, Е. С. Вожаев [3] отмечал, что на режиме «вихревого кольца» концевые вихри совершают колебательное движение, диффундируют и создают в потоке интенсивную крупномасштабную турбулентность.

Из-за увеличения индуктивных скоростей в плоскости вращения НВ его тяга при постоянном угле установки уменьшается. При определённой скорости снижения ВС эта скорость самопроизвольно резко возрастает. При этом возникают тряска, плохая управляемость, неустойчивость показаний бортовых барометрических приборов, самопроизвольное возрастание боковой и продольной скоростей. Таким образом, режим «вихревого кольца» – это опасный режим.

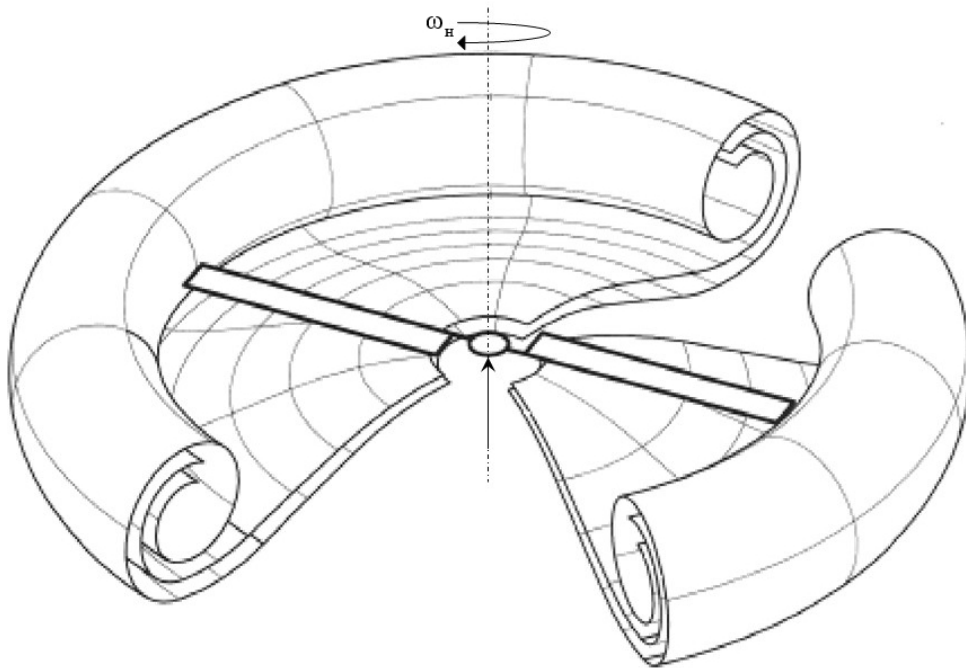


Рис. 1. Вихревая пелена в режиме «вихревого кольца»

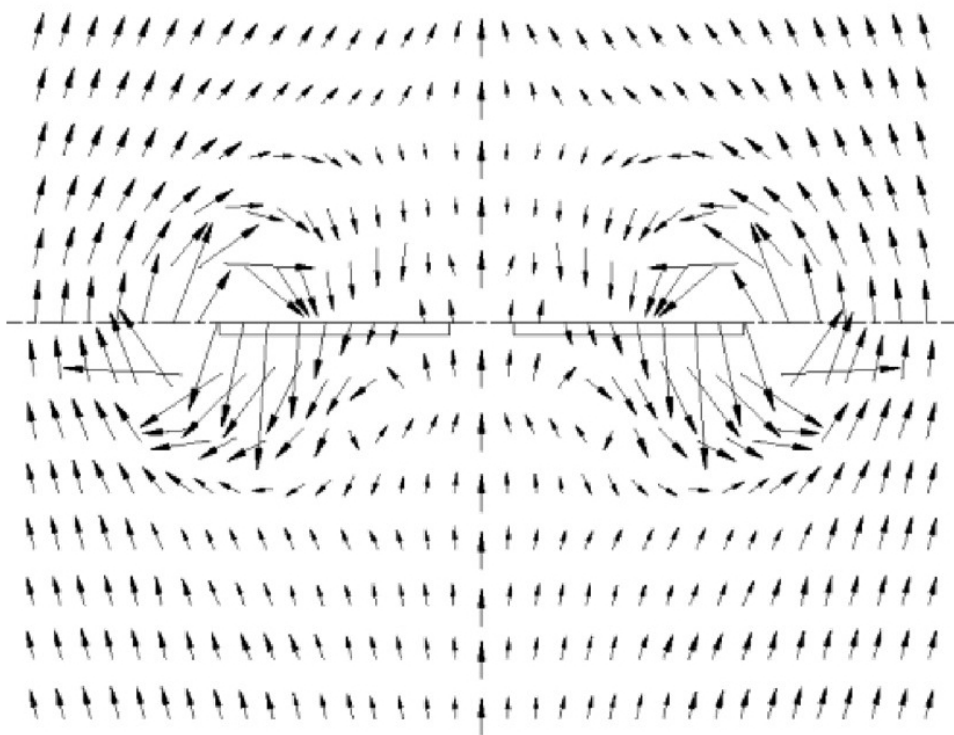


Рис. 2. Поле скоростей в режиме «вихревого кольца»

Изучению особенностей режима «вихревого кольца» в процессе развития вертолётостроения уделялось большое внимание. Подробные исследования аэродинамики одновинтовых вертолётов с рулевым винтом проведены в работе [4]. Также был выполнен значительный объём экспериментальных исследований режимов «вихревого кольца» одиночного НВ на моделях в аэродинамических трубах и гидроканале ЦАГИ [5]. Проведены исследования динамики одновинтовых вертолётов с рулевым винтом на предельных режимах полёта [6].

Впервые лётные исследования режима «вихревого кольца» соосного вертолётa проведены в 1957 году на вертолётe Ка-15 лётчиком-испытателем Ефремовым Д. К. и ведущим инженером Руссиян Т. В. Лётчик-испытатель Ефремов Д. К. написал и внедрил в лётную практику инструкцию по технике пилотирования Ка-15 на режимах вертикального снижения без поступательной скорости, а также рекомендации по его выводу из режима «вихревого кольца».

Для соосных вертолётov разработаны различные численные методы расчёта характеристик в зоне «вихревого кольца» и проведены исследования этого режима с их использованием [7].

В ОКБ «Камов» теоретические и экспериментальные исследования особенностей режима «вихревого кольца» проводили Э. А. Петросян, Л. А. Поташник, Р. А. Михеева [8]. В процессе лётных испытаний и доводок соосного вертолётa Ка-32 были найдены границы зоны «вихревого кольца» в координатах горизонтальных V_{xz} и вертикальных V_y истинных воздушных скоростей ВС (рис. 3). Разработаны рекомендации лётчику по безопасному выводу вертолётa Ка-32 из этой зоны.

Экспериментальные исследования моделей соосного и одиночного винтов в аэродинамической трубе показали, что верхние границы «вихревых колец» практически одинаковы у вертолётov как одновинтовых, так и соосной схемы (рис. 4).

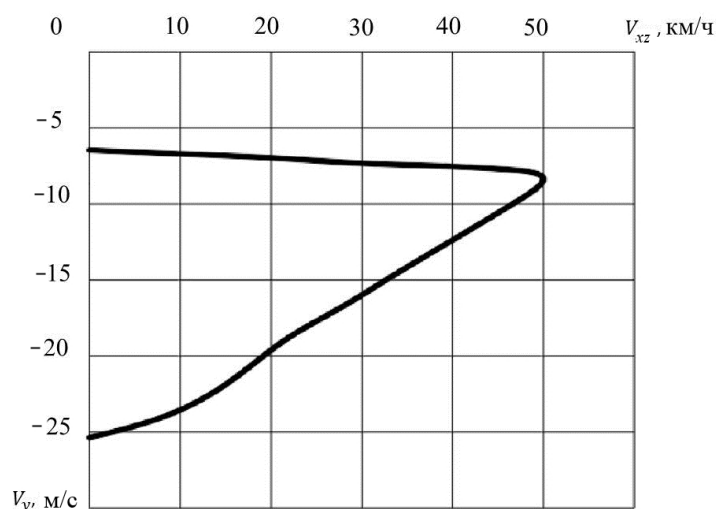


Рис. 3. Границы зоны «вихревого кольца» соосного вертолётa Ка-32, полученные в результате лётных испытаний

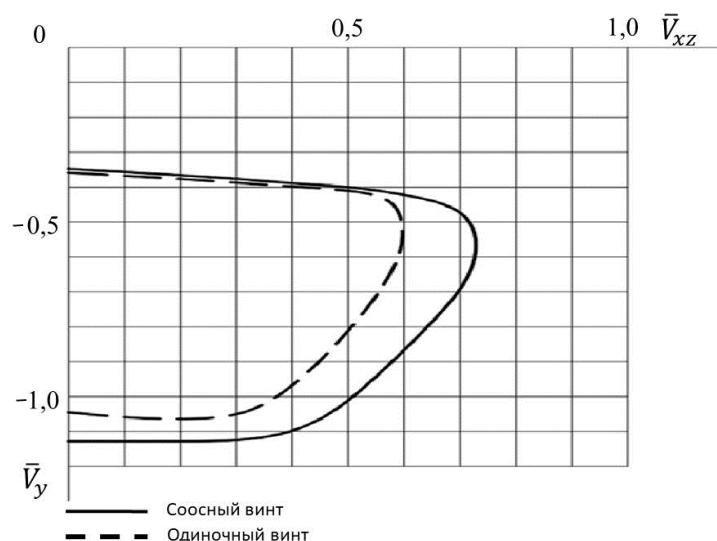


Рис. 4. Зоны «вихревого кольца» на основе обработки результатов экспериментальных исследований моделей соосного и одиночного винтов в аэродинамической трубе

Границы «вихревых колец» на рис. 4 показаны в относительных координатах.

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_Y &= \frac{V_{YИ}^B}{v_B}; \\ \bar{V}_{XZ} &= \frac{V_{XZI}^B}{v_B}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $V_{YИ}^B$, V_{XZI}^B – истинная вертикальная и истинная горизонтальная воздушные скорости вертолѐта; v_B – средняя индуктивная скорость одиночного винта, эквивалентного соосному винту.

Однако выполненные работы не исключили случаев аварий и катастроф из-за попадания вертолѐтов в зону режима «вихревого кольца».

На предпосадочных манѐврах в режиме висения при малых значениях истинной горизонтальной воздушной скорости как одноосный вертолѐт с рулевым винтом, так и соосный вертолѐт могут попасть в верхнюю границу «вихревого кольца». При этом происходит неожиданная и резкая потеря высоты полѐта, что приводит к авариям и катастрофам вертолѐтной техники за счёт неизбежных грубых посадок [9].

По статистике Федеральной государственной автоматизированной системы обеспечения безопасности полѐтов гражданских воздушных судов за последние двенадцать лет по причине попадания в «вихревое кольцо» произошло шесть аварий, восемь катастроф и семь серьёзных авиационных инцидентов. В результате случившихся аварий и катастроф погибло 22 человека, десятки людей получили ранения, а более десяти ВС стали непригодными к эксплуатации.

Анализ литературы патентного характера свидетельствует о создании различных устройств по сигнализации пилоту момента входа вертолѐта в «вихревое кольцо». Известны способы обнаружения и сигнализации о приближении к режиму «вихревого кольца» винтокрылого ЛА, которые предусматривают измерение системой воздушных сигналов на предварительных лѐтных испытаниях тангенциальных и нормальных составляющих воздушной скорости потока вблизи НВ [10, 11]. По измеренным значениям осуществляется формирование границ возникновения режима «вихревого кольца» и проводится сравнение воздушной скорости вертолѐта в полѐте и связанной с ней вертикальной скорости с граничными параметрами режима «вихревого кольца». При соответствии параметров режиму «вихревого кольца» осуществляют формирование сигнала предупреждения членам экипажа ВС. Однако эти способы не предотвращают попадание вертолѐта в зону режима «вихревого кольца».

Известен способ предотвращения попадания винтокрылого ЛА в режим устойчивого «вихревого кольца» [12], который предполагает измерение акселерометрами подъѐмной силы НВ вертолѐта и создания на НВ циклического возмущения при входе в режим «вихревого кольца».

Тем не менее, и этот способ не позволяет предотвратить попадание винтокрылого ЛА в зону режима «вихревого кольца». Он снижает опасность ситуации, но не предотвращает её.

Способ предотвращения попадания винтокрылого ЛА в «вихревое кольцо» на предпосадочных манѐврах в режиме висения

С целью обеспечения безопасности полѐтов винтокрылых ЛА на предпосадочных манѐврах авторами настоящей статьи предлагается способ предотвращения попадания их в зону режима «вихревого кольца». Это актуальная задача, особенно с учётом тенденций создания опционально-пилотируемых вертолѐтов и обеспечения их безопасного пилотирования в ручном и в автоматическом режимах.

Для получения указанного технического результата по предлагаемому способу на предпосадочных манѐврах в режиме висения измеряют с помощью вычислителя воздушных сигналов

продольные и вертикальные истинные воздушные скорости вертолѐта с точностью порядка 0,1 м/с, а также определяют его текущую массу, текущую вертикальную перегрузку, статическое давление и температуру наружного воздуха на высоте полѐта. Аналоговые или цифровые сигналы об этих параметрах по протоколу взаимодействия передаются в пилотажный вычислитель.

В работе [6] показаны граничные условия, при которых на предпосадочных манёврах в режиме висения исключается попадание одновинтовых вертолѐтов в зону режима «вихревого кольца»:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{хи}}^{\text{B}} &= (0 \dots 1,6) \sqrt{m g n_y / \Delta F}; \\ V_{\text{уи}}^{\text{B}} &= -(0,2 \dots 0,3) \sqrt{m g n_y / \Delta F}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где m – масса вертолѐта, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; n_y – перегрузка по вертикальной оси; F – площадь, ометаемая винтами вертолѐта, м²; $V_{\text{хи}}^{\text{B}}$ – истинная продольная воздушная скорость вертолѐта, км/ч; $V_{\text{уи}}^{\text{B}}$ – истинная вертикальная воздушная скорость снижения вертолѐта, м/с; $\Delta = P_H M / (R T_H)$ – плотность сухого воздуха, зависящая от давления и температуры, кг/м³; P_H – статическое давление воздуха на высоте H полѐта, Па; M – молекулярная масса воздуха, равная 29 г/моль (для сухого воздуха); R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31447 Дж/(моль·К); T_H – температура наружного воздуха, К.

Проведѐм сравнительные расчѐты допустимых истинных воздушных вертикальных скоростей серийных одноосных и соосных вертолѐтов АО «НЦВ Миль и Камов». Так как верхние границы «вихревых колец» одинаковы для одноосных и соосных вертолѐтов, то эти формулы справедливы для обеих конструктивных схем вертолѐтов. Характеристики, необходимые для расчѐтов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики серийных одноосных и соосных вертолѐтов

Тип вертолѐта	Взлѐтная масса, кг	Радиус НВ, м
Ми-26	56000	20,010
Ми-38Т	15600	12,613
Ми-8МТВ	13000	12,655
Ми-171	13000	12,655
Ка-226Т	3600	6,620
Ка-62	6800	6,900
Ка-32	11000	7,950

Расчѐт допустимой вертикальной скорости снижения проведѐм при перегрузке $n_y = 1,0$ и стандартной атмосфере (давление окружающего воздуха 101330 Па, температура +15 °С). При этих параметрах плотность сухого воздуха равна

$$\Delta = 1,226 \text{ кг/м}^3.$$

Подставляя вышеприведѐнные данные в (2), определим допустимые скорости снижения вертолѐтов, исключаяющие их попадание в зону режима «вихревого кольца». Расчѐты проведѐм при коэффициенте $-0,2$ в уравнении для $V_{\text{уи}}^{\text{B}}$ из (2).

Результаты расчѐтов приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Допустимая вертикальная скорость снижения на висении вертолёт

Тип вертолёт	Допустимая вертикальная скорость снижения на висении, м/с
<i>Одновинтовой</i>	
Ми-26	–3,77
Ми-38Т	–3,16
Ми-8МТВ	–2,87
Ми-171	–2,87
<i>Соосный</i>	
Ка-226Т	–2,89
Ка-62	–3,81
Ка-32	–4,21

Сравнение этих данных с параметрами «вихревых колец» для выбранных вертолёт показывает, что допустимые вертикальные скорости снижения вертолёт, рассчитанные по уравнению для $V_{\text{ви}}^{\text{в}}$ (2), значительно меньше верхних границ скорости вхождения в «вихревое кольцо».

Как видно из табл. 2, допустимая вертикальная скорость снижения на висении для соосного вертолёт Ка-32 составляет 4,21 м/с. Как показано в [8], на висении Ка-32 (рис. 3) входит в зону «вихревого кольца» при скорости снижения 6 м/с. Таким образом, имеется значительный запас по скорости, обеспечивающий исключение попадания вертолёт типа Ка-32 в зону режима «вихревого кольца». Это подтверждает, что уравнения (1) могут использоваться для предотвращения попадания в «вихревое кольцо» как одновинтовых вертолёт, так и вертолёт соосной схемы.

По предлагаемому способу для предотвращения попадания винтокрылого ЛА в зону режима «вихревого кольца» на предпосадочных манёврах в режиме висения измеряют входящие в уравнения (1) параметры (текущую массу вертолёт, текущую вертикальную перегрузку, истинные продольные и вертикальные воздушные скорости, статическое давление и температуру наружного воздуха на высоте полёт). Эти параметры подают в пилотажный вычислитель и в нём формируют сигналы, которые с помощью системы автоматического управления ограничивают истинные воздушные скорости вертолёт в соответствии с неравенствами

$$\left. \begin{aligned} 0 < V_{\text{хи}}^{\text{в}} < 1,3 \sqrt{mgn_y / \Delta F}; \\ V_{\text{ви}}^{\text{в}} > -0,2 \sqrt{mgn_y / \Delta F}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

С целью повышения безопасности полёт средних и тяжёлых вертолёт с массой >3100 кг, обладающих значительной инерцией, в управление вертолёт по вертикальному каналу целесообразно вводить дополнительный сигнал упреждения, пропорциональный ускорению истинной вертикальной воздушной скорости $\partial V_{\text{ви}}^{\text{в}} / \partial t$, с величиной упреждения порядка 0,2 [13].

Режим «вихревого кольца» может возникнуть не только от снижения винтокрылого ЛА, но и от обтекания НВ восходящим потоком воздуха при малой поступательной скорости ВС. Истинная вертикальная воздушная скорость является суммой вертикальных скоростей ВС и воздушного потока относительно поверхности Земли. Поэтому при вертикальной скорости

воздушного потока, направленной вверх, большей $V_{\text{уи}}^B = -0,2\sqrt{mgn_y/\Delta F}$, для выполнения неравенств (3) система автоматического управления вертолѐта в процессе предпосадочного манёвра начнѐт увеличивать его истинную высоту. Для исключения попадания винтокрылого ЛА в зону режима «вихревого кольца» навигационный вычислитель или экипаж ВС по сигналу с радиовысотомера изменяют маршрут полѐта для посадки на запасном аэродроме.

Следует учесть, что при практическом внедрении разработанного способа для используемых в нём косвенных измерений должны быть определены и аттестованы их метрологические характеристики с применением разработанных в [14–16] методических подходов и организационных основ применительно для авиационной деятельности. Аттестация необходима для установления допускаемых значений суммарных погрешностей косвенных измерений с учётом входящих в них составляющих.

Заключение

Исключение попадания винтокрылых ЛА, в том числе вертолѐтов, в «вихревое кольцо» достигается ограничением вертикальных истинных воздушных скоростей на предпосадочных манёврах в режиме висения при малой истинной горизонтальной воздушной скорости.

Проведѐнная работа показала возможность применения единого подхода для предотвращения попадания в режим «вихревого кольца» одновинтовых и соосных схем вертолѐтов.

Предложенный авторами способ предотвращения попадания винтокрылого ЛА в режим «вихревого кольца» позволяет исключить затраты на определение в лѐтных испытаниях тангенциальных и нормальных составляющих воздушной скорости для установления границ «вихревого кольца».

Исключение попадания винтокрылого ЛА в режим «вихревого кольца» описанным способом позволяет проводить безопасную посадку вертолѐтов в горах, где вертикальный поток воздуха может превышать 8 м/с.

Предлагаемый способ предотвращения попадания винтокрылого ЛА в режим «вихревого кольца» обеспечивает безопасность предпосадочных манёвров в режиме висения и исключает попадание вертолѐтов в режим «вихревого кольца» при автоматических посадках.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Юрьев Б. Н. Аэродинамический расѐт вертолѐта. Москва: Государственное издательство оборонной промышленности, 1956. 539 с.
2. Белоцерковский С. М., Васин В. А., Локтев Б. Е. К математическому нелинейному моделированию нестационарного обтекания несущего винта // Доклады АН СССР. 1978. Т. 240. № 6. С. 1320–1323.
3. Вождаев Е. С. Теория несущего винта. Москва: Машиностроение, 1973. 363 с.
4. Миль М. Л., Некрасов А. В., Браверман А. С., Гродко Л. Н., Лейканд М. А. Вертолѐты. Расѐт и проектирование. Том 1. Аэродинамика / Под редакцией М. Л. Миль. Москва: Машиностроение, 1966. 457 с.
5. Мартынов А. К., Новосѐлов П. М., Степанов А. В. и др. Экспериментальные исследования по аэродинамике вертолѐта / Под общ. ред. А. К. Мартынова. Москва: Машиностроение, 1980. 240 с.
6. Браверман А. С., Вайнтруб А. П. Динамика вертолѐта. Предельные режимы полѐта. Москва: Машиностроение, 1988. 278 с.
7. Симоненко В. И. В режиме «вихревого кольца» // Гражданская авиация. 1987. № 5. С. 44–47.
8. Петросян Э. А. Аэродинамика соосного вертолѐта. Казань: ООО «Полигон-Пресс», 2004. 816 с.
9. Джонсон У. Теория вертолѐта. Книга 1. Москва: Мир, 1983. 502 с.

10. Патент CN 101808897A, B64C27/006, 18.08.2010.
11. Способ определения и сигнализации о приближении несущего винта к зоне режимов «вихревого кольца» на предпосадочных манёврах одновинтового вертолёта: пат. RU 2486596 C1 / Бутов В. П., Емельянова З. С., Барсуков Б. Ю., Мухаметгареев В. М., Фролкина Л. В. // Изобретения. Полезные модели. № 18. 2013.
12. Патент CN 1784338A, B64C29/0033, 07.06.2006.
13. Способ предотвращения попадания винтокрылого летательного аппарата в зону режима «вихревого кольца» на предпосадочных манёврах в режиме висения: пат. RU 2818823 C1 / Антипов Н. А., Бельский А. Б., Бурмистров В. П., Лопатин В. В., Чобан В. М. // Изобретения. Полезные модели. № 13. 2024.
14. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений в аэрокосмической отрасли // Мир измерений. 2017. № 4. С. 8–11.
15. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Об организации и проведении работ по обеспечению единства измерений на воздушном транспорте // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2012. № 2(313). С. 24–29.
16. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Стендовое оборудование для технического обслуживания вертолётов Ми-8, Ми-17 и его метрологические исследования // Мир измерений. 2015. № 4. С. 12–20.

References

1. Yuriev B. N. *Aerodinamicheskij raschyot vertolyota [Aerodynamic Calculation for Helicopter]*. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoj promyshlennosti Publ., 1956, 539 p. (In Russ.)
2. Belotserkovskii S. M., Vasin V. A., Loktev B. E. On the mathematical nonlinear simulation of the unsteady flow past a helicopter rotor. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1978, vol. 240, no. 6, pp. 1320–1323. (In Russ.)
3. Vozhdaev E. S. *Teoriya nesushchego vinta [Theory of the Main Rotor]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 363 p. (In Russ.)
4. Mil' M. L., Nekrasov A. V., Braverman A. S., Grodtko L. N., Leikand M. A. *Vertolyoty. Raschyot i proektirovanie. Tom 1. Aerodinamika [Helicopters. Calculations and design. Volume 1. Aerodynamics]*. Ed. Mil M. L. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, 457 p. (In Russ.)
5. Martynov A. K., Novosyolov P. M., Stepanov A. V. et al. *Ehksperimental'nye issledovaniya po aerodinamike vertolyota [Experimental research on helicopter aerodynamics]*. Ed. Martynov A. K. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 240 p. (In Russ.)
6. Braverman A. S., Vajntруб A. P. *Dinamika vertolyota. Predel'nye rezhimy polyota. [Helicopter dynamics. Permissible flight envelopes]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 278 p. (In Russ.)
7. Simonenko V. I. V rezhime "vikhrevoogo kol'tsa", *Civil aviation*, no. 5, 1987, p. 44–47. (In Russ.)
8. Petrosyan E. A. *Aerodynamics of coaxial helicopter*. Kazan, Poligon-Press Publ., 2004, 816 p. (In Russ.)
9. Johnson W. *Helicopter Theory. Book 1*. Mir Publ., 1983, 502 p. (In Russ.)
10. Патент CN 101808897A, B64C27/006, 18.08.2010.
11. Butov V. P., Emel'janova Z. S., Barsukov B. Ju., Mukhametgarееv V. M., Frolokina L. V. Patent RU 2486596 C1, *Inventions. Utility models*, no. 18 (2013).
12. Патент CN 1784338A, B64C29/0033, 07.06.2006.
13. Antipov N. A., Belskiy A. B., Burmistrov V. P., Lopatin V. V., Choban V. M. Patent RU 2818823C1, *Inventions. Utility models*, no. 13 (2024).
14. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. Aktual'nye voprosy metrologicheskogo obespecheniya izmerenij v aehrokosmicheskoy otrasli, *Measurement World*, 2017, no. 4, pp. 8–11. (In Russ.)
15. Bogoyavlenskiy A. A., Ermolaeva O. L. On the organization and carrying out of works on maintenance the uniformity of measurements in air transport. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2012, no. 2(313), pp. 24–29. (In Russ.)
16. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. Stendovoe oborudovanie dlya tekhnicheskogo obsluzhivaniya vertolyotov Mi-8, Mi-17 i ego metrologicheskie issledovaniya. *Measurement World*, 2015, no. 4, pp. 12–20. (In Russ.)

Информация об авторах

Бельский Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); заместитель исполнительного директора по науке и инновационному развитию, заместитель генерального конструктора АО «НЦВ Миль и Камов», рп. Томилино, Московская область, Россия, abelskiy@mi-helicopter.ru

Бурмистров Владимир Петрович, доктор технических наук, доцент, главный специалист, АО «НЦВ Миль и Камов», рп. Томилино, Московская область, Россия, v.burmistrov@nhc.aero

Лопатин Владимир Васильевич, главный специалист, АО «НЦВ Миль и Камов», рп. Томилино, Московская область, Россия, vlopatin@mvz.local

Чобан Василий Мильевич, кандидат технических наук, директор – главный конструктор научно-исследовательского центра, АО «НЦВ Миль и Камов», рп. Томилино, Московская область, Россия, v.choban@nhc.aero

Authors information

Belskiy Aleksandr B., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department, Moscow Aviation Institute (National Research University); Deputy Executive Director for Science and Innovative Development, Deputy General Designer, National Helicopter Center, Tomilino, Moscow Region, Russia, abelskiy@mi-helicopter.ru

Burmistrov Vladimir P., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Chief Specialist, National Helicopter Center, Tomilino, Moscow Region, Russia, v.burmistrov@nhc.aero

Lopatin Vladimir V., Chief Specialist, National Helicopter Center, Tomilino, Moscow Region, Russia, vlopatin@mvz.local

Choban Vasiliy M., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Director – Chief Designer of Scientific Research Center, National Helicopter Center, Tomilino, Moscow Region, Russia, v.choban@nhc.aero

Статья поступила в редакцию 25.01.2024; одобрена после рецензирования 20.06.2024; принята к публикации 28.06.2024.

The article was submitted 25.01.2024; approved after reviewing 20.06.2024; accepted for publication 28.06.2024.

Научная статья
УДК 006.3:629.73

О НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТАХ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ, ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ ЕДИНСТВА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А. А. БОГОЯВЛЕНСКИЙ, А. Е. БОКОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Обоснована структурная последовательность осуществления технического регулирования путём проведения работ по национальной стандартизации авиационной деятельности на воздушном транспорте (ВТ) и в авиационной промышленности (АП). Установлено, что разработка, внедрение и применение национальных стандартов является эффективным инструментом осуществления технического регулирования в области обеспечения единства измерений (ОЕИ) как на транспорте, так и в АП. При непосредственном участии авторов разработаны: семь национальных стандартов в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации и производстве авиационной техники (АТ), связанных с авиационной деятельностью на ВТ (ТК 034 «Воздушный транспорт») и пять пилотных национальных стандартов новой серии «Система ОЕИ на предприятиях АП» (ТК 323 «Авиационная техника»).

Ключевые слова: воздушный транспорт, эксплуатация авиационной техники, авиационная промышленность, национальный стандарт, обеспечение единства измерений, метрологическое обеспечение, метрологический риск, испытательное оборудование, специальные средства измерений, инструментальный контроль

Для цитирования: Богоявленский А. А., Бокров А. Е. О национальных стандартах в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации и производстве авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 42–52.

ON NATIONAL STANDARDS IN THE FIELD OF MEASUREMENTS, TESTING, INSTRUMENTAL CONTROL AND ENSURING THEIR UNITY DURING OPERATION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT EQUIPMENT

A. A. BOGOYAVLENSKIY, A. E. BOKOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The structural sequence of technical regulation is substantiated by carrying out work on national standardization of aviation activities in air transport and in the aviation industry. It has been established that the development, implementation and application of national standards is an effective tool for the implementation of technical regulation in the field of ensuring the uniformity of measurements both in transport and in aviation industry. With the direct participation of the authors, the following were developed: seven national standards in the field of measurements, testing, instrumental control, ensuring their unity during the operation of aviation equipment related to aviation activities on aircraft (TK 034 Air transport) and five

pilot national standards of the new series “System of the uniformity of measurements at aviation industry enterprises” (TK 323 Aviation equipment).

Keywords: air transport, operation of aircraft, aviation industry, national standard, ensuring the uniformity of measurements, metrological support, metrological risk, testing equipment, special measuring instruments, instrumental control

For citation: Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. On national standards in the field of measurements testing, instrumental control and ensuring their unity during operation and production of aircraft equipment, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 42–52. (In Russ.)

Введение

Национальный стандарт (согласно 162-ФЗ¹) – это документ по стандартизации, разработанный участником (участниками) работ по стандартизации, экспертиза которого проведена техническим комитетом по стандартизации и который устанавливает общие характеристики, правила и принципы в отношении объекта стандартизации. Среди целей стандартизации, установленных п. 6 ч. 1 ст. 3 162-ФЗ, одна может быть отнесена непосредственно к авиационной деятельности на ВТ и АП – это повышение качества продукции, выполнения работ, оказания услуг и конкурентоспособности продукции российского производства. Для достижения целей стандартизации должны быть решены задачи, изложенные в ч. 2 ст. 3 162-ФЗ, среди которых (п./п. 5) ОЕИ и сопоставимости их результатов.

В основе выполненных авторами настоящей статьи разработок национальных стандартов лежат такие принципы, заложенные в 162-ФЗ, как обеспечение комплексности и системности стандартизации, преемственности деятельности в сфере стандартизации (п. 3 ст. 4), а также непротиворечивость документов национальной системы стандартизации (п. 9 ст. 4).

При проведении работ по стандартизации в обязательном порядке ставятся названные цели, для достижения которых решаются соответствующие задачи, а в их основе лежат принципы стандартизации. Эти принципы применяются, поскольку они законодательно закреплены. До принятия 162-ФЗ цели, задачи и принципы регламентировались положениями национальных и межгосударственных (принятых в качестве национальных) стандартов государственной системы стандартизации (ГСС). Кроме того, согласно п. 1 ч. 2 ст. 17 162-ФЗ разработчикам следует учитывать, что национальные стандарты должны базироваться на основе результатов научных исследований (испытаний) и измерений.

Работы по национальной стандартизации на ВТ

Основной особенностью стандартизации на ВТ – как отечественном, так и зарубежном – является обязательное применение стандартов Международной организации гражданской авиации (ИКАО), а также национальных Федеральных авиационных правил (ФАП), фактически являющихся техническими регламентами. ФАП для ввода в действие перед началом применения в отечественной авиационной практике утверждаются на уровне Минтранса России и регистрируются Минюстом России. При этом имеется необходимость в разработке национальных стандартов на основе стандартов отраслевой системы ОЕИ в гражданской авиации (ГА). При разработке проектов национальных стандартов основополагающим условием с точки зрения структуры, порядка изложения и оформления является соблюдение требований документов государственной системы стандартизации (ГСС). Однако отсутствие источников финансирования со стороны ТК 323 «Авиационная техника» (далее – ТК 323) делает фактически неисполнимой

¹ Федеральный закон от 29.06.2015 № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».

решение этой задачи, поскольку работа на безвозмездной основе противоречит положениям Устава ФГУП ГосНИИ ГА.

Работы по национальной стандартизации на ВТ до 2016 года проводились в рамках Технического комитета по стандартизации Росстандарта ТК 034 «Воздушный транспорт» (далее – ТК 034), функционировавшего на базе ФГУП ГосНИИ ГА, а начиная с 2017 года и по настоящее время проводятся в рамках ТК 323. ФГУП ГосНИИ ГА является членом ТК 323 и возглавляет в нём подкомитеты ПК 27 «Эксплуатация воздушного транспорта» и ПК 28 «Наземное оборудование, оборудование и технологии авиатопливообеспечения». В свою очередь, А. А. Богоявленский персонально является членом ПК 27.

В период с 2010 по 2015 год в рамках деятельности ТК 034 ФГУП ГосНИИ ГА разработаны и утверждены Росстандартом [1, 2] более 30 национальных стандартов, связанных с авиационной деятельностью на ВТ. Среди них комплекс стандартов Системы менеджмента безопасности авиационной деятельности на ВТ, сформированный в развитие Приложения 19².

Подготовлены и введены также несколько терминологических стандартов в областях технического обслуживания и ремонта (ТОиР) АТ; обеспечения досмотра пассажиров в аэропортах; аутентичности компонентов, узлов и агрегатов ВС и ряд других.

Среди указанных стандартов – семь, связанных с измерениями, испытаниями, инструментальным контролем и обеспечением их единства при эксплуатации АТ, разработаны авторами настоящей статьи.

Отличительные особенности разработанных стандартов в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации АТ на ВТ



Основопологающие национальные стандарты в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации АТ на ВТ

Все представленные на рисунке стандарты в практике авиационной деятельности на ВТ разработаны впервые.

Один из стандартов – *ГОСТ Р 54580*, устанавливающий процедуры контроля массы и определения центровки ВС – получил положительную оценку инспекционной группы ИКАО

² Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полётов.

по обеспечению безопасности полётов, проводившей плановую проверку деятельности отечественной гражданской авиации (ГА). Инспекторами было отмечено, что ни в одной из стран – членов организации, кроме России, не существует национального стандарта в развитие и гармонизированного с документом Doc 9760 AN/967³ ИКАО по этому направлению. Стандарт разрабатывался [3] в рамках деятельности ТК 034 и во исполнение Распоряжения Росавиации от 28.09.2008 № 115-БЕ-р, согласно которому на ФГУП ГосНИИ ГА (далее – институт) возложено осуществление научно-методического руководства работами по контролю массы ВС в отечественной ГА.

ГОСТ Р 56116 из серии «Система менеджмента безопасности авиационной деятельности» посвящён метрологическим рискам негативных ситуаций и постановке задачи разработки методов управления ими. Необходимость разработки указанной серии была вызвана обязательством России, как страны – члена ИКАО, по внедрению Приложения 19 к Конвенции о международной ГА. Стандарт направлен на гармонизацию применения Приложения 19 в части, связанной с ОЕИ в авиационной деятельности на территории нашей страны. Авторами настоящей статьи впервые поставлена задача разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций при осуществлении авиационной деятельности, введён термин **«метрологический риск»** и дано его определение. Авторами он введён также в терминологический стандарт ГОСТ Р 55588⁴. Проведены анализ и обобщение теоретических основ для разработки методов оценки и управления метрологическими рисками, а также сформулированы методические подходы для формирования принципов менеджмента безопасности авиационной деятельности на основе методологии исчисления метрологических рисков. Показаны результаты предварительного анализа источников возникновения метрологических рисков негативных ситуаций на примере осуществления авиационной деятельности на ВТ. Следует отметить, что методический подход к оценке метрологических рисков на основе теории редких событий может быть применён и на других видах транспорта (помимо воздушного), а также в иных (помимо транспорта) отраслях народнохозяйственной деятельности. Перспективной является разработка стратегии управления метрологическими рисками с точки зрения обеспечения их приемлемого уровня в области ОЕИ при осуществлении авиационной деятельности и развития предложенного методического подхода до уровня практических реализаций.

ГОСТ Р 55867 регламентирует основные положения метрологического обеспечения (МО) на воздушном транспорте. Стандарт является системным; определяет основные положения и устанавливает правила МО на ВТ, распространяющиеся на авиационные предприятия ВТ. Стандарт может также применяться в отношении МО авиационной деятельности промышленности и государственной авиации. Стандарт гармонизирован с DOC 9760 AN/967 (том 1, доп. В к гл. 7 «Содержание Руководства по процедурам организации по ТОиР») в части, касающейся процедур МО на ВТ: калибровки, обслуживания и ремонта измерительного оборудования. Кроме того, при разработке особое внимание было уделено гармонизации стандарта с положениями 102-ФЗ⁵.

В *ГОСТ Р 55847* изложены основные положения по выполнению контроля параметров технологического оборудования в системе ТОиР АТ на ВТ. В стандарте установлены общие гармонизированные с DOC 9760 AN/967 (том 1, гл. 7.2.9 «Оборудование, материалы») требования к процедурам и критериям отнесения оборудования, применяемого при ТОиР АТ (отечественного и зарубежного производства) к категории технологического оборудования, не подлежащего аттестации по ГОСТ Р 8.568⁶. Кроме того, в стандарте регламентированы правила организации

³ Doc 9760 AN/967. Руководство по лётной годности, том 1.

⁴ ГОСТ Р 55588-2013. Воздушный транспорт. Система менеджмента безопасности авиационной деятельности. Термины и определения.

⁵ Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

⁶ ГОСТ Р 8.568-2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

работ по контролю параметров стендового технологического оборудования и определён порядок решения вопросов, связанных с его МО.

Оба вышеуказанных стандарта разработаны впервые – ранее отсутствовали нормативные документы ранга национального (государственного) стандарта, регламентирующие процедуры организации работ по МО на ВТ и контролю параметров технологического оборудования.

В *ГОСТ Р 55255* содержатся основные положения организации работ по диагностике технического состояния АТ в системе ТОиР на ВТ. До появления *ГОСТ Р 55255* в России отсутствовал национальный стандарт, регламентирующий процедуры организации работ по диагностике технического состояния АТ ГА в эксплуатации, а также ОЕИ и МО при диагностике [5].

В подготовке первой редакции стандарта от института, помимо авторов настоящей статьи, принял участие также специалист из отдела 126 института.

ГОСТ Р 55253 содержит требования к применению, организации и проведению работ по неразрушающему контролю АТ и послужил заменой действовавшего на ВТ и во многом потерявшего актуальность *ОСТ 5430019-83*. При разработке с учётом практического профильного опыта авторов [5] особое внимание уделено гармонизации стандарта с положениями 102-ФЗ.

В *ГОСТ Р 55252* изложены основные положения, связанные с квалификацией и сертификацией персонала, осуществляющего неразрушающий контроль АТ на ВТ. Стандарт является модифицированным по отношению к стандарту Великобритании BS EN 4179⁷, а его наименование изменено относительно британского для приведения в соответствие с п. 3.5 *ГОСТ Р 1.5*⁸. В *ГОСТ Р 55252* установлены общие гармонизированные с европейскими стандартами (прежде всего, BS EN 4179) требования к процедурам подготовки, аттестации и сертификации специалистов по неразрушающим методам контроля элементов конструкций гражданских ВС.

В разработке *ГОСТ Р 55252* и *ГОСТ Р 55253*, помимо авторов настоящей статьи, участвовали также специалист из отдела 137 института и специалист ООО «НУЦ «Качество».

Общие новые тенденции в стандартах в области измерений, испытаний, инструментального контроля и обеспечения их единства на предприятиях АП

В рамках Программы национальной стандартизации на 2017–2020 гг. и договора с ФГУП «ВНИИНМАШ» (ныне – ФГБУ «Институт стандартизации») от 18.07.2017 № 16/114-2017 авторами настоящей статьи выполнена разработка первых редакций пяти национальных стандартов, являющихся пилотными в рамках серии «Система ОЕИ на предприятиях АП». Их разработка (табл. 1) велась на основе стандартов отрасли (авиационных стандартов) в целях актуализации, изменения статуса и приведения в соответствие с требованиями нормативно-правовых актов в области технического регулирования, ОЕИ и стандартизации.

Таблица 1

Пилотные национальные стандарты «Системы ОЕИ на предприятиях АП»

Разработанные национальные стандарты	Стандарты отрасли АП, на основе которых велась разработка национальных стандартов
<i>ГОСТ Р 58926-2020. Система ОЕИ на предприятиях АП. Основные положения</i>	<i>ОСТ 1 00227-77. Отраслевая система обеспечения единства измерений (ОСОЕИ). Основные положения</i>

⁷ BS EN 4179:2009 «Аэрокосмическая серия. Квалификация и утверждение персонала для неразрушающего контроля» (Aerospace series – Qualification and approval personnel for non-destructive testing).

⁸ *ГОСТ Р 1.5-2012. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.*

Окончание таблицы 1

Разработанные национальные стандарты	Стандарты отрасли АП, на основе которых велась разработка национальных стандартов
<i>ГОСТ Р 58929-2020. Система ОЕИ на предприятиях АП. Метрологическое обеспечение (МО) изделий авиационной техники (АТ)</i>	<i>ОСТ 1 00370-2005. ОСОЕИ. МО изделий авиационной техники. Основные положения ОСТ 1 00336-2008. ОСОЕИ МО изделий АТ. Общие требования</i>
<i>ГОСТ Р 58931-2020. Система ОЕИ на предприятиях АП. Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения</i>	<i>ОСТ 1 0022-2005. ОСОЕИ. Метрологическая экспертиза технических заданий, конструкторской и технологической документации. Организация и порядок проведения</i>
<i>ГОСТ Р 58930-2020. Система ОЕИ на предприятиях АП. МО автоматизированных средств контроля</i>	<i>ОСТ 1 00340-84. ОСОЕИ. МО автоматизированных средств контроля изделий АТ. Основные положения</i>
<i>ГОСТ Р 58928-2020. Система ОЕИ на предприятиях АП. Порядок проведения работ по МО испытательного оборудования</i>	<i>ОСТ 1 00422-2005. ОСОЕИ. Порядок проведения работ по МО испытательного оборудования</i>

Каждый из перечисленных в табл. 1 национальных стандартов является системным для своего направления применения; при этом областью их применения является гражданская АТ. В текстах всех перечисленных в табл. 1 стандартов отмечается также, что МО АТ является неотъемлемой частью систем менеджмента качества предприятий АП в части управления оборудованием для мониторинга и измерений согласно ГОСТ Р 58876⁹ и ГОСТ Р ИСО 9001¹⁰, положениями пунктов 7.1.5 которых руководствуются наряду с требованиями отечественного законодательства в области ОЕИ. Все стандарты из табл. 1, разработанные в рамках деятельности ТК 323, гармонизированы с ГОСТ Р 55588, ГОСТ Р 55867 и ГОСТ Р 56116, выполненными авторами настоящей статьи ранее под эгидой ТК 034. Таким образом обеспечено исполнение двух основных принципов стандартизации, заложенных в 162-ФЗ и базовом для ГСС стандарте ГОСТ Р 1.5, а именно: соблюдение преемственности деятельности в сфере стандартизации и обеспечение непротиворечивости документов национальной системы стандартизации.

Отличительные особенности разработанных пилотных стандартов системы ОЕИ на предприятиях АП

Далее показаны особенности разработанных впервые пилотных стандартов, учитывающих специфику ОЕИ в технологических процессах производственной деятельности АП.

В ГОСТ Р 58926 регламентировано, что под системой ОЕИ на предприятиях АП понимается совокупность субъектов, норм, средств и видов деятельности, предназначенная для ОЕИ. Установлены цели ОЕИ на предприятиях АП. Единство измерений на предприятиях АП следует обеспечивать как в сфере государственного регулирования ОЕИ, так и вне её. К сфере государственного регулирования ОЕИ в части производства гражданской АТ относятся измерения, определённые в 102-ФЗ (ч. 3 ст. 1), к которым установлены обязательные метрологические требования. К ним относятся измерения, выполняемые для обеспечения безопасности условий и охраны труда, промышленной безопасности, охраны окружающей

⁹ ГОСТ Р 58876-2020. Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонной промышленности. Требования.

¹⁰ ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.

среды в АП. Все остальные относятся к измерениям, осуществляемым вне сферы государственного регулирования ОЕИ.

Единство измерений на предприятии АП должно обеспечиваться организацией и проведением следующих метрологических работ: аттестации методик измерений и эталонов единиц величин; калибровки средств измерений (СИ) и специальных СИ (ССИ); поверки СИ; организации работ по утверждению типа СИ и стандартных образцов; метрологической экспертизы (МЭ) конструкторской и технологической документации на АТ; аккредитации для выполнения работ по ОЕИ; оценки соответствия программного обеспечения (ПО) СИ и измерительных систем [6]; организации внутреннего метрологического надзора за состоянием и применением СИ, аттестованными методиками измерений, эталонами единиц величин, соблюдением метрологических правил и норм; организации подготовки специалистов-метрологов и оценки их знаний и практических навыков. Правильность организации калибровки СИ и применения СИ, прошедших калибровку, должна обеспечиваться системой менеджмента измерений по ГОСТ Р ИСО 10012¹¹, которую рекомендуется интегрировать в систему управления качеством предприятия.

ГОСТ Р 58928 регламентирует порядок проведения работ по МО испытательного оборудования (ИО) в рамках системы ОЕИ на предприятиях АП, устанавливает цели, задачи и порядок их организации. Цель МО ИО – удовлетворение и предупреждение требований заказчиков к АТ, обеспечение её конкурентоспособности на рынке за счёт совершенствования испытаний изделий АТ на этапах её разработки, производства, эксплуатации. Основной задачей является обеспечение получения результатов испытаний, отвечающих установленным требованиям к характеристикам их качества, таким как полнота, точность, достоверность, своевременность и иным, определяющим пригодность полученных результатов для принятия решений по управлению качеством АТ и процессов её производства.

Аттестации подлежит ИО, воспроизводящее внешние и внутренние воздействующие на объект испытаний факторы и режимы функционирования объекта испытаний, установленные программой и методикой проведения испытаний. В стандарте – с учётом опыта [7] авторов – установлен порядок разработки и требования к оформлению и содержанию программ и методик аттестации ИО, а также установления периодичности его аттестации. Результаты аттестации ИО оформляют протоколом по предложенной в стандарте форме; при положительных результатах оформляют ещё и аттестат. При отрицательных результатах аттестации ИО к эксплуатации не допускается.

ГОСТ Р 58929 регламентирует общие вопросы МО изделий АТ на предприятиях АП. К основным целям МО АТ относятся: удовлетворение и предупреждение требований заказчиков к АТ; обеспечение конкурентоспособности АТ на рынке; повышение результативности и эффективности процессов управления качеством АТ на всех этапах жизненного цикла; разработка планов улучшения МО. Научной основой МО АТ является метрология. Организационной основой МО АТ и АП является совокупность метрологических служб и подразделений федеральных органов исполнительной власти, предприятий, осуществляющих проектирование, изготовление, эксплуатацию и утилизацию АТ и иной продукции АП. МО на предприятиях АП осуществляется в соответствии с законодательством в области ОЕИ, документами по стандартизации, регулирующими вопросы МО, распорядительными документами, принятыми в АП или применительно к АТ в части МО, а также внутренними документами предприятий АП. В стандарте на основе системного подхода регламентированы отдельные перечни работ по МО, выполняемым на стадиях разработки, производства и эксплуатации изделий АТ.

ГОСТ Р 58930 устанавливает основные положения МО автоматизированных средств контроля (АСК), входящих в бортовые, наземно-бортовые и наземные автоматизированные системы

¹¹ ГОСТ Р ИСО 10012-2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию.

контроля технического состояния изделий АТ, при их разработке, производстве, испытаниях, эксплуатации и ремонте. Работы по МО проводят на всех стадиях жизненного цикла АСК. МО испытаний АСК осуществляют с учётом требований, предъявляемых к испытаниям и приёмке опытных и серийных образцов изделий. В выполнении работ по МО АСК принимают участие все основные конструкторские подразделения под методическим руководством метрологической службы предприятия-разработчика и контролем заказчика.

МО при производстве и эксплуатации АСК включает в себя такое направление оценки как метрологически значимая часть программного обеспечения (ПО), применяемого для представления измерительной информации [6], входящего в комплект поставки АСК или СИ (ССИ) из состава АСК.

ГОСТ Р 58931 определяет организацию и порядок проведения МЭ технических заданий, конструкторской и технологической документации в рамках системы ОЕИ на предприятиях АП. МЭ конструкторской и технологической документации – это анализ и оценка технических решений по установлению и/или подтверждению требований к количественным характеристикам свойств изделия или процесса, а также возможности проверки их соответствия установленным требованиям, с учётом заданных норм точности, имеющихся методик и СИ (ССИ), средств инструментального контроля, испытаний, а также условий их применения. В стандарте учтены наработки [8], полученные авторами на основе многолетнего практического опыта проведения МЭ конструкторской и технологической документации на АТ. МЭ проводят с целью обеспечения требуемого качества измерительной информации, а также исключения возможности или снижения степени возникновения метрологических рисков негативных ситуаций в авиационной деятельности. МЭ является частью комплекса работ по МО разработки, производства, испытания и эксплуатации изделий АТ. В стандарте регламентирована номенклатура конструкторской и технологической документации, подлежащей МЭ.

Перспективная программа стандартизации в области беспилотных авиационных систем (БАС) на период 2024-2032 гг.

Предложения ФГУП ГосНИИ ГА (НЦ ПЛГВС ГосНИИ ГА) по включению профильных для отдела главного метролога (№ 143) дополнительных стандартов в Перспективную программу стандартизации в области БАС на период 2024–2032 гг. представлены в табл. 2.

Таблица 2

Дополнительные стандарты в Перспективную программу стандартизации в области БАС на период 2024-2032 гг. предложенные ФГУП ГосНИИ ГА.

№№	Наименования предлагаемых для разработки стандартов ГОСТ Р	Сроки разработки: начало/окончание
1	БАС. Метрологическое обеспечение эксплуатации БАС. Основные положения	2025/2027
2	БАС. Метрологическое обеспечение производства БАС. Основные положения	2025/2027
3	БАС. Метрологическое обеспечение методов испытаний БАС. Основные положения	2026/2028
4	БАС. Метрологическое обеспечение испытательного оборудования БАС. Основные положения	2026/2028
5	БАС. Безопасность труда при эксплуатации БАС. Общие требования	2027/2029
6	БАС. Охрана окружающей среды при эксплуатации БАС. Общие требования	2027/2029

Отметим, что вопросы ОЕИ и МО в процедурах охраны окружающей среды и обеспечения безопасности труда занимают значительный объём и содержат наиболее значимую часть проводимых в этих направлениях работ. Предполагается, что Росстандарт уже в июне 2024 г. подготовит окончательную редакцию Перспективной программы для последующего её направления для утверждения на правительственном уровне.

О ежегодном государственном докладе о состоянии работ в сфере стандартизации

Федеральный орган исполнительной власти (ФОИВ), осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере стандартизации (Росстандарт), согласно п. 3 ст. 8 гл. 3 162-ФЗ представляет в Правительство Российской Федерации ежегодный государственный доклад о состоянии работ в сфере стандартизации. Для подготовки этого доклада от ФОИВ запрашивается информация о состоянии работ в сфере стандартизации в установленной сфере деятельности, в том числе и от Минтранса России и его агентства – Росавиации. Требуется информация по следующим направлениям: формирование разделов по стандартизации при разработке документов стратегического планирования; потребности и направления развития стандартизации в установленной сфере деятельности; наименование утверждённых федеральным органом исполнительной власти и/или планируемых к утверждению перспективных программ стандартизации по приоритетным направлениям в установленной сфере деятельности (отраслевые /межведомственные программы стандартизации); повышение квалификации кадрового состава в сфере стандартизации, и ряд других, по состоянию за предшествующий год. Запросы из Минтранса России перенаправляются в ФГУП ГосНИИ ГА. Для предоставления необходимой и достаточной информации, отражающей реальное и предиктивное состояния работ по стандартизации на ВТ, в Проект научных тем НИОКР отдела метрологии и стандартизации (№ 143) на 2025 год для направления запроса в Минтранс России (во исполнение Поручения п. 6 Протокола от 12.02.24 № 7 оперативного совещания генерального директора ФГУП ГосНИИ ГА) была направлена тема: «Провести исследования и анализ состояния работ по стандартизации в гражданской авиации, и разработать рекомендации по его совершенствованию».

Кроме того, указанная НИР позволила бы установить приоритетные направления для включения в Программу национальной стандартизации Российской Федерации на 2026 год (раздел «Авиационная техника», подраздел «Эксплуатация авиационной техники»), в том числе касающиеся вопросов МО цифровой платформы и применения искусственного интеллекта в технологических процессах производственной деятельности на ВТ.

Заключение

На основе системного подхода установлена структурная последовательность осуществления технического регулирования путём проведения работ по национальной стандартизации авиационной деятельности на ВТ и в АП.

Показано, что проведение разработки, внедрения и применения национальных стандартов является эффективным инструментом осуществления технического регулирования в области ОЕИ на транспорте и в промышленности. Однако обязательность их применения отечественным законодательством не предусмотрена – все они вводятся для добровольного применения, т. е. носят рекомендательный характер.

Под научным руководством А. А. Богоявленского и при непосредственном участии авторов настоящей статьи в рамках Программы национальной стандартизации во ФГУП ГосНИИ ГА разработаны и утверждены Росстандартом национальные стандарты в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации и производстве

авиационной техники, среди которых семь стандартов в рамках ТК 034 «Воздушный транспорт» и пять стандартов новой серии «Система обеспечения единства измерений на предприятиях авиационной промышленности» в рамках ТК 323 «Авиационная техника».

В развитие Doc 9760 AN/967 авторами разработан стандарт ГОСТ Р 54580 по мониторингу массы и центровки ВС при эксплуатации ВС, наша страна – единственное из государств – членов ИКАО, имеющее национальный стандарт, что отмечено инспекционной группой по оценке безопасности полётов ИКАО, проводившей профильную проверку российской ГА.

Показано, что МО АТ является неотъемлемой частью систем менеджмента качества организаций АП в части управления оборудованием для мониторинга и измерений согласно положениям пунктов 7.1.5 ГОСТ Р 58876 и ГОСТ Р ИСО 9001 (наряду с требованиями отечественного законодательства в области ОЕИ).

Имеется необходимость в разработке национальных стандартов на основе стандартов отраслевой системы ОЕИ в ГА, поскольку 162-ФЗ среди документов по стандартизации не предусмотрены стандарты отрасли (отраслевые или авиационные стандарты). Однако отсутствие источников бюджетного финансирования делает фактически неисполнимой решение этой задачи, поскольку работа на безвозмездной основе противоречит положениям Устава института.

Определены потребности и перспективы в тематике разработки новых национальных стандартов. В первую очередь к ним следует отнести БАС, цифровую платформу, искусственный интеллект, сертификацию программного обеспечения СИ для ВТ.

Актуальной является разработка национальных стандартов в развитие стандартов ИКАО с учётом особенностей авиационной деятельности для отечественного ВТ, в том числе в области измерений, испытаний, инструментального контроля, обеспечения их единства при эксплуатации и производстве авиационной техники.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Гипич Г. Н., Скрипниченко С. Ю., Шапкин В. С., Богоявленский А. А., Плешаков А. И. Об организации работ по стандартизации на воздушном транспорте с учётом национальных приоритетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 199(1). С. 44–51.
2. Богоявленский А. А., Гипич Г. Н., Шапкин В. С. Единый подход к национальным стандартам менеджмента риска в системе факторного управления безопасностью авиационной деятельности // Экономика качества. 2015. № 10. С. 73–78.
3. Богоявленский А. А. Эксплуатационный мониторинг массы и центровки воздушных судов и факторы, влияющие на результаты измерений // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 4. С. 46–52.
4. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Об организации и проведении работ по обеспечению единства измерений на воздушном транспорте // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2012. № 2(313). С. 24–29.
5. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Метрологическое обеспечение работ по неразрушающему контролю и диагностированию авиационной техники // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 175. С. 154–157.
6. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л., Боков А. Е., Матюхин К. Е. О сертификации программного обеспечения средств измерений и информационно-измерительных систем, применяемых в гражданской авиации // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 86–90.
7. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Стендовое оборудование для технического обслуживания вертолётов Ми-8, Ми-17 и его метрологические исследования // Мир измерений. 2015. № 4. С. 12–20.
8. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Об опыте проведения метрологической экспертизы технической документации на авиационную технику: критерии, методология, результаты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14(325). С. 40–55.

References

1. Gipich G. N., Skripnichenko S. Y., Shapkin V. S., Bogoyavlenskiy A. A., Pleshakov A. I. On organization of works on standardization of air transport with the account national priorities. *Civil Aviation High Technologies*, 2014, no. 199(1), pp. 44–51. (In Russ.)
2. Bogoyavlenskiy A. A., Gipich G. N., Shapkin V. S. Edinyj podkhod k natsional'nym standartam menedzhmenta riska v sisteme faktornogo upravleniya bezopasnost' yu aviatsionnoj deyatel'nosti. *Ehkonomika kachestva*, 2015, no. 10, pp. 73–78. (In Russ.)
3. Bogoyavlenskiy A. A. Operational monitoring of mass alignment and aircraft and factors affecting the results of measurements. *Aerospace Instrument-Making*, 2016, no. 4, pp. 46–52. (In Russ.)
4. Bogoyavlenskiy A. A., Ermolaeva O. L. On the organization and carrying out of works on maintenance the uniformity of measurements in air transport. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2012, no. 2(313), pp. 24–29. (In Russ.)
5. Bogoyavlenskiy A. A., Ermolaeva O. L. The metrological maintenance of works on nondestructive testing and diagnostics of aviation technique. *Civil Aviation High Technologies*, 2012, no. 175, pp. 154–157. (In Russ.)
6. Bogoyavlenskiy A. A., Ermolaeva O. L., Bokov A. E., Matiukhin K. E. About certification of measure means program ensurance and information-measuring systems using in civil aviation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 86–90. (In Russ.)
7. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. Stendovoe oborudovanie dlya tekhnicheskogo obsluzhivaniya vertolyotov Mi-8, Mi-17 i ego metrologicheskie issledovaniya. *Measurements World*, 2015, no. 4, pp. 12–20. (In Russ.)
8. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. About the experience of conducting metrological examination of technical documentation for aircraft: criteria, methodology and results. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 14(325), pp. 40–55. (In Russ.)

Информация об авторах

Богоявленский Анатолий Александрович, доктор технических наук, главный метролог ГосНИИ ГА, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации Москва, Россия, bogoyavlenskiy_aa@ncplg.ru

Боков Алексей Евгеньевич, старший инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Authors information

Bogoyavlenskiy Anatoliy A., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Metrologist of GosNII GA, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, bogoyavlenskiy_aa@ncplg.ru

Bokov Alexey E., Senior Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 31.05.2024.
The article was submitted 28.05.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 31.05.2024.

Обзорная статья

УДК 656.7.052:351.814.335.82

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГРУЖЕННОСТИ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ АЭРОНАВИГАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

С. Л. ОЛЕКСИН¹, И. Н. ШЕСТАКОВ²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

² Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье изложены основные результаты анализа «Методики определения нормативных значений пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения» (далее – Методика) в контексте реализации основного направления развития Глобального аэронавигационного плана на 2016–2030 гг., принятого ИКАО, предусматривающего динамическое управление пропускной способностью. Представлены результаты моделирования потоков воздушных судов (ВС) в секторе районного диспетчерского центра (РДЦ) и процесса формирования загруженности контура управления (композиция «ассоциаций» информационного и кодового множества сообщений) в системе аэронавигационного обслуживания воздушного движения (ОВД) на этапе информационного обеспечения технологических процессов (ТП) ОВД. Показана необъективность расчётных данных, получаемых при использовании Методики, определены пути её устранения. Обоснована целесообразность трансформации показателя загруженности диспетчера управления воздушным движением (УВД) системой интегральных и дифференциальных коэффициентов занятости при определении нормативов пропускной способности (НПС) секторов (зон) ОВД по базовым сечениям нагрузки, представляющих собой соотношение интенсивности и плотности воздушного движения. Предложены рекомендации по фиксации временных затрат диспетчера УВД на выполнение технологических операций для определения показателя загруженности.

Ключевые слова: аэронавигация, аэронавигационное обслуживание воздушного движения, управление воздушным движением, воздушное судно, воздушная обстановка, интеллектуальные транспортные системы, транспортные системы страны

Для цитирования: Олексин С. Л., Шестаков И. Н. Анализ процесса формирования загруженности контура управления в системе аэронавигационного обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 53–61.

ANALYSIS OF THE PROCESS OF FORMATION OF THE WORKLOAD OF THE CONTROL LOOP IN THE AIR NAVIGATION SERVICE SYSTEM OF AIR TRAFFIC

S. L. OLEKSIN¹, I. N. SHESTAKOV²

¹ Saint Petersburg State University of Civil Aviation
named in Honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

² The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the main results of the analysis of the Methodology for determining the throughput capacity standards of air traffic service control rooms (sectors) (hereinafter referred to as the Methodology) in the context of the implementation of the main direction of development of the Global Air Navigation Plan for 2016–2030, adopted by ICAO, which provides for dynamic control of throughput capacity. The paper presents the results of modeling aircraft flows in the sector of the District Control Center and the process of forming the workload of the control loop in the air navigation service system (ATS) at the stage of information support of ATS technological processes, which is a composition of “associations” of information and code messages. The bias of the calculated data obtained when using the Methodology is proved, and the ways of its elimination are determined. The expediency of transforming the air traffic controller (ATC) workload indicator by the system of integral and differential employment coefficients when determining the throughput capacity standards of sectors (zones) by the basic load sections, which are the ratio of air traffic intensity and density, is substantiated. Recommendations are proposed for fixing the time spent by the ATC on the performance of technological operations to determine the indicator of his workload.

Keywords: air navigation, air navigation services, air traffic control, aircraft, air situation, intelligent transport systems, country transport systems

For citation: Oleksin S. L., Shestakov I. N. Analysis of the process of formation of the workload of the control loop in the air navigation service system of air traffic, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 53–61. (In Russ.)

Введение

Пропускная способность органов ОВД определяет основные характеристики аэронавигации и безопасности воздушного движения. Практически все ТП (планирование, координация, использование воздушного пространства, организация, обслуживание и управление воздушным движением) строятся исходя из конкретных показателей пропускной способности системы ОВД.

Для увеличения пропускной способности в транспортных системах страны проектируются и внедряются перспективные автоматизированные системы [1], совершенствуются технологии [2] и повышаются требования к профессиональной подготовке персонала [3]. С момента формирования основ теории УВД в качестве оценки занятости диспетчера принят относительный показатель загруженности, представляющий собой отношение общего времени занятости диспетчера по выполнению технологических операций ко времени, в течение которого происходила фиксация его занятости. В качестве количественного критерия, как правило, принималось время занятости каналов связи (наземной и воздушной). Несколько десятилетий назад этот критерий был актуален, поскольку всю необходимую и достоверную информацию авиадиспетчер получал одновременно с индикаторов средств наблюдения (радиолокационных станций), автоматического радиопеленгатора и по докладам экипажей, а также от операторов смежных секторов и объектов ОВД.

Современные автоматизированные системы и комплексы средств автоматизации упростили решение задач определения позиционирования ВС, значительно сократилось использование наземных и воздушных каналов связи, но концепция определения показателя загруженности осталась прежней. При этом допустимые и предельно допустимые значения показателя загруженности являются базовым элементом в выборе аналитических зависимостей НПС секторов и зон ОВД.

Одним из важных направлений стратегии развития Глобального аэронавигационного плана на 2016–2030 гг., принятого ИКАО, является оптимизация и гибкость пропускной способности. Принятые инициативы по его реализации предусматривают организацию динамического управления пропускной способностью и структурой диспетчерских пунктов, а также гибкое и оперативное планирование загрузки персонала УВД.

Однако практическое внедрение этих инициатив и направлений в целом невозможно в силу специфики Методики, утверждённой Приказом Федерального агентства воздушного транспорта¹, определяющей пропускную способность как некоторое фиксированное значение интенсивности воздушного движения (ВД), соответствующее допустимым нормам загруженности диспетчерского персонала. Эта концепция исключает управление пропускной способностью органов ОВД и не предусматривает её гибкость и динамику.

В статье описан доказательный эксперимент, показывающий необъективность расчётных данных, получаемых при применении данной Методики, показаны пути уточнения данных и усовершенствования Методики.

Описание и проведение эксперимента

За основу доказательного эксперимента возьмём один из наиболее загруженных секторов РДЦ «Запад-1» Московского центра УВД, ТП в котором моделировались на тренажёрном оборудовании автоматизированной системы «Синтез-АР4». К ОВД был привлечён диспетчер-инструктор 1-го класса. Психофизиологическое состояние диспетчера фиксировалось пульсоксиметром, отображающим такие параметры, как: частота пульса (ЧП), относительная длительность систолы (%ED), список типов пульсовой кривой (ТК с параметрами А, В, С), индекс стресса (Стресс) и насыщение крови кислородом (SpO2). Установленное согласно Методике расчётное значение НПС составляет 67 ВС/ч. Были смоделированы ситуации с различной плотностью ВД (количество ВС, одновременно находящихся под управлением и контролем диспетчера УВД) и интенсивностью ВД до расчётного значения НПС.

Эксперимент 1. При интенсивности ВД 48 ВС/ч, составляющей 70 % от НПС при плотности 20 ВС, процесс ОВД реализован сравнительно успешно, но дважды не были обеспечены заявленные экипажами программы полётов ВС и в течение 1 мин 52 с зафиксирована стрессовая ситуация (рис. 1), что было подтверждено вербальным протоколом диспетчера и показаниями пульсоксиметра (частота пульса – выше среднего значения, относительная длительность систолы – не превышает норму, список типов пульсовой кривой – фиксирует его напряжённость, индекс стресса – выше нормы и фиксирует усталость, насыщение крови кислородом – низкое, но в пределах нормы). Имела место локальная перегрузка.

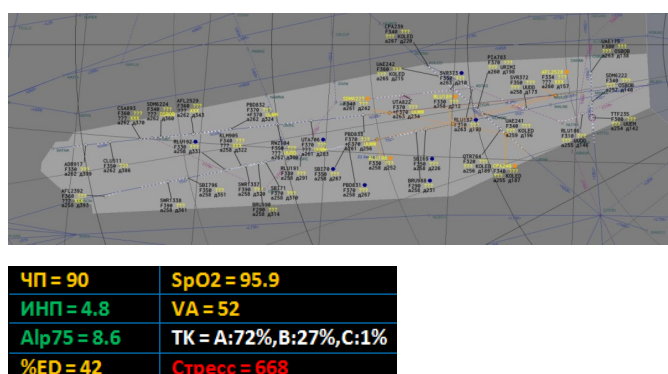


Рис. 1. Воздушная обстановка в секторе «Запад 1» при интенсивности ВД 48 ВС/ч (ИНП – индекс наполнения пульса, VA – возраст сосудов, Alp – жёсткость сосудов)

Эксперимент 2. При интенсивности ВД 52 ВС/ч, составляющей 78 % от НПС, при плотности ВД 32 ВС, диспетчеру УВД частично удалось предотвратить ряд нарушений интервалов

¹ Приказ от 7 ноября 2012 г. № 757 «Об утверждении методики определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения».

эшелонирования. Однако 5 из 12 событий остались нереализованными. Кроме этого, имели место опасное сближение и 6 случаев невыполнения программ полётов; двум ВС не было предоставлено диспетчерское обслуживание (не установлена коммуникация с экипажами). По итогам вербального протокола можно судить, что воздушная обстановка (ВО) развивалась спонтанно и реализовать её практически было невозможно из-за занятости канала связи. Локальная перегрузка составила 14 мин (рис. 2). Все физиологические параметры диспетчера превышали нормативные значения, были зафиксированы устойчивая стрессовая ситуация, переутомление и риск возникновения аритмии. Фактическая пропускная способность сектора РДЦ исчерпала себя.

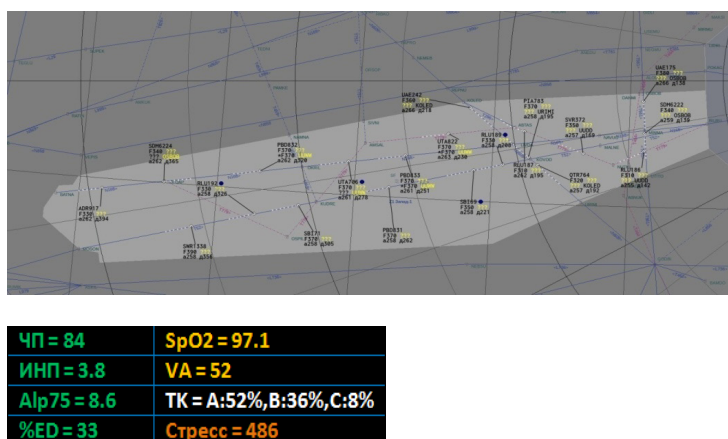


Рис. 2. Воздушная обстановка в секторе «Запад 1» при интенсивности ВД 52 ВС/ч

Эксперимент 3. При интенсивности ВД сопоставимой с НПС (около 90 %) при плотности ВД 48 ВС, развитие ВО происходило в течение 25 мин условного часа. К ОВД был привлечён дополнительный диспетчер с возможностью ведения коммуникации на аварийной частоте. При этом четыре ВС не получили диспетчерского обслуживания, было зафиксировано опасное сближение, три нарушения интервалов эшелонирования, а также семь случаев несоблюдения программы полётов. Как позже выяснилось из протокола, все эти случаи произошли по причинам, не зависящим от квалификации авиадиспетчеров. Локальная перегрузка составила 20 мин (рис. 3), однако все значения показателя загруженности были практически одинаковыми и составляли только 50 % от предельно допустимого, хотя все физиологические параметры превышали нормативные значения. Также были зафиксированы длительная, существенная стрессовая ситуация и переутомление диспетчера. Фактическая пропускная способность сектора РДЦ, как и в эксперименте 2, исчерпала

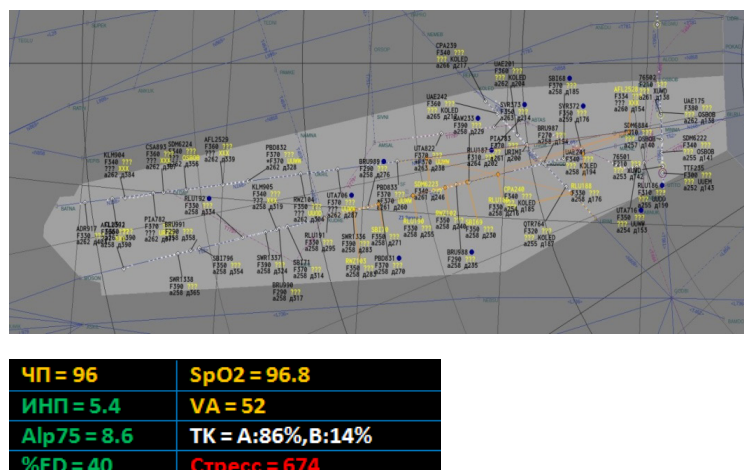


Рис. 3. Воздушная обстановка в секторе «Запад 1» при интенсивности ВД 59 ВС/ч

себя даже при работе двух диспетчеров УВД. Эксперимент 3 подтверждает необъективность результатов определения НПС, основанных на действующей Методике.

Как показали результаты эксперимента, при неоднородном потоке ВС (различной плотности и интенсивности ВД) значение показателя загруженности диспетчера, определяемого по Методике, оставалось практически одинаковым и не превышало 50 % от предельно допустимого значения. Доказать или опровергнуть достоверность этого опытным путём достаточно сложно ввиду специфических индивидуальных особенностей диспетчеров УВД, поэтому в статье приведены результаты анализа технологической деятельности персонала ОВД, сформированные на базе основных положений качественной теории информации, и определены направления совершенствования концепции определения загруженности авиадиспетчеров.

Метод исследования

Объяснить изложенный в заключительном абзаце предыдущего раздела «Описание и проведение эксперимента» феномен можно тем, что загруженность диспетчера УВД [4] обусловлена выполнением им ряда технологических операций, состоящих из совокупности актов деятельности, которые соответствуют определённому классу задач по ОВД. При этом завершающим этапом процесса управления является принятие решения на основании анализа информации, содержащейся в ряде сообщений. В этом случае смысл термина «сообщение» носит не только речевой (коммуникация по наземным и воздушным каналам связи), но и образный характер. Используя предложенный понятийный аппарат, можно определить воздействие в контуре управления как преобразование оригиналов в образы с помощью промежуточных сообщений.

Процесс формирования загруженности контура управления в системе аэронавигационного ОВД на этапе информационного обеспечения ТП представляет собой композицию «ассоциаций» из информационного (поперечного) и кодового (продольного) множеств сообщений.

В данном случае ВО (оригинал [Original] – «О»), формируемая в определённом, выделенном для полётов пространстве при помощи радиотехнических средств наблюдения и отображения радиолокационной информации, «процедурного» контроля (промежуточных сообщений [Intermediate messages] – «М») воспринимается диспетчером в виде образной картины (образ [figurative picture] – «Р»). Пусть O_1 представляет собой некоторое воздушное пространство, границы которого определены географическими координатами; O_2 – множество ВС; O_3 – ВО, представляющая собой рассредоточение O_2 в ограниченном пространстве O_1 в пределах установленных воздушных трасс. Далее, все эти объекты масштабируются, кодируются и синхронизируются по времени в виде кодово-символьных обозначений.

Так реальное воздушное пространство O_1 представляется на мониторе (K_{1OM}), как условная маршрутная карта M_1 . ВС на основании первичной и вторичной радиолокационной информации представляются в виде радиолокационных «синтетических» отметок, к которым «привязываются» формуляры (K_{2OM}) сопровождения или ожидания – M_2 . Таким образом, вся обобщённая информация отображается на таблично-знаковых индикаторах, мониторах и α -скопах (K_{3OM}) в виде динамической мультипликативной картины – M_3 . На основании полученной таким образом информации в виде кодосимвольных обозначений структуры воздушного пространства сектора УВД (K_{1MP}), ВС (K_{2MP}) и их позиционирования (K_{3MP}) у диспетчера УВД формируется образное представление о динамике развития реальной ВО P_3 в определённом секторе (зоне) УВД. Вышеописанный ТП информационного обеспечения ОВД (рис. 4) представляет собой композицию «ассоциаций» из поперечного и продольного множеств сообщений.

Основываясь на классических постулатах теории информации [5], можно аналитически описать результирующую информацию I_{P13} , обрабатываемую диспетчером при аэронавигационном ОВД.

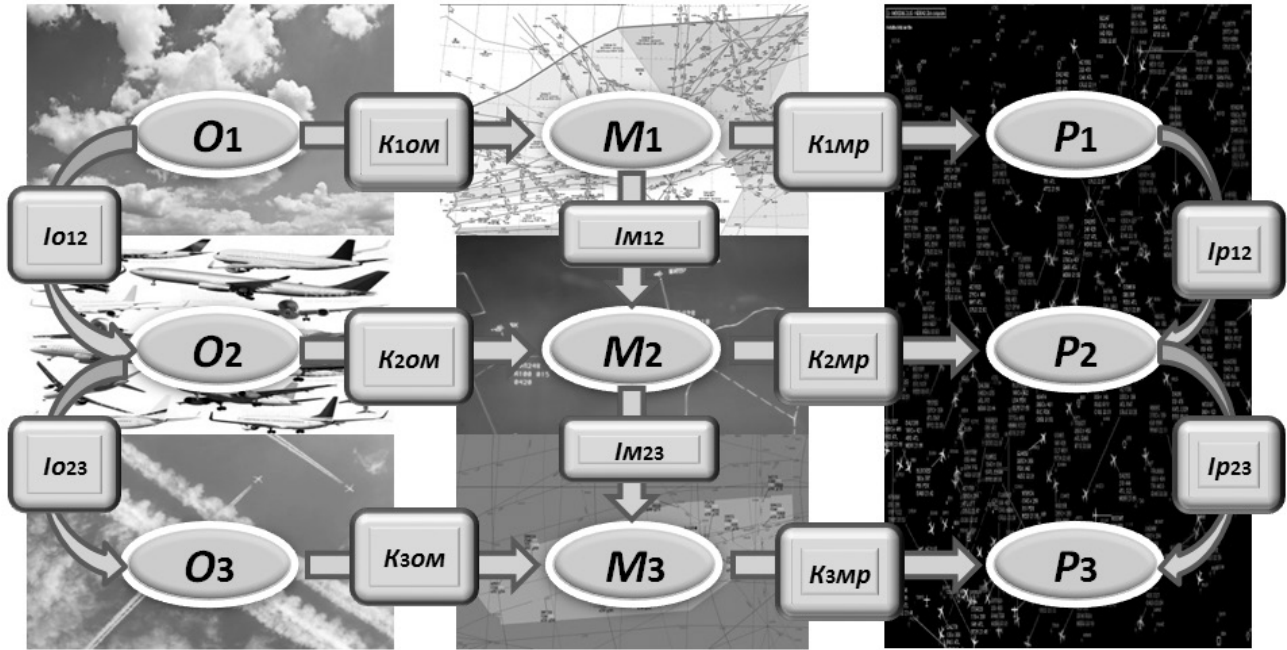


Рис. 4. Контур управления в системе аэронавигационного ОВД

Представим реальную ВО выражением:

$$O_3 = I_{O23} O_2 = I_{O12} I_{O23} O_1 = I_{O13} O_1, \quad (1)$$

где I_{O12} , I_{O23} – информация о воздушном пространстве и ВС (источниках сообщений); I_{O13} – информация о реальной воздушной обстановке.

При этом три основные компоненты ВО, представленные на технических средствах наблюдения и отображения информации, описываются следующим образом:

- воздушное пространство сектора представляется в виде выражения:

$$M_1 = K_{1OM} O_1,$$

- ВС, рассредоточенные в пределах границ исследуемого сектора:

$$M_2 = K_{2OM} O_2.$$

Таким образом, ВО в итоге есть промежуточное сообщение вида:

$$M_3 = K_{3OM} O_3. \quad (2)$$

Исходя из вышесказанного, опишем формирование у диспетчера УВД образных картин соответственно по:

- организационной структуре воздушного пространства сектора (зон) ОВД:

$$P_1 = K_{1MP} M_1,$$

- взаимному рассредоточению ВС друг относительно друга:

$$P_2 = K_{2MP} M_2.$$

И наконец, образ ВО:

$$P_3 = K_{3MP} M_3.$$

Подставим в (2) выражение для O_3 из (1):

$$M_3 = K_{3OM} I_{O13} O_1$$

и получим:

$$O_1 = \frac{M_1}{K_{1OM}} = M_1 K_{1MO}.$$

Окончательно выражение (2) примет вид:

$$M_3 = K_{3OM} I_{O13} M_1 K_{1MO}.$$

С другой стороны, если представить промежуточные сообщения в виде информационных ассоциаций:

$$M_2 = I_{M12} M_1; M_3 = I_{M13} M_1,$$

то M_3 можно записать как

$$M_3 = I_{M12} I_{M23} M_1 = I_{M13} M_1.$$

Тогда

$$I_{M13} M_1 = K_{3OM} I_{O13} M_1 K_{1MO};$$

Используя полученное выражение, запишем формулу для I_{M13} – результирующей информации о ВО, получаемой средствами радиолокационного наблюдения:

$$I_{M13} = K_{3OM} I_{O13} K_{1MO}.$$

Аналогичным образом можно получить и выражения для результирующей информации, обрабатываемой диспетчером в процессе формирования образа ВО:

$$I_{P13} = K_{3MP} I_{M13} K_{1PM};$$

$$I_{P13} = K_{3MP} K_{3OM} I_{O13} K_{1MO} K_{1PM}.$$

Исходя из представленного математического аппарата, можно утверждать, что:

$$I_{P13} = K_{3OP} I_{O13} K_{1PO}. \quad (3)$$

где K_{3OP} – занятость диспетчера УВД при анализе ВО и выполнении пультовых операций по обеспечению полётов ВС; K_{1PO} – занятость диспетчера УВД по согласованию реализуемых технологических процедур.

Выражение (3) является результирующим; вывод формулы, описывающей ТП информационного обеспечения ОВД, выходит за рамки настоящего исследования.

Результаты исследования

Анализируя формулу (3), можно утверждать, что качество информационного обеспечения, а следовательно, и загруженность диспетчерского персонала определяются прежде всего уровнем

автоматизации системы ОВД [6]. Однако при оценке коэффициента загруженности K_3 , наряду с занятостью каналов речевой связи I_{013} , следует учитывать занятость диспетчера УВД эксплуатацией периферийных устройств автоматизированных систем УВД (выполнении пультовых операций) по обеспечению полётов ВС и согласованию реализуемых технологических процедур. Другими словами, от момента возникновения задачи по ОВД до момента её реализации. Это утверждение является ключевым, поскольку определение непосредственно пропускной способности конкретного района, сектора или элемента системы ОВД основывается, прежде всего, на значении коэффициента загрузки диспетчера K_3 при обслуживании ВД с предельно допустимой интенсивностью.

Обсуждение полученных результатов

В настоящее время, согласно действующей Методике, интенсивность ВД, которая соответствует допустимому уровню загруженности диспетчера УВД (показатель загруженности $K_3 = 0,55$), является НПС органов ОВД. При этом показатель загруженности определяется занятостью различных каналов коммуникации (наземной и воздушной связи) в виде отношения времени, затраченного диспетчером УВД на непосредственное ОВД, к промежутку времени, в течение которого фиксировалась его занятость.

Однако согласно (3) это утверждение не является корректным, поскольку имеет место ещё один немаловажный аспект фиксирования временных затрат диспетчера по реализации технологических процедур. Речь идёт о возможности совмещения процедуры ведения радиосвязи с экипажем и выполнения соответствующих пультовых операций на периферийном оборудовании автоматизированных систем ОВД, включая процедурный контроль. Поэтому время, затрачиваемое диспетчером на решение определённого класса задач, следует фиксировать от момента начала их реализации до момента окончания, включая работу с оборудованием.

Заключение

НПС секторов (зон) ОВД являются основой формирования потоков ВС при условиях минимизации интенсивности возникновения пиковых нагрузок, регулирования технологических процедур и организации структуры воздушного пространства (диспетчерских зон, районов аэродромов и районных центров), а также обеспечения допустимого значения показателя загруженности диспетчера K_3 .

Однако при определении временной занятости диспетчера, наряду с загруженностью каналов речевой связи и анализом ВО, следует дополнительно учитывать контактное время по пультовым операциям на периферийном оборудовании систем УВД для информационного обеспечения ТП. Эта процедура крайне неудобна. Поэтому при проведении научных исследований, комплексном анализе технологической деятельности и проектировании воздушного пространства в качестве критериев загрузки диспетчера УВД можно использовать соотношение интегральных и дифференциальных коэффициентов занятости, определяемых интенсивностью потоков задач ОВД (оперативного управления, процедурного контроля, информационного обеспечения ТП) и интенсивностью их решения, что согласуется с аналитическим выражением (3).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Шестаков И. Н. Интеграция и автоматизация процессов выполнения полётов и управления воздушным движением // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. № 107. С. 170–179.

2. Шестаков И. Н. Технология повышения результативности функционирования системы организации воздушного движения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 3. С. 1–5.
3. Крыжановский Г. А., Купин В. В., Самойлов В. А., Шестаков И. Н. Когнитивный подход к первоначальной профессиональной подготовке операторов аэронавигационных систем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2021. № 4(33). С. 69–83.
4. Олексин С. Л., Шейко Э. В. Исследование влияния организационной структуры диспетчерского пункта на характеристики пропускной способности секторов РЦ // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 3(36). С. 98–106.
5. Мазур Г. Качественная теория информации. Москва: Мир, 1974. 238 с.
6. Олексин С. Л., Михальчевский Ю. Ю. Математическое моделирование процессов реализации задач информационного обеспечения технологических процессов обслуживания воздушного движения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 2(35). С. 79–88.

References

1. Shestakov I. N. Integration and automation of processes of performance of flights and managements of air movement. *Civil Aviation High Technologies*, 2006, no. 107, pp. 170–179. (In Russ.)
2. Shestakov I. N. Technique to improve operability of air traffic control system. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2009, no. 3, pp. 1–5. (In Russ.)
3. Kryzhanovskii G. A., Kupin V. V., Samoilov V. A., Shestakov I. N. Cognitive approach to the initial professional training of operators of aeronautical systems. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2021, no. 4(33), pp. 69–83. (In Russ.)
4. Oleksin S. L., Sheiko E. V. Investigation of the influence of the organizational structure of the control room on the characteristics of the throughput of RC sectors, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2022, no. 3(36), pp. 98–106. (In Russ.)
5. Mazur G. *Kachestvennaya teoriya informatsii [Qualitative Information Theory]*. Moscow, Mir Publ., 1974, 238 p. (In Russ.)
6. Mikhalevskiy Yu. Yu., Oleksin S. L. Mathematical modeling of the processes of implementation of the flow of tasks of information support of technological processes of air traffic maintenance, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2022, no. 2(35), pp. 79–88. (In Russ.)

Информация об авторах

Олексин Сергей Львович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления воздушным движением, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, aviaita@mail.ru

Шестаков Иван Николаевич, доктор технических наук, доцент, учёный секретарь, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shestakovin@gosniiga.ru

Authors information

Oleksin Sergey L., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Air Traffic Control, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in Honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia, aviaita@mail.ru

Shestakov Ivan N., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shestakovin@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 09.02.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 27.05.2024.
The article was submitted 09.02.2024; approved after reviewing 20.05.2024; accepted for publication 27.05.2024.

Научная статья

УДК 621.396.933:629.783

КОНЦЕПЦИЯ МЕТОДИКИ УЧЁТА ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ В ШИРОКОЗОННЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СООБЩЕНИЙ ADS-B WX И ДВУХЧАСТОТНЫХ ПРИЁМНИКОВ ГНСС

А. С. КАЛИНЦЕВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Предложена концепция методики учёта влияния тропосферной задержки, основанная на использовании перспективных технологий в гражданской авиации (ГА): сообщений АЗН-В верс. 3 и двухчастотных приёмников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на наземных станциях АЗН-В. Отличительной особенностью концепции предложенной методики является учёт реальных параметров атмосферы. Определение температуры воздуха в районе станции АЗН-В предлагается осуществлять с использованием значений барометрической и геометрической высот, передаваемых в сообщениях АЗН-В верс. 2. Коррекция показателя преломления в районе наземной станции выполняется по значениям тропосферной задержки, полученной с использованием двухчастотных приёмников ГНСС. Выполненное компьютерное моделирование показало, что применение концепции предложенной методики для рассматриваемого случая позволяет снизить среднее значение квадратного корня из среднеквадратической ошибки (RMSE) определения местоположения в вертикальной плоскости с 334,0 до 18,6 м.

Ключевые слова: тропосферная задержка, коэффициент рефракции, беспилотное воздушное судно, управление воздушным движением, обслуживание воздушного движения, воздушное судно, гражданская авиация, интеллектуальные транспортные системы, транспортная система страны

Для цитирования: Калининцев А. С. Концепция методики учёта тропосферной задержки в широкозонных многопозиционных системах наблюдения при использовании сообщений ADS-B Wx и двухчастотных приёмников ГНСС // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 62–73.

THE CONCEPT OF A METHODOLOGY FOR ACCOUNTING FOR TROPOSPHERIC DELAY IN WIDE-BAND MULTI-POSITION SURVEILLANCE SYSTEMS USING ADS-B WX MESSAGES AND DUAL-FREQUENCY GNSS RECEIVERS

A. S. KALINTSEV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The paper proposes a methodology for accounting for the influence of tropospheric delay based on the use of potential technologies in civil aviation. ADS-B messages version 3 and dual-frequency GNSS receivers at ADS-B ground stations. A distinctive feature of the proposed methodology is the consideration of the real parameters of the atmosphere. Air temperature in the area of the ADS-B station is determined using barometric and geometric heights transmitted in standard messages ADS-B version 2. Correction of the refractive index in the area of the ground station is performed according to data tropospheric delay obtained using dual-frequency

GNSS receivers. The simulation showed that the employment of the methods for the case under discussion made it possible to reduce the mean RMSE value of the location error in the vertical plane from 334 m to 18.6 m.

Keywords: tropospheric delay, refractive index, UAV, air traffic control, air traffic services, aircraft, civil aviation, intelligent transport systems, transport system of the country

For citation: Kalintsev A. S. The concept of a methodology for accounting for tropospheric delay in wide-band multi-position surveillance systems using ADS-B Wx messages and dual-frequency GNSS receivers, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 62–73. (In Russ.)

Введение

Тропосферной задержкой принято называть задержку в нижней, нейтральной части атмосферы (тропосфера, тропопауза и стратосфера) [1]. Учёт тропосферной задержки в широкозонных многопозиционных системах наблюдения (МПЧН-Ш) позволит снизить ошибки определения местоположения воздушных судов (ВС). Следует отметить, что системы АЗН-В и МПЧН являются основными средствами наблюдения не только пилотируемых, но и беспилотных воздушных судов (БВС). Повышение точности систем наблюдения позволит ускорить интеграцию БВС в единое воздушное пространство.

В системах АЗН-В, согласно требованиям документа EUROCAE¹, информация о воздушной скорости ВС вводится в расширенные самогенерируемые системы, но не передаётся в сообщениях АЗН-В (mode 0, 1, 2), за исключением очень редкого случая, когда данные о скорости относительно земли, такие как вектор скорости GPS, недоступны от бортовой авионики.

Стандарт RTCA DO-260C² предполагает передачу данных о температуре и воздушной скорости в сообщении АЗН-В верс. 3. В состав такого сообщения (ADS-B Wx) включают данные скорости и направления ветра, температуры и воздушной скорости ВС. Следует отметить, что эти данные не являются обязательными. При этом оснащённость ВС оборудованием, соответствующим стандарту верс. 3, пока встречается редко, но со временем количество ВС с таким оборудованием будет возрастать.

В настоящее время международная организация гражданской авиации (ИКАО) ведёт работы по внедрению двухчастотного мультисистемного режима ГНСС в ГА – DFMC GNSS (Dual Frequency Multi Constellation GNSS)³.

Предлагаемая автором концепция методики учитывает перспективы развития инфраструктуры ГА, в том числе и систем наблюдения.

Концепция методики

Дополнительный путь радиоволны, обусловленный тропосферной задержкой, может быть определён по формуле [2]:

$$\Delta L_i = 10^{-6} \int_A^B N(s) ds,$$

где N – показатель преломления (N единиц), s – расстояние вдоль трассы, A и B – начало и конец трассы.

¹ Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B. RTCA, 2009, 1410 p.

² Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260C, RTCA, 2020, 1714 p.

³ ICAO. URL: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/GNSS-milestone-achieved-as-ICAO-Council-adopts-new-dualfrequency-multiconstellation-standards.aspx> (accessed: 28.01.2024).

Изменение коэффициента преломления с высотой может быть аппроксимировано линейной или экспоненциальной зависимостями [3, 4], а также их комбинацией.

Экспоненциальная модель использует допущение, что вертикальный профиль индекса преломления является общим и может быть аппроксимирован одной экспоненциальной зависимостью для всей атмосферы по формуле [3]:

$$N(h) = N_0 e^{(-bh)},$$

где N_0 – значение показателя преломления на уровне моря; b – коэффициент, значение которого характеризуется реальным распределением метеовеличин; h – высота.

Значения N_0 могут быть определены с использованием приземных значений метеовеличин, полученных от метеослужбы. Профиль показателя преломления может быть определён в соответствии с формулой [4, 5]:

$$N(h_i) = \frac{77,6}{T(h_i)} \left(P(h_i) + \frac{4810e(h_i)}{T(h_i)} \right), \quad (1)$$

где P – атмосферное давление (гПа) на высоте h_i ; $T(h_i)$ – температура (К) на высоте h_i ; $e(h_i)$ – парциальное давление водяного пара (гПа) на высоте h_i .

Учитывая (1), можно заключить, что определение показателя преломления N может быть сведено к вычислению параметров атмосферы: атмосферного давления, температуры и парциального давления водяного пара.

Определение коэффициента преломления для наземной станции, расположенной в районе аэродрома (посадочной площадки)

Метеослужба предоставляет для целей управления воздушным движением (УВД) значения давления и температуры воздуха в приземном слое согласно ФАП № 60⁴. Таким образом, средняя температура слоя может быть найдена из прогнозов метеослужбы.

Согласно RTCA DO-260С температура воздуха и значения воздушных скоростей включены в сообщения АЗН-В (ADS-B Wx). При наличии данных от ВС, выполняющих взлёт или посадку в районе наземных станций МПСН, температурный профиль может быть получен из сообщений АЗН-В верс. 3. При отсутствии этих данных значения температуры могут быть получены из сообщений АЗН-В ранних версий (mode 0, 1, 2), полученных от ВС, выполнивших взлёт (посадку).

В рамках методики подтверждения данных высоты АЗН-В [6], для данных ВС, выполнившего взлёт или посадку, предложено для определения профиля температуры использовать значения геометрической и барометрической высоты сообщения АЗН-В. Согласно методике [6] температура воздуха может быть найдена из формулы, приведённой в RTCA DO-260В, связывающей скорость изменения давления с вертикальной скоростью ВС:

$$T_{actual} = T_{sd(hp)} \left(\frac{\frac{\partial h}{\partial t}}{\frac{\partial hp}{\partial t}} \right),$$

где $T_{sd(hp)}$ – статическая температура стандартной атмосферы на барометрической высоте hp ; T_{actual} – фактическая или определённая температура на барометрической высоте hp по

⁴ Федеральные авиационные правила «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов»: утв. Приказом Минтранса России от 3 марта 2014 г. № 60.

данным радиозондовых измерений или радиопередач MET с одного или нескольких самолётов в полёте.

Предложенная в работе [6] обработка данных стандартного сообщения АЗН-В позволит получить температурный профиль в районе аэродрома и зависимость давления от высоты.

Значения температуры и прогнозные значения метеослужбы следует обрабатывать совместно взвешенным методом наименьших квадратов (МНК) с различными весовыми коэффициентами.

Местные регулярные и специальные сводки согласно ФАП № 60 содержат информацию о температуре точки росы, являющейся характеристикой влагосодержания воздуха. Парциальное давление водяного пара на станции, необходимое для расчёта виртуальной температуры, может быть получено по эмпирической формуле Магнуса [7]:

$$e = E_0 10^{\frac{a\tau}{b+\tau}},$$

где $E_0 = 6,1078$ гПа – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха 0°C ; τ – температура точки росы, $^\circ\text{C}$; $a = 7,63^\circ\text{C}$, $b = 241,9^\circ\text{C}$ – коэффициенты для расчёта парциального давления над поверхностью чистой воды; $a = 9,6^\circ\text{C}$, $b = 265,5^\circ\text{C}$ – коэффициенты для расчёта парциального давления над поверхностью чистого льда.

Парциальное давление водяного пара на высоте z может быть найдено с использованием прогнозных значений температуры на высотах 600, 1500, 3000, 4500 м по формуле [8]:

$$e_z = e_0 \cdot 10^{-k(t_0 - t_z)}, \quad (2)$$

где t_z и t_0 , $^\circ\text{C}$ – температура воздуха на высоте z и у земной поверхности соответственно; $k = 0,387$ – эмпирический коэффициент.

Показатель преломления может быть рассчитан с использованием формулы (2), барометрической формулы Лапласа и значений метеопараметров: температуры воздуха на высотах, а также температуры воздуха, давления и парциального давления на уровне метеостанции.

При определении показателя преломления в точке ВС возможны 2 сценария. Первый предполагает, что ВС передает значения температуры и воздушной скорости в сообщении АЗН-В верс. 3. Второй – аппроксимацию показателя преломления, определённого по метеопараметрам с корректировкой по задержке двухчастотного приёмника ГНСС. При этом принимается допущение о слоистости атмосферы.

Показатель преломления в точке ВС (АЗН-В верс. 3). Сообщение ADS-B Wx АЗН-В верс. 3 включает информацию о температуре, направлении и скорости ветра, воздушной скорости – TAS (True Air Speed, истинная воздушная скорость) либо IAS (Indicated Air Speed, приборная скорость).

Для перевода IAS в CAS (Calibrated airspeed, калиброванная воздушная скорость) используют специальные таблицы⁵, которые обычно содержатся в лётном руководстве (ЛР).

Примем, что решаемая задача удовлетворяет условиям: подтверждение данных выполняется для прямолинейного и горизонтального движения ВС, в автоматизированной системе (АС) УВД содержится информация о ВС и его характеристиках, в том числе таблица перевода IAS в CAS, то есть на стороне АС УВД может быть рассчитана скорость CAS.

Скорость CAS также может быть рассчитана по формуле [9]:

$$\text{CAS} = \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{(\gamma-1)\rho_0} \left[\left(\frac{q}{P_0} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}, \quad (3)$$

⁵ True Airspeed from Indicated Airspeed Calculation. Mathworks. URL: [https://uk.mathworks.com/help/aeroblks/true-air-speed-from-indicated-air-speed-calculation.html](https://uk.mathworks.com/help/aeroblks/true-airspeed-from-indicated-air-speed-calculation.html) (accessed: 28.01.2024).

где γ – коэффициент удельных теплоёмкостей воздуха ($\gamma = c_p / c_v$, c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, c_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме); P_0 – атмосферное давление на уровне моря (Па); q – динамическое давление, ρ_0 – плотность воздуха на уровне моря (ISA $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$).

Выразим динамическое давление q из (3), приняв $\gamma = 1/4$, согласно [9]:

$$q = P_0 \left(\left[\frac{1}{5} \left(\frac{\text{CAS}}{a_0} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{7}{2}} - 1 \right),$$

где a_0 – скорость звука (ISA $a_0 = 340,294 \text{ м/с}$).

Эквивалентная воздушная скорость (EAS – Equivalent airspeed) – это калиброванная воздушная скорость, скорректированная с учётом эффектов сжимаемости. EAS может быть найдена по формуле [9]:

$$\text{EAS} = \sqrt{\frac{2\gamma P}{(\gamma-1)\rho_0} \left[\left(\frac{q}{P} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]},$$

где P – атмосферное давление в точке полёта ВС.

Истинная воздушная скорость (TAS) – это скорость движения ВС относительно воздушной массы [9]. TAS передаётся в сообщении АЗН-В верс. 3, либо может быть определена с использованием значений IAS и температуры.

Плотность воздуха ρ в точке ВС (Actual air Density) можно выразить как

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{\text{EAS}}{\text{TAS}} \right)^2.$$

Уравнение состояния влажного воздуха как идеального газа определяется формулой [10]:

$$\rho = \frac{P}{RT_v}, \quad (4)$$

где R – газовая постоянная ($287,053 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$), T_v – виртуальная температура.

Из (4) следует, что:

$$T_v = \frac{P}{\rho R}.$$

Виртуальная температура может быть также определена по формуле [10]:

$$T_v = T \left(1 + 0,378 \frac{e}{P} \right), \quad (5)$$

где T – температура в точке нахождения ВС (К); e – парциальное давление водяного пара в этой же точке (Па).

Парциальное давление в точке ВС рассчитывается по формуле (5):

$$e = \frac{T_v - T}{0,378} \frac{P}{T}.$$

Коэффициент преломления по данным ГНСС

В настоящее время в оборудовании ГА применяются в основном одночастотные приёмники сигналов ГНСС. Как сказано выше (см. Введение), ИКАО ведёт работы по стандартизации двухчастотного мультисистемного режима DFMC GNSS, который получит широкое распространение в будущем.

Значения полной тропосферной задержки, а также суммарного влагосодержания нижней атмосферы могут быть получены посредством зондирования атмосферы сигналами ГНСС [11], либо с использованием программного обеспечения. Расчёт тропосферной задержки представлен в работе [11].

Тропосферная задержка τ_T может быть рассчитана по формуле [5]:

$$\tau_T = \frac{N_0 \cdot 10^{-6}}{b} [1 - \exp(-bh)], \quad (6)$$

где b – параметр модели.

В работе [5] указано, что 95 % задержки вносит атмосфера высотой 50 км. Имея реальные значения N_0 , полной зенитной тропосферной задержки, вычисленной посредством зондирования атмосферы GPS, и приняв высоту верхнего слоя атмосферы равной 50 км, можно получить параметр b , решив экспоненциальное уравнение (6). Вычислив действующее значение времени зенитной задержки для каждой наземной станции (НС) МПСН-Ш, можно выполнить аппроксимацию полученных данных коэффициента преломления с использованием нелинейной регрессии для экспоненциальной модели [12].

Выбор высоты начальной точки при определении координат выполняется с использованием методики определения высоты полёта ВС, учитывающей реальную атмосферу, и с использованием алгоритма, приведённого в работе [6]. Высота полёта ВС с учётом реальной атмосферы рассчитывается с использованием полной барометрической формулы Лапласа, при этом для соответствующей площади используется давление QNH (QFF) и полученное от ВС реальное давление в точке полёта. Алгоритм вычисления реального давления представлен в работе [13].

Рассчитанная по реальной атмосфере высота полёта ВС является высотой начальной точки определения координат. По вычисленным данным температуры и давления в районе НС выполняется расчёт коэффициента преломления для требуемых высот. Полученные значения аппроксимируются заданной заранее моделью показателя преломления с использованием МНК [5].

Найдя функцию от высоты для экспоненциальной модели по локальным параметрам атмосферы применительно к каждой НС, получим профиль показателя преломления.

Пройденный лучом радиосигнала путь может быть найден с помощью метода трассировки лучей по формуле⁶ [14, 15]:

$$R_S = \int_0^{h_T - h_a} n(h) dh \left(1 - \left(\frac{n_0 \cos \theta_0}{n(h) \left(1 + \frac{h}{R_0 + h_a} \right)} \right)^2 \right)^{-1/2}, \quad (7)$$

где R_S – полный пройденный путь луча, м; θ_0 – угол истинной рефракции, градусов; h_a – высота антенны, м; R_0 – радиус Земли, м; $n(h)$ – индекс рефракции на высоте h , $n(h) = 1 + N(h) \cdot 10^{-6}$; n_0 – индекс рефракции на высоте $h = 0$; h – высота цели над земной поверхностью, м.

Тогда увеличение длины пути волны ΔL_i может быть определено как разность геометрического расстояния $R_{\text{геом}}$ до цели и полного пройденного пути луча с использованием формулы:

$$\Delta L_i = R_i - R_{\text{геом}_i},$$

где i – номер приёмной НС МПСН-Ш.

Градиент увеличения длины пути по трассе:

$$E_i = \Delta L_i / R_{\text{геом}_i}. \quad (8)$$

⁶ Convert slant range to propagated range. Mathworks. URL: <https://uk.mathworks.com/help/radar/ref/slant2range.html> (accessed: 28.01.2024).

С учётом увеличения длины пути луча по трассе, расчётное расстояние между i -й НС МПЧН-Ш и ВС с координатами (x, y, z) может быть представлено в виде:

$$\Delta L_i + \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + \beta = \hat{R}_i,$$

где $\hat{R}_i$ – измеренная псевдодальность; x_i, y_i, z_i – координаты НС МПЧН-Ш, β – ошибка, вызванная неизвестной разностью хода часов источника сигнала и системы МПЧН-Ш.

Воспользуемся представленным в работах [16, 17] приёмом и, с учётом формулы (8), вынесем $R_{\text{геом}}$ за скобки, тогда:

$$(1 + E_i) \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + \beta = \hat{R}_i.$$

В контексте решаемой задачи примем $\beta = 0$; зависящий от высоты источника сигнала h и удаления ВС градиент увеличения длины пути по трассе $E_i \ll 1$. Введём обозначение $K_i = 1 + E_i$ и разницу во времени приёма (TDOA) между i -й НС и опорной ($i=1$) НС МПЧН-Ш запишем в виде функции [18]:

$$f_j(x, y, z) = K_i \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - K_1 \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = \hat{m}_j \quad (j=1, 2, \dots, J-1), \quad (9)$$

где $\hat{m}_j = c(\hat{t}_i - \hat{t}_1)$, $i = j+1, J$ – количество приёмных станций; c – скорость распространения радиоволны, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $\hat{t}_i$ – время приёма сигнала приёмной НС МПЧН-Ш.

С использованием начальной оценки местоположения в точке с координатами (x_v, y_v, z_v) выражение (9) может быть разложено в ряд Тейлора [18]:

$$f_{j,v} + a_{j,1} \delta_x + a_{j,2} \delta_y + a_{j,3} \delta_z \approx \hat{m}_j,$$

$$\text{где } a_{j,1} = \frac{\partial f_{jv}}{\partial x}, a_{j,2} = \frac{\partial f_{jv}}{\partial y}, a_{j,3} = \frac{\partial f_{jv}}{\partial z}.$$

В матричной форме:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{j,1} & a_{j,2} & a_{j,3} \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} \hat{m}_1 - f_{1v} \\ \hat{m}_2 - f_{2v} \\ \vdots \\ \hat{m}_j - f_{jv} \end{bmatrix},$$

$$A\delta \approx Z.$$

Тогда δ может быть найдено методом минимизации квадратичной ошибки [18]:

$$\delta = [A^T R^{-1} A]^{-1} A^T R^{-1} Z;$$

$$x_v \leftarrow x_v + \delta_x, \quad y_v \leftarrow y_v + \delta_y, \quad z_v \leftarrow z_v + \delta_z.$$

Методика учёта влияния тропосферной задержки

По полученным данным о параметрах полёта АЗН-В выполняется вычисление параметров атмосферы и коэффициента преломления в точке полёта. Атмосфера принимается слоистой. При этом значения показателя преломления в точке полёта ВС соответствуют значениям коэффициента преломления на высоте полёта ВС над НС.

Далее с использованием взвешенного МНК выполняется аппроксимация функции полученных значений коэффициента преломления. При наличии данных от ВС, выполнивших взлёт (посадку), значения температуры и давления вычисляются по полученным данным АЗН-В.

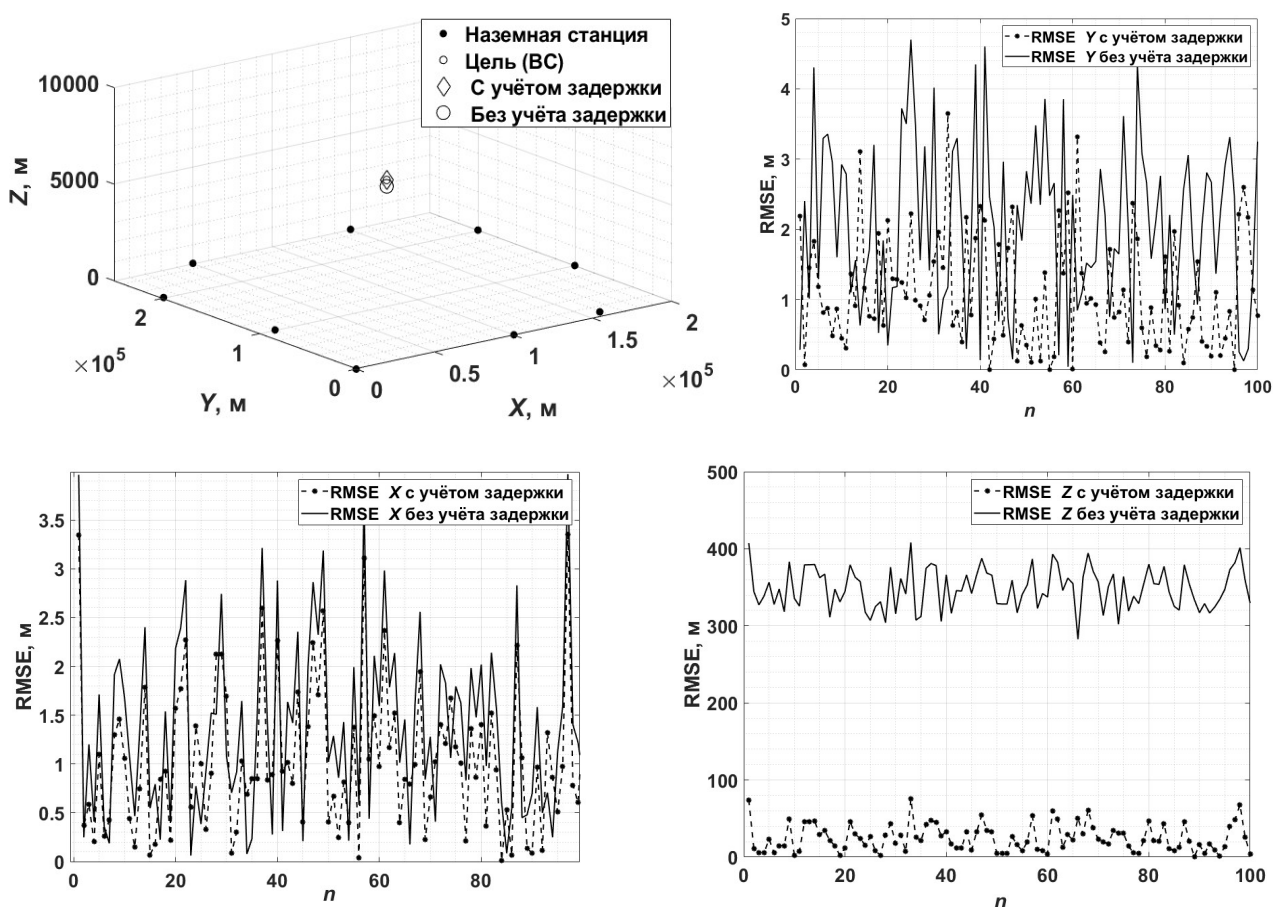
При отсутствии данных АЗН-В в точке НС и на высотах 300, 600, 1500, и 3000 (4500) м значения коэффициента преломления вычисляются с использованием прогнозных значений (прогноз по площадям). Они могут быть скорректированы с использованием значений зондирования.

При выполнении линеаризации уравнений TDOA разложением уравнений в ряд Тейлора выбирается начальная точка – предположительные координаты целевого ВС и выполняется вычисление увеличения длины пути волны с использованием формулы (7) трассировки лучей. Для полученных значений находим величину коэффициента E_i по формуле (8). Подставляем значение $K_i = 1 + E_i$ в уравнения TDOA и находим решение МНК.

Результаты

В программном обеспечении MATLAB автором выполнено компьютерное моделирование предложенной концепции методики. Ошибка определения параметров атмосферы была принята нормально распределённой случайной величиной, начальная ошибка (предположение о цели) равна 300 м.

На рисунке приведены графики, полученные в результате компьютерного моделирования для высоты 8000 м. На графиках X , Y , Z – прямоугольная система координат в пространстве (Z – высота ВС, $Z = 8000$ м), n – номер итерации.



Компьютерное моделирование для высоты ВС 8000 м

В результате моделирования установлено, что при увеличении высоты полёта ошибка определения местоположения в вертикальной плоскости уменьшается. Учёт тропосферной задержки позволяет снизить ошибку определения местоположения в вертикальной плоскости. Моделирование показало, что RMSE для высоты 8000 м составило 18,6 м при использовании предлагаемой концепции методики и 334 м без её использования, при этом СКО RMSE ошибки определения местоположения в вертикальной плоскости составили 16,2 и 22,2 м соответственно.

Дискуссия

Выполненное с целью анализа влияния ошибок моделирование показало, что для рассматриваемого случая основной вклад в ошибку определения местоположения вносит погрешность определения показателя преломления.

Учитывая сложность компьютерного моделирования тропосферной задержки, в дальнейшем необходимо выполнить оценку предлагаемой концепции методики с использованием реальных данных. В дальнейшем планируется модификация концепции предлагаемой методики, направленная на применение других моделей аппроксимации показателя преломления.

При проведении исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, вопросы обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения автором не рассматривались. До практического применения полученных результатов потребуются провести метрологическую экспертизу методики после её окончательной разработки с учётом принципов и критериев, изложенных в [19], а также её метрологическую аттестацию для оценки числовых значений ошибок с использованием алгоритмов, представленных в [20], в том числе для исключения возникновения метрологических рисков негативных ситуаций.

Заключение

В работе предложена концепция методики учёта тропосферной задержки с использованием информации, предоставляемой линией передачи данных АЗН-В верс. 3. Корректировка аппроксимации профиля показателя преломления осуществляется с использованием двухчастотных приёмников ГНСС. Таким образом, предложенная концепция методики ориентирована на перспективные технологии ГА.

Использование двухчастотных приёмников ГНСС на станциях АЗН-В (системы МПСН-Ш), а также АЗН-В верс. 3 позволит повысить точность определения местоположения МПСН-Ш, увеличить количество данных метеоинформации не только на земле, но и в воздушном пространстве.

Компьютерное моделирование показало, что тропосферная задержка вносит основную погрешность в определение высоты полёта ВС. При моделировании анализ влияния ошибок показал, что смещение местоположения зависит от точности определения показателя преломления, следовательно, и метеопараметров, а учёт тропосферной задержки уменьшает ошибку определения местоположения.

Следует отметить необходимость проведения апробации предлагаемой концепции методики с использованием реальных данных.

Предлагаемая концепция методики учитывает дальнейшее развитие технологий ГА и может быть применима для учёта тропосферной задержки при использовании АЗН-В версии 3 и двухчастотных приёмников ГНСС. Повышение точности систем наблюдения позволит ускорить процесс внедрения БВС в общее воздушное пространство.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

Список источников

1. Кашкин В. Б., Владимиров В. М., Клыков А. О. Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС/GPS по спутниковым данным ATOVS // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 615–621.
2. Askne J., Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio science*, 1987, vol. 22, no. 03, pp. 379–386.
3. Кузнецов А. Д. и др. Аппроксимация вертикальных профилей индекса коэффициента преломления // Всероссийские открытые Арmandовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2022. №. 1. С. 468–478.
4. Колосов М. А., Шабельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. Москва: Советское радио, 1976. 220 с.
5. Захаров Ф. Н., Госенченко С. Г., Крутиков М. В. Оценка величины зенитной задержки радионавигационных сигналов в Юго-Восточной части Охотского моря по данным метеоизмерений вблизи навигационного приёмника // Доклады ТУСУР. 2015. № 1(35). С. 9–17.
6. Калинин А. С. Модифицированная методика подтверждения данных АЗН-В с коррекцией температуры при оценке высоты полёта (часть 1) // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 4. С. 28–49. https://doi.org/110.51955/2312-1327_2023_4_28
7. Свиязов Е. М., Глотова А. С. Прогноз и восстановление давления, приведённого к уровню моря по стандартной атмосфере, с использованием гидродинамических моделей и фактических данных приземных метеорологических наблюдений // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2018. Т. 28. № 4. С. 441–446.
8. Бройдо А. Г., Зверева С. В., Курбатова А. В., Ушакова Т. В. Задачник по общей метеорологии / под ред. В. Г. Морачевского. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 312 с.
9. Lowry J. T. *Performance of Light Aircraft (AIAA Education Series)*. Washington, DC, 1999, 475 p.
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. Москва: МГУ, 1986. 328 с.
11. Куницын В. Е., Нестеров И. А., Терешин Н. А. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приёмников GPS. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 6. С. 1–12.
12. Дембелов М. Г., Башкуев Ю. Б., Мельчинов В. П. Тропосферная рефракция радиоволн на разных широтах Сибири // Распространение радиоволн. 2019. С. 246–249.
13. Плясовских А. П., Рубцов Е. А., Калинин А. С., Давиденко В. Ю. Подтверждение достоверности сообщений АЗН-В путём оценки высоты полёта воздушного судна // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 1. С. 118–133. https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_1_118
14. Barton David K. Radar Equations for Modern Radar. Norwood, MA, Artech House, 2013.
15. Blake Lamont V. Ray Height Computation for a Continuous Nonlinear Atmospheric Refractive-Index Profile. *Radio Science*, 1968, vol. 3, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1002/rds19683185>
16. Монаков А. А., Миролюбов А. М. Компенсация ошибок оценивания местоположения, вызванных тропосферным распространением радиоволн, в широкозонных мультilaterационных системах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. № 6. С. 59–69. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-59-69>
17. De Miguel Vela G., Portas J. B., Herrero J. G. Correction of propagation errors in Wide Area Multilateration systems. 2009 *European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, 2009, pp. 81–84.
18. George Sherly, Dhanya Nandan and P. Muralikrishna. Improving accuracy of source localization algorithms using Kalman filter estimator. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1921, 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012022>
19. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Об опыте проведения метрологической экспертизы технической документации на авиационную технику: критерии, методология, результаты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14(325). С. 40–55.

20. Богоявленский А. А. Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31–41

References

1. Kashkin V. B., Vladimirov V. M., Klykov A. O. GLONASS/GPS zenith tropospheric delay based on satellite data ATOVS. *Optika atmosfery i okeana*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 615–621. (In Russ.)
2. Askne J., Nordius H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio science*, 1987, vol. 22, no. 03, pp. 379–386.
3. Kuznetsov A. D. et al. Approximatsiya vertikal'nykh profilej indeksa koehffitsenta prelomleniya [Approximation of vertical profiles of the refractive index]. *Vserossijskie otkrytye Armandovskie chtenija: Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln*, 2022, no. 1, pp. 468–478. (In Russ.)
4. Kolosov M. A., Shabel'nikov A. V. *Refraktsiya ehlektromagnitnykh voln v atmosferakh Zemli, Venery i Marsa [Refraction of electromagnetic waves in the atmospheres of Earth, Venus and Mars]*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976, 220 p. (In Russ.)
5. Zakharov F. N., Gosenchenko S. G., Krutikov M. V. Estimation of zenith tropospheric delay time of navigation signals according to meteorological measurements near the navigation receiver at the South-Eastern area of Okhotsk sea. *Proceedings of TUSUR University*, 2015, no. 1(35), pp. 9–17. (In Russ.)
6. Kalintsev A. S. Modified methodology for confirming ADS-B data with correction of temperature values when estimating the flight altitude. *Crede Experto: transport, society, education, language*, 2023, no. 4, pp. 28–49. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_4_28
7. Sviyazov E. M., Glotova A. S. The forecast and recovery of sea-level standard pressure, using hydrodynamic models and actual data of surface meteorological observations. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 441–446. (In Russ.)
8. Brojdo A. G., Zvereva S. V., Kurbatova A. V., Ushakova T. V. *Zadachnik po obshchej meteorologii [Book of problems on general meteorology]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984, 312 p. (In Russ.)
9. Lowry J. T. *Performance of Light Aircraft (AIAA Education Series)*. Washington, DC, 1999, 475 p.
10. Khrgian A. Kh. *Fizika atmosfery [Atmospheric physics]*. Moscow, MGU Publ., 1986, 328 p. (In Russ.)
11. Kunitsyn V. E., Nesterov I. A., Tereshin N. A. Analiz vlagosoderzhaniya atmosfery po dannym priyomnikov GPS. *Journal of radio electronics*, 2015, no 6, pp. 1–12. (In Russ.)
12. Dembelov M. G., Bashkuev Yu. B., Mel'chinov V. P. Troposfernaya refraktsiya radiovoln na raznykh shirotakh Sibiri. *Rasprostranenie radiovoln*, 2019, pp. 246–249. (In Russ.)
13. Plyasovskikh A. P., Rubtsov E. A., Kalintsev A. S., Davidenko V. Yu.). Confirmation of ADS-B Messages by aircraft flight altitude. *Crede Experto: transport, society, education, language*, 2023, no. 1, pp. 118–133. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_1_118
14. Barton David K. *Radar Equations for Modern Radar*. Norwood, MA, Artech House, 2013.
15. Blake Lamont V. Ray Height Computation for a Continuous Nonlinear Atmospheric Refractive-Index Profile. *Radio Science*, 1968, vol. 3, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1002/rds19683185>
16. Monakov A. A., Mirolubov A. M. Compensation of positioning errors caused by tropospheric wave propagation in wide-area multilateration systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 59–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-59-69>
17. De Miguel Vela G., Portas J. B., Herrero J. G. Correction of propagation errors in Wide Area Multilateration systems. *2009 European Radar Conference (EuRAD)*, IEEE, 2009. pp. 81–84.
18. George Sherly, Dhanya Nandan and P. Muralikrishna. Improving accuracy of source localization algorithms using Kalman filter estimator. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1921, 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012022>

19. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. About experience of conducting metrological examination of technical documentation for aircraft: criteria, methodology and results. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 14(325), pp. 40–55. (In Russ.)

20. Bogoyavlenskiy A. A. Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated systems for diagnostics airborne equipment of aircraft. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 37, pp. 31–41. (In Russ.)

Информация об авторе

Калинцев Андрей Сергеевич, заместитель начальника отдела – начальник сектора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kas4job@gmail.com

Author information

Kalintsev Andrey S., Deputy Head of Department, Head of Sector, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kas4job@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 20.06.2024; принята к публикации 28.06.2024.
The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 20.06.2024; accepted for publication 28.06.2024.

Научная статья
УДК 656.7.025:061.5

АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРАКТИК НИЗКОБЮДЖЕТНЫХ АВИАКОМПАНИЙ В ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНОМ СЕГМЕНТЕ ПЕРЕВОЗОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

В. П. ГОРБУНОВ, И. П. ЧАЛИК

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена возможность повышения транспортной доступности отдалённых регионов страны путём адаптации технологий и практик низкобюджетных авиакомпаний на дальнемагистральных маршрутах, исторически относящихся к компетенции традиционных авиакомпаний. Указана необходимость анализа источников конкурентного преимущества с учётом факторов системы предпочтений групп пассажиров и адаптации низкобюджетных подходов организации сервиса к длительным авиаперелётам. Приведены примеры отечественных практик и лучших мировых технологий работы низкобюджетных компаний. Рассмотрена применимость существующих практик адаптации низкобюджетных компаний для дальнемагистральных маршрутов страны. Показаны методы дополнительной экономии и оптимизации бизнес-процессов. Указаны преимущества динамического ценообразования, необходимость управления фактором загрузки, важность выбора наиболее востребованных рынков и пар городов, соблюдения пунктуальности выполнения расписания, работы с аэропортами по сокращению времени оборота воздушных судов (ВС) и издержек по наземному обслуживанию. Определена оптимальная линейка отечественных ВС для реализации такой адаптации. Показано, что ввод в эксплуатацию новых отечественных типов ВС даст значительную экономию в стоимости владения, поддержании лётной годности (ПЛГ) и потреблении топлива. После определения наиболее адаптивных к низкобюджетной дальнемагистральной бизнес-модели авиаперевозчиков и ускорения производства необходимой линейки отечественных ВС можно начать трансформацию низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральный сегмент.

Ключевые слова: дальнемагистральные перевозки, воздушное судно, самолёт, бизнес-моделирование, низкобюджетные авиакомпании, системно-интегральная методология, транспортная доступность, транспортные системы страны

Для цитирования: Горбунов В. П., Чалик И. П. Адаптация технологий и практик низкобюджетных авиакомпаний в дальнемагистральном сегменте перевозок для повышения транспортной доступности Дальнего Востока // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 74–85.

ADAPTATION OF TECHNOLOGIES AND PRACTICES OF LOW-COST AIRLINES IN THE LONG-HAUL SEGMENT TRANSPORTATION IN ORDER TO IMPROVE TRANSPORT EFFICIENCY ACCESSIBILITY OF THE FAR EAST

V. P. GORBUNOV, I. P. CHALIK

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The possibility of increasing the transport accessibility of remote regions of the country by adapting the technologies and practices of low-cost airlines on long-haul routes that historically belong to the competence of traditional airlines is considered. The necessity of analyzing the sources of competitive advantage is indicated, taking into account the factors of the preference system of passenger groups and the adaptation of low-budget approaches to the organization of service to long-term air travel. Examples of domestic practices and the world's best technologies for low-cost companies are given. The applicability of existing practices of adaptation of low-cost companies for long-haul routes of the country is considered. The methods of additional savings and optimization of business processes are shown. The advantages of dynamic pricing, the need to manage the loading factor, the importance of choosing the most in-demand markets and pairs of cities, observing punctuality in schedule execution, working with airports to reduce aircraft turnover time and ground handling costs are indicated. The optimal range of domestic aircraft for the implementation of such adaptation has been determined. It is shown that the commissioning of new domestic aircraft types will result in significant cost savings on cost of ownership, maintenance of airworthiness and fuel consumption. After determining the most adaptive to the low-budget long-haul business model of air carriers and accelerating the production of the necessary line of domestic aircraft, it is possible to begin the transformation of the low-budget business model into the long-haul segment.

Keywords: long-haul transportation, aircraft, business modeling, low-cost airlines, system-integral methodology, transport accessibility, transport systems of the country

For citation: Gorbunov V. P., Chalik I. P. Adaptation of technologies and practices of low-cost airlines in the long-haul segment transportation in order to improve transport efficiency accessibility of the Far East, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 74–85. (In Russ.)

Введение

С позиций системно-интегральной методологии низкобюджетные авиакомпании рассматриваются как системы, которые обеспечивают свою устойчивость на конкурентном рынке за счёт динамичного ценообразования и ценового разрыва в сравнении с традиционными авиакомпаниями, что становится возможным благодаря низкой себестоимости перевозки, достигаемой путём сокращения операционных, финансовых и организационных издержек [1, 2].

К усложнённым бизнес-моделям авиакомпаний отнесены: экономико-географическая, гибридная, перевозчик в перевозчике, прогнозные модели и модели развития [3].

В структуре мировых авиаперевозок доля бюджетных перевозчиков составляет $\approx 40\%$, что говорит о популярности низкобюджетной бизнес-модели среди пассажиров и может быть основанием для успешного развития низкобюджетной бизнес-модели и на дальнемагистральных маршрутах.

В статье рассмотрены способы и методы адаптации низкобюджетных компаний и наработанных ими технологий к дальнемагистральным маршрутам, которые исторически относятся к компетенции традиционных авиакомпаний [4, 5].

Активная экспансия низкобюджетных перевозчиков в дальнемагистральных авиаперелётах продиктована необходимостью привлечения достаточного количества пассажиров за счёт таких факторов, как гибкое низкотарифное ценообразование, разветвлённость сети, партнёрство, узнаваемость бренда и совершенствование операционной и финансовой основы по сокращению затрат и тем самым снижению основного показателя себестоимости – стоимости пассажиро-кресла на километр пути (CASK – Cost Available Seat Kilometer).

Низкобюджетные перевозчики, основываясь на анализе пассажирских предпочтений, имеют преимущество перед традиционными компаниями, что подтверждается результатами сравнения спроса и тарифов на дальнемагистральных маршрутах низкобюджетных и традиционных компаний [5].

Общемировые практики низкобюджетных авиакомпаний

Вопросам эффективности низкобюджетных авиакомпаний посвящён цикл работ одного из авторов настоящей статьи, в которых рассмотрены такие вопросы, как принципы и методология бизнес-моделирования [2], системно-интегральная методология при исследовании принципов бизнес-моделирования низкобюджетных авиакомпаний [1] и факторы и параметры структурной организации базовой (архетипической) модели низкобюджетных авиакомпаний [3].

Общепризнанные мировые лидеры в низкобюджетном сегменте авиакомпании базовой (архетипической) модели – Ryanair, Southwest Airlines, Wizz Air, Easy Jet – представляют собой наиболее развитый сегмент низкобюджетных перевозчиков и имеют совокупный флот в несколько тысяч самолётов Boeing 737 и Airbus A320 и продолжают его наращивать согласно стратегии корпоративных бизнес-планов, реализуя агрессивную экспансию на новые рынки стран и континентов, тем самым создавая жёсткую конкуренцию классическим полносервисным и премиальным авиакомпаниям [3].

В структуре транспортной системы страны доля низкобюджетных авиаперевозок составляет $\approx 10\%$, так как данный сегмент представлен только одним классическим лоукостером – авиакомпанией «Победа». Тогда как ситуация, сложившаяся в течение нескольких лет, прошедших в условиях коронавирусной инфекции и начавшейся санкционной политики западных поставщиков авиатехники, заставила многих сетевых авиаперевозчиков так или иначе активнее работать над снижением своих издержек и всё больше применять технологии и практики, присущие низкобюджетной бизнес-модели. Среди них: отмена бесплатного бортового питания, невозвратные билеты, переоборудование салонов в полный экономический класс с меньшим шагом кресел и большей плотностью, платный выбор места, продажа питания и услуг на борту.

Предпосылки и перспективы дальнемагистральных низкобюджетных авиаперевозок в современной транспортной системе страны

Предпосылками внедрения низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральном сегменте являются состояние авиатранспортной инфраструктуры, соотношение общего спроса на доступные авиаперелёты внутри страны и предложения со стороны авиакомпаний. Заккрытие многих зарубежных туристических направлений послужило росту спроса на путешествия внутри страны и стало стимулировать внутренний туризм. И если в европейской части популярными становятся путешествия на автомобиле и по железной дороге с достаточным комфортом и приемлемым временем в пути, то посещение Дальнего Востока и, наоборот, дальневосточниками курортов Черноморья, Балтики и Кавказа требует достаточного и доступного предложения по авиаперелётам. В то же время Минтранс России уже много лет поддерживается программа субсидируемых авиабилетов на прямые рейсы между Москвой и городами Дальнего Востока, что безусловно является социально ориентированной мерой для определённых возрастных категорий (социальные билеты – для молодёжи и пенсионеров) и «зарегистрированных» в регионе дальневосточников, но не решает проблему авиатранспортной доступности дальневосточного региона в целом [6].

Практика и опыт зарубежных авиакомпаний в адаптации классической низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральный сегмент

Идея недорогих авиаперелётов на дальнемагистральных маршрутах уходит своей историей в 1970-е годы. Тогда американские авиакомпании People Express Airlines и Skytrain впервые внедрили практику недорогих авиаперелётов через Атлантику. Но ценовые войны с полносервисными авиакомпаниями и проблемы в мировой экономике плюс валютные колебания положили

конец этим экспериментам. Сегодняшнее постпандемийное состояние мировой экономики всё ещё во многом характеризуется как кризисное, обусловленное падением доходов населения по обе стороны Атлантики. В то же время более широкое предложение относительно недорогих, но экономичных современных дальнемагистральных ВС, таких как Airbus A330, A330NEO и Boeing 787 создало наиболее благоприятные условия скачка развития низкобюджетных авиаперелётов именно в дальнемагистральном сегменте.

По оценкам большинства отраслевых экспертов, в последние несколько лет в США и Европе этот инновационный вид авиаперевозки достаточно стремительно отвоёвывает рыночную нишу бюджетных дальнемагистральных путешествий. Предлагая широкий набор сервисных, но уже платных услуг, практически аналогично экономическому классу традиционных авиаперевозчиков, низкобюджетное предложение стирает грань между ними. Имея ценовую привлекательность по стоимости самого авиабилета, авиакомпании низкобюджетного сегмента получают неоспоримое конкурентное преимущество перед традиционными авиакомпаниями.

Благодаря всё более активной работе лоукост-модели в дальнемагистральном сегменте, в США в 2020 году расценки на авиаперелёты упали до минимальных уровней: трансконтинентальный рейс в Европу обходился всего в \$200, а, например, в Чили и обратно (путь порядка 12–16 тыс. км) всего в \$62. Такие тарифы держались вплоть до начала 2022 года. Но сейчас картина полностью перевернулась. Во-первых, авиатопливо подорожало за год на 150 %. Во-вторых, количество мест в американской гражданской авиации всё ещё на 6 % уступает допандемийным показателям, тогда как все предыдущие годы до 2019-го оно стабильно росло в соответствии со спросом [7].

В [8] показано, что наиболее активно низкобюджетные дальнемагистральные авиаперевозки развиваются в Юго-Восточной Азии и на Ближнем Востоке, где наиболее успешной является практика низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральном сегменте малайзийским лоукостером Air Asia X. Но запуск новых инновационных видов деятельности всегда сопряжён с коммерческими рисками. Не все вновь открытые направления стали успешными. Ранее эта авиакомпания уже выполняла регулярные рейсы в Лондон и Париж, но в 2012 году они были прекращены из-за экономической неэффективности. Позже решающим фактором возвращения на эти и другие маршруты на европейском рынке, открытия новых дальнемагистральных рейсов в Европу стало перевооружение флота на широкофюзеляжные самолёты со значительно меньшим расходом топлива, такие как Airbus A330 и Boeing 787 [7].

Европейский рынок также продвигался в общемировом тренде, и низкотарифные дальнемагистральные перевозчики стали появляться и в Европе. Так, например, французский French Blue в 2016 году совершил первый полёт в Доминиканскую Республику, используя широкофюзеляжный Airbus A330. Лоукостер Level (входит в европейскую авиационную группу International Airlines Group's (IAG)) приступил к полётам на американском направлении в 2017 году, также используя Airbus A330 [9]. После неоднократных заявлений о своей готовности войти в дальнемагистральный сегмент ирландский лоукостер Ryanair реализовал свои намерения через партнерское сотрудничество. Первым перевозчиком, с которым Ryanair наладил такое партнёрство, стала испанская авиакомпания Air Europa. Также Ryanair не раз анонсировал совместный проект с Norwegian, первым начавшим летать на двухпалубном Airbus A380. Примечательно, что Norwegian использовал Airbus A380 в нетипичной для лоукостера многоклассной компоновке. Самолёт рассчитан на перевозку 471 пасс., включая 12 кресел в первом, 60 – в бизнес- и 399 – в эконом-классах. Лоукостер использовал его в качестве замены самолётам Boeing 787, на которых он традиционно выполняет рейсы по наиболее загруженному маршруту в мире: Лондон – Нью-Йорк [10].

В то же время лидер европейского рынка Lufthansa объявила еще в 2015 году планы запуска дальнемагистрального лоукостера на базе низкотарифного подразделения Eurowings [11], в состав которого должны были войти все лоукостеры группы Lufthansa. Утверждалось, что

эксплуатационные затраты на выполнение дальнемагистральных рейсов авиакомпанией Eurowings должны быть на 40 % ниже, чем у материнской Lufthansa. По мнению головной компании, проект начнёт окупать себя через год-два после запуска [11, 12].

Благодаря экспансии низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральном сегменте, европейские авиакомпании пока ещё предлагают своим клиентам феноменальные скидки (до €1 за билет), но и в ЕС цены на билеты начинают стремительно повышаться и в первую очередь из-за роста цен на авиационное топливо.

Применительно к транспортным системам страны и по аналогии с практикой группы Lufthansa, аналогичный подход с «назначением» в низкобюджетный дальнемагистральный сегмент одной из компаний группы мог бы быть взят на вооружение, например, группой Аэрофлот, где уже есть классический ближнемагистральный лоукостер «Победа». Кроме того, в группе также есть потенциально подходящий и обладающий соответствующим ёмкостным широкофюзеляжным флотом (Boeing B747-400, B777-300) авиаперевозчик – авиакомпания «Россия». Дальнемагистральный флот данной дочерней авиакомпании в большинстве своём состоит из ВС ушедшей в 2015 году и ведущей в то время по дальнемагистральным провозным мощностям авиакомпании «Трансаэро», обладавшей на тот момент наиболее ёмкостным дальнемагистральным флотом и имевшей серьёзное позиционирование на дальневосточных маршрутах. Но несмотря на преемственность в обладании существенного количества широкофюзеляжных ВС, у авиакомпании отсутствует сама бизнес-модель, хотя перспективы внедрения в группе низкобюджетной модели на дальнемагистральных маршрутах, прежде всего на Дальний Восток и в Восточную Сибирь, вполне реальны, но требуют серьёзных проработок в части: разработки финансовой бизнес-модели; анализа объективно существующего так называемого «спящего спроса»; определения источников конкурентного преимущества с учётом факторов системы предпочтений групп пассажиров; практических решений по технической адаптации наиболее подходящих типов ВС, реконфигурации салонов и других технологических решений; трансформации сервисных технологий в специфику бизнес-модели низкобюджетных компаний и адаптации к особенностям дальнемагистральных авиаперелётов.

Фактор системы предпочтений групп пассажиров в специфике дальнемагистральных авиаперелётов

Межконтинентальные рейсы – один из секторов дальнемагистрального рынка перевозок, для которого фактор системы предпочтений групп пассажиров столь же принципиален, как и низкобюджетность. В [13] отмечено, что привлечение пассажиров бизнес-класса имеет важное значение для низкобюджетных компаний при освоении межконтинентального сектора, так как будет способствовать субсидированию ультранизких тарифов для остальных пассажиров.

В [14] проведено сравнение дальнемагистральной бизнес-модели компании Eurowings с бизнес-моделями компаний Ryanair, AirBerlin и Condor. Отмечено, что дальнемагистральная бизнес-модель Eurowings позиционируется между типичной для низкобюджетных компаний (например, Ryanair), и долгосрочными продуктами, предлагаемыми Condor или AirBerlin.

Авторы [15] поставили целью поиски ответов на такие вопросы как: почему бизнес-модель низкобюджетной компании оказалась настолько успешной на рынке ближнемагистральных перевозок, тогда как на дальнемагистральных секторах это сделать не удаётся; как адаптировать бизнес-модель низкобюджетной компании, чтобы получить устойчивое конкурентное преимущество на дальнемагистральных рынках?

Исходя из приведённых примеров из международной практики, при определении перспектив отечественных низкобюджетных авиакомпаний и их возможностей по трансформации бизнес-модели на специфику дальнемагистрального сегмента необходимо дать оценку факторам, оказывающим непосредственное влияние на успешную реализацию такой трансформации.

Так, в полносервисных авиакомпаниях премиальные пассажиры первого и бизнес-классов имеют высокий уровень требований к условиям полёта, а такая категория пассажиров, как туристы, путешествующие студенты и пассажиры категории VFR (visiting friends and relatives) менее требовательны и потенциально могут воспользоваться услугами низкобюджетных перевозчиков.

Фактор системы предпочтений групп пассажиров имеет значение во взаимоотношениях низкобюджетных и традиционных компаний, причём следует выделить базовые категории во-просов: состав структурных групп пассажиров – первый и бизнес-класс, туристы, VFR; платёжеспособный спрос пассажиров по однородным группам; предпочтения каждой из групп с определением пределов устойчивости и готовности смены предпочтений.

Платёжеспособность пассажиров в той или иной стране изменчива и зависит от ряда фак-торов, например, от состояния экономики страны. В периоды мировых финансовых потрясе-ний – кризиса 2008 года, и в его нынешней фазе – распространения коронавирусной инфекции и санкционных ограничений – происходят переделы рынков авиаперевозок в пользу низкобюд-жетных компаний. Объясняется это уникальностью самой низкобюджетной бизнес-модели, успех которой обеспечен практически в любой фазе состояния экономики, развивающейся волнообразно, имея свои взлёты и падения.

Так, если в стране кризис и падает спрос со стороны населения, и бизнес вместе с эконо-микой страны входит в фазу рецессии, то спрос на бюджетные перевозки только растёт, так как пассажиры начинают экономить, отдавая предпочтения менее комфортным, но привлекательным по стоимости авиаперелётам. Аналогично система экономии и предпочтений по выбору между премиальными авиакомпаниями и лоукостерами работает и в отношении бизнес-перелётов, где для своих сотрудников компаниями выбираются бюджетные авиаперелёты, тем самым обес-печивая значительную экономию и сохранение самого бизнеса. Особенно это актуально для малых предприятий, хотя для крупного бизнеса, межнациональных корпораций, где перемещения сотрудников неизбежны для поддержания связей и продолжения работы бизнес-цепочек, такая экономия в масштабе даёт сбережение ещё более существенных средств.

Примером же из реальной практики экономии на авиаперелётах в крупных международных корпорациях может служить директивный переход по перелётам сотрудников корпорации Airbus от премиальных национальных Air France и Lufthansa на европейские же лоукостеры Ryanair и Easyjet в середине 2000-х годов между предприятиями по всей территории Евросоюза.

Общая характеристика применимости системно-интегральной методологии к особен-ностям транспортной системы страны

Практика классических низкобюджетных авиакомпаний базовой (архетипической) модели как наиболее развитого сегмента мировых низкобюджетных перевозчиков представляет собой интерес с точки зрения анализа позиций системно-интегральной методологии, где низкобюд-жетные авиакомпании рассматриваются как системы, которые обеспечивают свою устойчивость на конкурентном рынке за счёт известных и хорошо себя зарекомендовавших преимуществ бизнес-модели в сравнении с традиционными авиакомпаниями. Применимость этих практик на дальнемагистральных маршрутах может служить залогом для успешного встраивания низкобюд-жетной авиакомпании в транспортную систему на наиболее востребованных дальневосточных направлениях и следовательно – получения устойчивого конкурентного преимущества над тра-диционными авиакомпаниями и максимального удовлетворения спроса на рынках перевозок в крупных города Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Необходимо принять во внимание, что отличительной чертой дальних авиаперелётов в стране являются факторы сезонности и разницы в плотности населения между регионами в центральной и восточной частях страны, выливающиеся в неравномерность спроса.

Будучи во многом российской спецификой, но известными и в мировой практике, данные обстоятельства обуславливают серьезные требования к выстраиванию сбалансированной сети маршрутов и оборота ВС между значительно удалёнными друг от друга парами городов с устойчивыми пассажиропотоками и спросом.

В то же время традиционные компании уже предлагают относительно низкие тарифы на дальнемагистральных рейсах. Так называемая гибридная бизнес-модель состоит в том, что пассажиры бизнес-класса, располагаясь в комфортных условиях и за более значительную плату, фактически субсидируют пассажиров эконом-класса, выполняющих авиаперелёт за небольшую плату и в салоне с уплотнённой рассадкой.

Как указано в [5], концепция низкобюджетных компаний может быть применена для дальнемагистральных перевозок при выполнении ряда условий дополнительной экономии и оптимизации по таким позициям, как производительность – новое ВС с меньшими затратами на ПЛГ, стоимостью владения и меньшим расходом топлива; взаимовыгодная работа с аэропортами по принципу – авиакомпания даёт пассажиропоток, аэропорт даёт скидки на свои сервисы; динамичное управление ценообразованием и фактором загрузки; оперативное взаимодействие с управлением воздушным движением по планированию и согласованию оптимальных маршрутов; выбор наиболее востребованных рынков и пар городов, пунктуальность.

Один из основных ресурсов экономии затрат связан со снижением расхода топлива, что может быть достигнуто за счёт комплекса мер, направленных прежде всего на внедрение в авиакомпанию корпоративной политики жёсткого контроля расхода топлива через следующие мероприятия, такие как: регулярная работа с производителем ВС и двигателей с постоянным мониторингом аэродинамического состояния ВС через управление факторами деградации, общего ухудшения аэродинамики планера и состояния двигателей; применение и внедрение методик использования всех заложенных конструктивных ресурсов самолёта и двигателей для снижения расхода топлива; совершенствование аэродинамической схемы путём установки законцовок крыла; снижение массы пустого снаряжённого самолёта за счёт снятия избыточной экипировки и оборудования, например, системы развлечений пассажиров.

Анализ, прогнозирование структуры парка ВС и сети авиалиний

Дальнемагистральные маршруты предъявляют особые требования к флоту, на основе которого должно быть обеспечено успешное развитие отечественных низкобюджетных компаний в стране с уникальным соотношением ключевых факторов, таких как протяжённость маршрутных сетей, неравномерность размещения населения по территории с одиннадцатью часовыми поясами и особо трудными погодными-климатическими условиями, предъявляющими предельные требования к эксплуатационным качествам ВС. Протяжённость отечественных внутренних авиалиний не имеет аналогов в мире. Самый протяжённый регулярный рейс – Владивосток – Санкт-Петербург, в своё время выполняемый авиакомпанией «Владивосток Авиа» на дальнемагистральном варианте ВС Ту-204-300 (комфортная компоновка 142 кресла, включая 8 кресел бизнес-класса).

Современные международные отношения, беспрецедентные и незаконные санкции в отношении поставки ВС, запасных частей к ним, а также отказ западных производителей от послепродажного конструкторского сопровождения, поставки и обновления эксплуатационной документации безусловно накладывают серьёзные ограничения в успешной адаптации дальнемагистральной низкобюджетной бизнес-модели. В то же время данные обстоятельства создают уникальные условия для беспрепятственного продвижения и адаптации российских типов ВС в бюджетном сегменте авиаперевозок.

Принимая во внимание накопленный уникальный опыт и последние отечественные разработки, а также возможности авиационной промышленности по серийному выпуску необходимого количества ВС, можно выстроить линейный ряд ВС, подходящих по своим характеристикам

для реализации бизнес-модели дальнемагистральных бюджетных перевозок. Исходя из протяжённости внутрироссийских маршрутов большой дальности, можно сформулировать задачу как обеспечение связанности крупнейших центров Дальнего Востока и Восточной Сибири с центральными городами страны, и в первую очередь Москвы, Санкт-Петербурга и Сочи с такими городами, как Якутск, Магадан, Анадырь, Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск, Хабаровск, Владивосток, Благовещенск, Чита, Иркутск и Улан-Удэ.

На сегодняшний день имеется три типа отечественных ВС: Ил-96-400, Ту-214 и МС-21, обладающих необходимыми характеристиками дальности полёта и вместимости, находящихся как в серийном производстве, так и в финальной стадии подготовки к таковому. Прежде всего это широкофюзеляжный Ил-96-400, в основе которого лежит хорошо себя зарекомендовавшая платформа ВС Ил-86 и Ил-96-300 советской разработки с шириной фюзеляжа 6,01 м, что сопоставимо с размерами более современных западных конкурентов Boeing B777 (6,2 м) и Airbus A350 (5,97 м). Возможности широкого фюзеляжа и его увеличенной до 63,9 м длины позволяют, наряду с взлётной массой 270 т и максимальной коммерческой загрузкой в 58 т, при расчётной компоновке в 435 мест иметь резерв перевозки до 500 пасс., разумеется, при соответствующем переоборудовании пассажирского салона и использовании лёгких кресел тонкой конструкции.

При этом четырёхдвигательная платформа Ил-86/96 обеспечивает беспрецедентный уровень безопасности и надёжности; за всю историю эксплуатации данных типов ВС не произошло ни одной катастрофы с гибелью пассажиров. В ближайшей перспективе – замена серийно производимых двигателей ПС-90 на новые ПД-14 и снижение часового расхода топлива с нынешних 7,5 до (5,5–6,5) т/ч, что позволит Ил-96-400 занять достойное место по удельному расходу топлива и стоимости пассажиро-километра в группе наиболее эффективных двухдвигательных Airbus A330NEO, Airbus A350 и Boeing B787, Boeing B777.

Можно заключить, что с эксплуатационно-экономической точки зрения Ил-96-400 – это идеальный и безопасный самолёт для массовых перевозок на загруженных маршрутах в летний период на курорты причерноморского региона и обеспечения связанности центральных регионов страны и Дальнего Востока через реализацию низкобюджетной бизнес-модели на дальнемагистральных авиаперелётах.

Для связи пар городов Восточной Сибири и дальневосточного региона с меньшими пассажиропотоками, такими как Иркутск, Улан-Удэ, Чита, Благовещенск, Якутск, Комсомольск-на-Амуре, Магадан, Анадырь, оптимальным являются ВС с пассажироместимостью 200–215 кресел типов серийно производимого Ту-214 и перспективного МС-21, так как в этом сегменте важна частотность выполнения рейсов по расписанию в сутки. При этом созданная на базе проработанного технологически и ранее выпускавшегося серийно Ту-204 его дальнемагистральная версия Ту-214 является близким аналогом хорошо себя зарекомендовавшего Boeing B757 со схожими характеристиками пассажироместимости, дальности полёта и расхода топлива. Ту-214 способен на многие годы выполнять роль переходного ВС в данном сегменте – до наполнения внутреннего рынка достаточным количеством высокотехнологичных МС-21.

Таким образом, МС-21, имеющий значительный потенциал для дальнейших модификаций в различных вариантах пассажироместимости и дальности полёта моделей МС-21-200/300/400, получает перспективу стать основной платформой в наиболее важном среднемагистральном сегменте. Обладая рядом конкурентных преимуществ, таких как широкий (4,06 м) фюзеляж в классе ВС с одним проходом по сравнению с ближайшими конкурентами Airbus A320 (3,95 м) и Boeing B737 (3,76 м) и удельный расход топлива в диапазоне (2,0–2,3) т/ч на уровне последних разработок Airbus A320NEO и Boeing B737MAX, семейство МС-21 становится универсальной моделью в широком диапазоне масс и компоновок. При установке дополнительных фюзеляжных топливных баков по аналогии с Airbus A321-200LR или установке стационарного топливного бака в центроплане по аналогии с Airbus A321XLR и повышении взлётной массы до (95–100) т, можно добиться дальности полёта, сравнимой с Airbus A321XLR, составляющей (9–10) ч,

или с перспективной разработкой от Boeing – 797 в пустующем сегменте MoM (Middle-of-the-Market) нового среднего самолёта NMA (New Midsize Airplane), но с преимуществом более низкой стоимости благодаря полностью отечественной комплектации и локализованному производству.

Сочетание большего комфорта, даже при низкобюджетной компоновке салона, меньшего (по сравнению с зарубежными аналогами) расхода топлива, дальности полёта позволит эффективно использовать семейство МС-21 в широком диапазоне бизнес-моделей и, в особенности, в низкобюджетном сегменте, в том числе и на дальнемагистральных маршрутах.

Методы повышения эффективности низкобюджетных авиакомпаний в дальнемагистральном сегменте

В статье определено, что в рамках обозначенных подходов по исследованию методов трансформации низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральный сегмент представляет интерес изучение путей развития бизнес-моделей лоукостеров, их взаимодействия друг с другом и с традиционными бизнес-моделями, в основном – по данным зарубежных источников как обладающих наиболее репрезентативным срезом публикаций.

Необходимо отметить, что среди тенденций последнего десятилетия можно выделить обозначившуюся перспективу более глубокой трансформации низкобюджетной модели к выполнению полётов на дальнемагистральных маршрутах и, соответственно, адаптации её к главным аэропортам. Учитывая общемировые масштабы и объёмы авиаперевозок, интерес представляет накопленный обширный опыт деятельности зарубежных авиакомпаний в низкобюджетном сегменте на высококонкурентном рынке перевозок на всех континентах. Вопросам анализа деятельности и перспектив низкобюджетных компаний посвящено значительное число исследований западных авторов, которые изучают как практические стороны, так и аналитические аспекты работы этих авиакомпаний. Указанные вопросы представляют значительный интерес для развития отечественного рынка низкобюджетного сегмента, который пока пребывает в состоянии поиска путей становления и трансформации имеющегося небольшого опыта низкобюджетных авиаперелётов на короткие и средние расстояния, и его экстраполяции на дальнемагистральные авиаперелёты и в первую очередь на Дальний Восток.

Общемировые практики в отношении способов и методов адаптации низкобюджетных компаний к дальнемагистральным маршрутам, которые исторически относятся к компетенции традиционных авиакомпаний, показывают, что у отечественной авиатранспортной системы имеются потенциал и все предпосылки для успешной адаптации технологий и практик низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральном сегменте авиаперевозок.

При оценке деятельности низкобюджетных компаний на общемировом рынке дальнемагистральных перевозок и перспектив применимости к современной отечественной авиатранспортной системе необходимо принять во внимание, что возможности для сокращения затрат в современных условиях существенно ограничены. Важными обстоятельствами являются следующие:

- значительная доля расходов фиксирована и маловариативна (топливо, стоимость владения, ПЛГ и уровень безопасности полётов);
- наличие достаточного количества разработок современных ВС соответствующих классов и компоновок;
- особенности и атрибуты классической низкобюджетной бизнес-модели должны быть чётко выдержаны (высокая плотность кресел, платные бортовое обслуживание и питание, Wi-Fi, системы развлечений);
- сложно обеспечить ещё более эффективную работу экипажа (самостоятельная подготовка салона к рейсу, экипировка и уборка);
- работа авиакомпаний на дальнемагистральных маршрутах предъявляет повышенные требования (трансферы и размещение для экипажа после длительных авиаперелётов, питание, наличие багажа у экипажей).

Описанные выше подходы и методы представляют собой элементы системно-интегральной методологии, использованной авторами при изучении принципов бизнес-моделирования низкобюджетных авиакомпаний.

Дискуссия

Увеличение авиационной подвижности населения и авиатранспортной доступности регионов, обеспечение связанности Дальнего Востока с центральными регионами страны через доступные авиаперелёты является важной государственной задачей. Не менее серьёзными являются задачи определения ключевых авиаперевозчиков, трансформации их бизнес-моделей, не исключая, например, консолидации конкурентов – представителей одной бизнес-модели и оперирующих в одном сегменте авиаперевозок. В этой связи разумно предположить, что, принимая во внимание жёсткое воздействие внешнего фактора в отношении деятельности отечественных эксплуатантов зарубежной авиационной техники, логичным и экономически оправданным было бы объединение усилий нескольких отечественных авиакомпаний, работающих в схожих сегментах и рыночных нишах. Общемировая практика объединений и поглощений могла бы вызвать определённый интерес и в авиатранспортной отрасли с точки зрения изучения её применимости в современных условиях и особенностей текущего состояния. Консолидация компетенций в таких областях, как ПЛГ, в особенности выполнение тяжёлых форм технического обслуживания, выполнение ремонтов силовых установок, восстановительных ремонтов шасси, авионики, обеспечение логистики запасных частей, объективно могла бы дать синергетический эффект в сокращении затрат и исключении дублирования одних и тех же функций, в объединении усилий авиакомпаний в ПЛГ однотипного парка ВС и, главное, обеспечении безопасности полётов. Но данный подход является во многом дискуссионным, требующим большей научной проработки и поиска оптимальных методов практической реализации.

Заключение

Выполненный анализ общемировых тенденций, исследование западных практик [8–16] показывают высокий уровень адаптивности бизнес-модели низкобюджетных дальнемагистральных перевозок. Рассмотрены перспективы реализации низкобюджетной бизнес-модели на дальнемагистральных маршрутах с точки зрения предпочтений пассажиров, методов оптимизации затрат, поиска конкурентных преимуществ и оптимальных технологических решений в современных условиях состояния отечественного промышленного потенциала. Методом оценки сравнительных характеристик определена оптимальная линейка ВС в сравнении с зарубежными аналогами. Показана обоснованность вывода по выбору в пользу отечественных разработок.

Принимая во внимание текущие внешние обстоятельства и состояние отечественной авиатранспортной системы, производственные возможности авиационной промышленности, реализация задачи по обеспечению доступности Дальнего Востока через трансформацию низкобюджетной бизнес-модели в дальнемагистральный сегмент является реальной, но требует выполнения серьёзных мероприятий в части определения наиболее адаптивных к низкобюджетной дальнемагистральной бизнес-модели авиаперевозчиков и ускорения производства необходимой линейки отечественных ВС.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Горбунов В. П. Системно-интегральная методология при исследовании принципов бизнес-моделирования низкобюджетных авиакомпаний // Качество и жизнь. 2018. № 3. С. 45–52.

2. Горбунов В. П. Принципы и методология бизнес-моделирования // *Качество и жизнь*. 2018. № 2. С. 28–35.
3. Горбунов В. П. Факторы и параметры структурной организации базовой (архетипической) модели низкобюджетных авиакомпаний // *Качество и жизнь*. 2018. № 4. С. 16–22.
4. Горбунов В. П. Анализ перспектив развития низкобюджетных авиакомпаний в современных условиях российской авиатранспортной системы // *Качество и жизнь*. 2018. № 1. С. 60–65.
5. Горбунов В. П. Метод повышения авиатранспортной доступности через внедрение инновационной бизнес модели низкобюджетных авиакомпаний // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2018. № 22. С. 143–151.
6. Горбунов В. П. Эволюция представлений о транспортной доступности // *Бюллетень транспортной информации*. 2019. № 290.
7. Цена авиаперелётов экономом за год выросла самым быстрым темпом с 2012-го. По прогнозу экспертов, стоимость билетов в 2022 году может увеличиться на 15–20 процентов. URL: <https://www.rbc.ru/business/03/02/2022/61fa463b9a7947da489da8f8> (дата обращения: 10.05.2022).
8. Low Cost Business Model for Long-Haul Sectors. 27/10/2015 By Marc Israel Comments are Off Benchmark, Research & Studies, available at: <http://www.airlineprofiler.eu/2015/10/low-cost-business-model-for-long-haul-sectors> (accessed: 04.02.2024).
9. Дальнемагистральный дискаунтер Level будет летать из Парижа. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5a2116ba8651652e759981f7/dalnemagistralnyi-diskaunter-level-budet-letat-iz-parija-5a2d2cf8482677487dbeaced> (дата обращения: 05.02.2024).
10. Norwegian первым из лоукостеров начал летать на Airbus A380. URL: <http://www.ato.ru/content/norwegian-pervym-iz-loukosterov-nachal-letat-na-airbus-a380> (дата обращения: 04.02.2024).
11. Руководство Lufthansa Group одобрило создание низкотарифного подразделения. URL: <http://www.ato.ru/content/rukovodstvo-lufthansa-group-odobrilo-sozdanie-nizkotarifnogo-podrazdeleniya> (дата обращения: 03.02.2024).
12. Kloeg Judith, Schaal Hanna. Low-cost, long-haul – Flight of fancy or business of the future? Available at: <http://www.prologis.aero/wp-content/uploads/2014/12/Low-cost-long-haul-Flight-of-fancy-or-business-of-the-future.pdf> (accessed: 03.02.2024).
13. Low-cost aiming for long-haul, available at: <http://dare.uva.nl/cgi/arno/show.cgi?fid=95775> (accessed: 04.02.2024).
14. Stureson V. Can the low cost boom in aviation reach long distance destinations? Available at: <http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:404141> (accessed: 04.02.2024).
15. Hans Verkerk. The feasibility of intercontinental low cost airlines. Bachelor Thesis, Erasmus School of Economics, 2014.
16. L. Chen, H. Pawlikowski. The Expansion of Low Cost Carriers into the Long-Haul Market: A Strategic Analysis of Norwegian Air Shuttle ASA, available at: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2375490/masterthesis.PDF> (accessed: 03.02.2024).

References

1. Gorbunov V. P. Sistemno-integral'naya metodologiya pri issledovanii printsipov biznes-modelirovaniya nizkobyudzhethnykh aviakompanij. *Kachestvo i Zhizn'*, 2018, no. 3, pp. 45–52. (In Russ.)
2. Gorbunov V. P. Printsipy i metodologiya biznes-modelirovaniya, *Kachestvo i Zhizn'*, 2018, no. 2, pp. 28–35. (In Russ.)
3. Gorbunov V. P. Faktory i parametry strukturnoj organizatsii bazovoj (arkhetipicheskoy) modeli nizkobyudzhethnykh aviakompanij. *Kachestvo i Zhizn'*, 2018, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.)
4. Gorbunov V. P. Analiz perspektiv razvitiya nizkobyudzhethnykh aviakompanij v sovremennykh usloviyakh rossijskoj aviatransportnoj sistemy. *Kachestvo i Zhizn'*, 2018, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)
5. Gorbunov V. P. Method of aviation transport accessibility development through the introduction of innovative business models of low-cost airlines. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 22, pp. 143–151. (In Russ.)

6. Gorbunov V. P. Ehvolutsiya predstavlenij o transportnoj dostupnosti. *Byulleten` transportnoj informatsii*, 2019, no. 290. (In Russ.)
7. Tsena aviaperelyotov ehkonomom za god vyrosla samym bystryim tempom s 2012. Po prognozu ehkspertov, stoimost` biletov v 2022 godu mozhет uvelichit` tsya na 15–20 protsentov, available at: <https://www.rbc.ru/business/03/02/2022/61fa463b9a7947da489da8f8> (accessed: 10.05.2024). (In Russ.)
8. Low Cost Business Model for Long-Haul Sectors. 27/10/2015 By Marc Israel Comments are Off Benchmark, Research & Studies, available at: <http://www.airlineprofler.eu/2015/10/low-cost-business-model-for-long-haul-sectors> (accessed: 04.02.2024).
9. Dal`nemagistral`nyj diskaunter Level budet letat` iz Parizha, available at: <https://zen.yandex.ru/media/id/5a2116ba8651652e759981f7/dalnemagistralnyi-diskaunter-level-budet-letat-iz-parija-5a2d2cf8482677487d> beaced (accessed: 05.02.2024). (In Russ.)
10. Pervym iz loukosterov nachal letat` Norwegian na Airbus A380, available at: <http://www.ato.ru/content/norwegian-pervym-iz-loukosterov-nachal-letat-na-airbus-a380> (accessed: 04.02.2024ГТТГ). (In Russ.)
11. Rukovodstvo Lufthansa Group odobrilo sozдание nizkotarifnogo podrazdeleniya, available at: <http://www.ato.ru/content/rukovodstvo-lufthansa-group-odobrilo-sozдание-nizkotarifnogo-podrazdeleniya> (accessed: 03.02.2024). (In Russ.)
12. Kloeg Judith, Schaal Hanna. Low-cost, long-haul – Flight of fancy or business of the future? Available at: <http://www.prologis.aero/wp-content/uploads/2014/12/Low-cost-long-haul-Flight-of-fancy-or-business-of-the-future.pdf> (accessed: 03.02.2024).
13. Low-cost aiming for long-haul, available at: <http://dare.uva.nl/cgi/arno/show.cgi?fid=95775> (accessed: 04.02.2024).
14. Stureson V. Can the low cost boom in aviation reach long distance destinations? Available at: <http://hig.diva-portal.org/smash/get/diva2:404141> (accessed: 04.02.2024).
15. Hans Verkerk. The feasibility of intercontinental low cost airlines. Bachelor Thesis, Erasmus School of Economics, 2014.
16. L. Chen, H. Pawlikowski. The Expansion of Low Cost Carriers into the Long-Haul Market: A Strategic Analysis of Norwegian Air Shuttle ASA, available at: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2375490/masterthesis.PDF> (accessed: 03.02.2024).

Информация об авторах

Горбунов Владимир Павлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Gorbunov_VP@gosniiga.ru

Чалик Игорь Петрович, исполняющий обязанности генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Chalik_IP@gosniiga.ru

Authors information

Gorbunov Vladimir P., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy General Director, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Gorbunov_VP@gosniiga.ru

Chalik Igor P., Acting General Director, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Chalik_IP@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 10.06.2024.

Аналитическая статья

УДК 629.735.017.1.05: 621.396.676

О ПРОТИВОРЕЧИЯХ В ТРЕБОВАНИЯХ НОРМ ЛЁТНОЙ ГОДНОСТИ К ДИАПАЗОНУ РАБОЧИХ ЧАСТОТ АНТЕНН ГЛОНАСС/GPS

М. А. МАРКЕЛОВ, А. В. ПОТУРАЕВ, О. И. АНДРИЕНКО, В. И. ФЕДЯКИН, Ю. Н. КИРИКОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Проведён анализ отечественных авиационных правил (АП) и норм лётной годности (НЛГ) на предмет соответствия содержащихся в них требований к диапазону рабочих частот антенно-фидерных устройств (АФУ) бортового оборудования GPS/ГЛОНАСС характеристикам сигналов, оговорённым интерфейсным контрольным документом (ИКД) ГЛОНАСС и стандартами Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Перечень анализируемых документов включает НЛГ гражданских лёгких самолетов (АП-23 и НЛГ-23), самолётов транспортной категории (АП-25 и НЛГ-25), винтокрылых летательных аппаратов нормальной категории (АП-27 и НЛГ-27) и винтокрылых аппаратов транспортной категории (АП-29 и НЛГ-29). Анализ охватывает период с момента включения в указанные документы требований к диапазону рабочих частот АФУ в 1993 году по настоящее время и показывает влияние на эти требования вынужденных изменений частотного плана ГЛОНАСС в период с 1998 по 2008 год. Проводится сравнение требований к АФУ бортового оборудования ГЛОНАСС и GPS с учётом ограничений на ширину предкорреляционной полосы и параметры коррелятора, установленные стандартами ИКАО для мониторинга качества сигнала (SQM), необходимого при работе оборудования в дифференциальном режиме с использованием поправок, передаваемых функциональными дополнениями наземного (SBAS) или космического (GBAS) базирования. По результатам проведённого анализа сделан вывод о несоответствии требований к диапазону рабочих частот АФУ, содержащихся в АП и НЛГ, действующему частотному плану ГЛОНАСС и необходимости изменения этих требований, а также предлагаются возможные варианты изменения.

Ключевые слова: воздушный транспорт, гражданская авиация, авиационные правила, нормы лётной годности, антенно-фидерные устройства, бортовое радиооборудование, спутниковая навигация, транспортные системы страны

Для цитирования: Маркелов М. А., Потураев А. В., Андриенко О. И., Федякин В. И., Кириков Ю. Н. О противоречиях в требованиях норм лётной годности к диапазону рабочих частот антенн ГЛОНАСС/GPS // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 86–95.

ON CONTRADICTIONS IN THE REQUIREMENTS OF THE AIRWORTHINESS STANDARDS FOR THE OPERATING FREQUENCY RANGE OF GLONASS/GPS ANTENNAS

М. А. MARKELOV, А. В. POTURAEV, О. И. ANDRIENKO, В. И. FEDYAKIN, YU. N. KIRIKOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article contains the results of the analysis of Aviation Regulations (AP) and Airworthiness Standards (NLG) in terms of the compliance of the requirements contained therein for the operating frequency range

of antenna and feeder devices (AFD) of airborne GPS/GLONASS equipment with the signal characteristics stipulated by the ICAO standards and GLONASS Interface Control Document (ICD). The list of analyzed documents includes airworthiness standards for light civil aircraft (AP-23 and NLG-23), transport category aircraft (AP-25 and NLG-25), normal category rotorcraft (AP-27 and NLG-27) and transport category rotorcraft (AP-29 and NLG-29). The analysis covers the period from the moment the requirements for the AFD operating frequencies range were introduced in 1993 to the present. The impact on them of forced changes in the GLONASS frequency plan that took place from 1998 to 2008 is shown. The requirements for the AFD of GLONASS and GPS onboard equipment are compared taking into account the limitations on the pre-correlation bandwidth and correlator parameters established by the ICAO standards for the signal quality monitor (SQM), which is necessary when the equipment operates in differential mode using corrections transmitted by SBAS and GBAS systems. Based on the results of the analysis, a conclusion is made regarding the discrepancy between the requirements for the AFD operating frequency range contained in the AP and NLG, the current GLONASS frequency plan and the need to change them, and possible options for changing are proposed.

Keywords: air transport, civil aviation, aviation regulations, airworthiness standards, antenna-feeder devices, on-board radio equipment, satellite navigation, aviation regulations, airworthiness standards, frequency bands, radio interference, transport systems of the country

For citation: Markelov M. A., Poturaev A. V., Andrienko O. I., Fedyakin V. I., Kirikov Yu. N. On contradictions in the requirements of the Airworthiness Standards for the operating frequency range of GLONASS/GPS antennas, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 86–95. (In Russ.)

Введение

В сертификационные базы на новые самолёты и вертолёты уже на протяжении многих лет в качестве требований к диапазону рабочих частот антенно-фидерных устройств (АФУ) оборудования спутниковой навигации вместо соответствующих пунктов авиационных правил приходится включать специальные технические условия (СТУ). В статье рассматриваются причины и обстоятельства, приведшие к этому, и содержатся предложения по корректировке требований к диапазону рабочих частот АФУ.

Материалы анализа

Рассмотрим, как изменялись во времени требования к диапазону частот АФУ с момента их включения в отечественные АП. Впервые они появились в АП-23 (изд. 1993 года) [1], а годом позже включены в АП-25 [2]. Их появление было связано с началом внедрения бортового оборудования спутниковой навигации в гражданской авиации. Первым образцом такого оборудования стала аппаратура СНС-85, представлявшая собой одноканальный приёмник сигналов ГЛОНАСС, предназначенный для использования в составе комплексов стандартного цифрового пилотажно-навигационного оборудования, создававшихся для самолётов Ил-86 и Ту-204. К этому времени система ГЛОНАСС находилась на завершающей стадии развёртывания, а в конце 1995 г. спутниковая группировка была доведена до полного состава и насчитывала 24 спутника, каждый из которых излучал сигнал на присвоенной ему частоте, отличавшейся от рабочих частот других спутников системы. Все частоты лежали в диапазоне от 1602,0 до 1615,5 МГц с шагом 0,5625 МГц. С учётом этого в АП-23 и АП-25 указаны границы диапазона частот АФУ бортового оборудования спутниковой навигации от 1602 до 1616 МГц. Распределение рабочих частот ГЛОНАСС в этот период, а также последующие варианты частотного плана системы показаны на рис. 1.

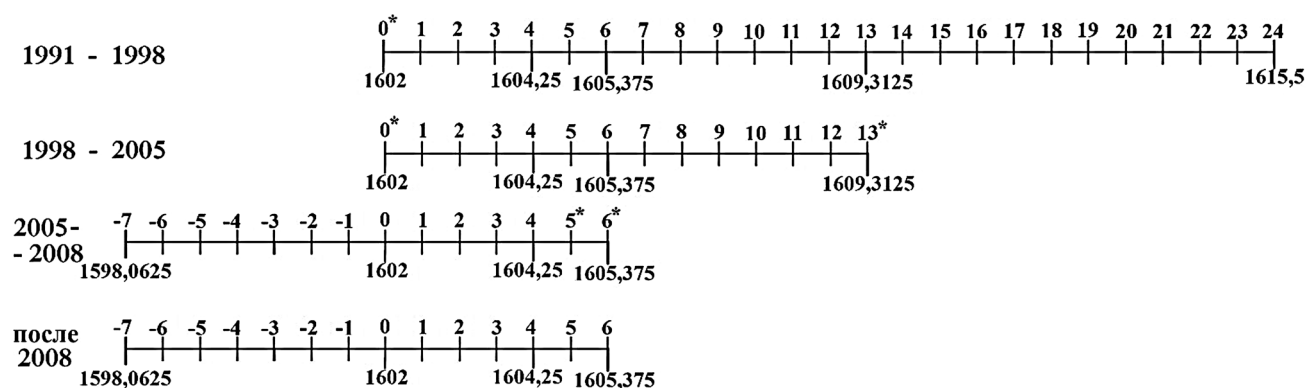


Рис. 1. Этапы изменения частотного плана ГЛОНАСС. * отмечены частотные каналы, предназначенные для использования в качестве технологических

Принимая во внимание, что нулевой частотный канал ГЛОНАСС в период с 1991 по 1998 год предназначался для использования в качестве технологического, а рабочие каналы имели номера с 1-го по 24-й, можно сделать вывод, что при значениях полосы частот АФУ от 1602,0 до 1615,5 МГц крайние рабочие каналы (1-й и 24-й) отстояли от указанных граничных значений на 0,5625 МГц и 0,5000 МГц соответственно, что примерно равно полуширине основного лепестка спектра. Это обеспечивало даже на крайних частотных каналах прохождение основного лепестка спектра, в пределах которого сосредоточено $\geq 90\%$ мощности сигнала.

В связи с изменениями, внесёнными в 1992 году Международным союзом электросвязи (МСЭ) в распределение полосы частот (1610,0–1626,5) МГц, разработчикам ГЛОНАСС пришлось отказаться от использования частотных каналов с 14-го по 24-й. С 1998 года было начато вынужденное поэтапное изменение частотного плана ГЛОНАСС (рис. 1). Этот процесс, занявший почти 10 лет, не способствовал формированию стабильной нормативной базы, и, как следствие, созданию и внедрению бортового оборудования ГЛОНАСС.

Во второй половине 1990-х годов ввиду недостаточного финансирования, а также из-за ограниченного ресурса спутников, орбитальная группировка ГЛОНАСС быстро деградировала, и к 2001 году число работающих спутников сократилось до 6, в то время, как их минимальное количество не должно быть меньше 18.

Кроме того, в связи с отсутствием серийно производимого отечественного бортового оборудования спутниковой навигации, наши авиакомпании вынуждены были устанавливать зарубежное оборудование, использовавшее сигналы системы GPS. Начало этому положено изданием указания № ДВ-6.1-32¹, разрешавшего применение в качестве дополнительного навигационного оборудования импортных приёмоиндикаторов, работающих по сигналам GPS. Следствием этого стало внесение в издание 1997 года АП-23 дополнения, допускавшего использование наряду с АФУ, принимающими сигналы ГЛОНАСС и GPS, также АФУ, рассчитанных на приём только сигналов GPS в полосе (1573,41–1577,41) МГц. При этом, несмотря на действие режима селективного доступа (SA), приводившего к намеренному загроблению сигнала GPS и отменённого администрацией США только в мае 2000 года, точность, обеспечиваемая бортовым оборудованием спутниковой навигации, отвечала эксплуатационным требованиям, предъявляемым на начальном этапе внедрения, когда оно использовалось в качестве дополнительного.

Уместно сравнить упомянутые выше требования АП-23 (изд. 1993 и 1997 гг.) и АП-25 (изд. 1994 года), касающиеся диапазона частот АФУ, с полосами частот, занимаемыми сигналами открытого доступа ГЛОНАСС и GPS. Обе системы используют широкополосные

¹ Указание Департамента воздушного транспорта Минтранса России от 28 марта 1995 г. № ДВ-6.1-32 «О допуске к эксплуатации приёмоиндикаторов СНС на воздушных судах гражданской авиации».

фазоманипулированные шумоподобные сигналы, отличающиеся тактовой частотой применяемой псевдослучайной последовательности. В системе ГЛОНАСС эта частота составляет 511 кГц, а в GPS – 1,023 МГц. Вид спектра сигнала стандартной точности, используемого гражданскими потребителями, показан на рис. 2. Ширина основного лепестка спектра такого сигнала равна удвоенной тактовой частоте модулирующей последовательности, а ширина каждого из боковых лепестков спектра равна тактовой частоте.

Ширина рабочей полосы АФУ GPS согласно АП-23 составляла 4 МГц. При этом обеспечивался приём основного лепестка спектра, а также двух боковых лепестков, расположенных слева и справа от основного. Ввиду того, что сигнал GPS излучается на частоте 1573,42 МГц и его спектр является симметричным относительно несущей частоты, границами рабочей полосы АФУ должны были быть 1573,42 и 1577,42 МГц, а значения, указанные в АП-23, являются ошибочными. Тем не менее, в такой формулировке данное требование сохранилось в АП-23 вплоть до действующего ныне издания, опубликованного в 2014 году.

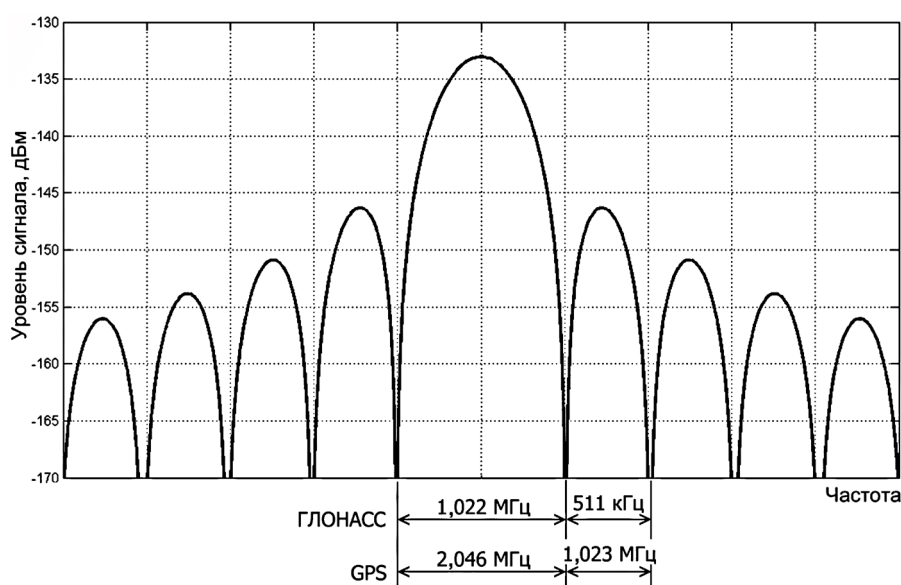


Рис. 2. Спектр сигналов стандартной точности ГЛОНАСС и GPS

В период с 1998 по 2005 год спутники ГЛОНАСС работали на каналах с нулевого по 13-й, однако в АП-23 и АП-27 [3], изданных в 2000 году, требования к диапазону частот АФУ ГЛОНАСС оставались неизменными, и его граничными частотами по-прежнему были 1602 и 1616 МГц. Требования к диапазону частот АФУ GPS в новом издании АП-23 остались прежними, а в АП-27 они по неизвестным причинам включены не были.

В АП-29 [4], изданных в 2003 году, в части диапазона частот АФУ ГЛОНАСС оговорено, что он должен соответствовать рабочим частотам, указанным в ИКД на систему. В то время действовала четвёртая редакция ИКД [5] 1998 года. Согласно ИКД спутники ГЛОНАСС в период с 1998 по 2005 год могли использовать без ограничений частотные каналы с 0-го по 12-й, при этом каналы 0 и 13 предназначались для технологических целей. Было также указано, что с 2005 года все, находящиеся в эксплуатации спутники ГЛОНАСС, будут использовать каналы с -7 по +6, причем каналы +5 и +6 должны были использоваться лишь как технологические в ограниченные периоды времени (например, при восполнении орбитальной подсистемы). Необходимо отметить, что в АП-29 не оговаривалось, что граничные значения диапазона частот АФУ должны определяться с учётом ширины полосы частот, занимаемой сигналом ГЛОНАСС, и должны отстоять от несущих частот крайних частотных каналов как минимум на полуширину основного лепестка спектра.

Относительно диапазона частот АФУ GPS в АП-29 было указано, что он должен быть в пределах $(1575,42 \pm 1,00)$ МГц, то есть в отличие от АП-23 (изд. 1997 и 2000 гг.) рабочая полоса располагалась симметрично относительно несущей частоты сигнала и соответствовала ширине основного лепестка спектра.

Следует особо отметить, что при подготовке рассматриваемого издания АП-29 не было учтено, что в 2001 году ИКАО приняты стандарты на глобальную навигационную спутниковую систему. Эти стандарты, помимо систем GPS и ГЛОНАСС, включали функциональные дополнения наземного и космического базирования, которые предназначались для выполнения захода на посадку. Хотя упомянутые стандарты не содержали конкретных требований к диапазону частот АФУ, в них подробно описывались сигналы, излучаемые спутниками, и были приведены требования к помехоустойчивости приёмников, включавшие полосы частот, занимаемые сигналами GPS и ГЛОНАСС, а также оговаривались допуски на ширину предкорреляционной полосы, обеспечивающие функционирование монитора качества сигнала (SQM).

Рассмотрим подробнее требования ИКАО по устойчивости приёмников GPS и ГЛОНАСС к воздействию гармонической помехи. Для удобства сравнения на рис. 3 представлены рядом фрагменты масок гармонической помехи для GPS и ГЛОНАСС и показаны спектры сигналов. При этом для ГЛОНАСС спектр, расположенный слева, соответствует -7 частотному каналу, а справа – $+6$ каналу.

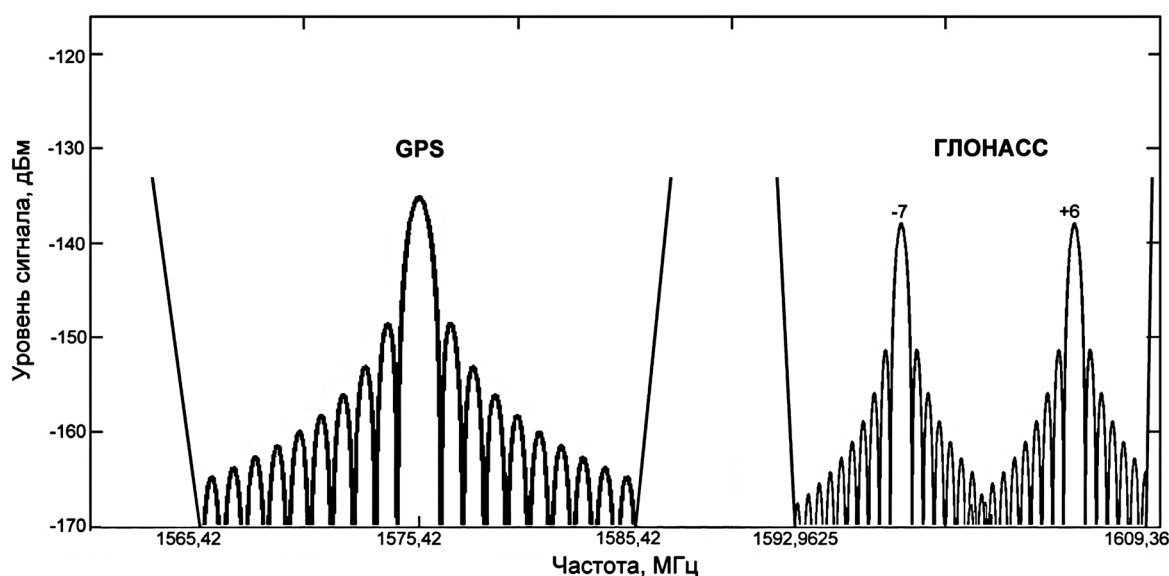


Рис. 3. Рабочие полосы частот сигналов GPS и ГЛОНАСС

Как видно на рис. 3, ширина рабочей полосы сигнала GPS согласно стандарту ИКАО составляет 20 МГц, что соответствует сумме ширины основного лепестка спектра и девяти боковых лепестков, расположенных слева и справа от него.

Для ГЛОНАСС левая граница маски отстоит от частоты -7 канала на 5,11 МГц, что соответствует сумме полуширины основного лепестка спектра и девяти боковых лепестков, расположенных слева от него. Правая граница маски отстоит от частоты $+6$ канала на 3,985 МГц, что соответствует сумме полуширины основного лепестка спектра и семи боковых лепестков, расположенных справа от него. Полная ширина полосы сигнала ГЛОНАСС составляет около 16,4 МГц.

Наличие асимметрии объясняется тем, что на момент разработки стандартов ИКАО самым верхним рабочим частотным каналом ГЛОНАСС был канал $+4$, а каналы $+5$ и $+6$ считались технологическими. По этой причине правая граница маски установлена на 5,11 МГц выше частоты

+4-го частотного канала и не пересматривалась после публикации в 2008 году новой редакции ИКД ГЛОНАСС [6], снявшей ограничения на использование частотных каналов +5 и +6.

Необходимость включения в стандарты ИКАО указанных значений полосы объяснялась тем, что к этому времени были разработаны и внедрены методы борьбы с ошибками определения псевдодалности, обусловленными многолучевостью, основанные на применении так называемых «узких» и стробовых корреляторов, для работы которых требовалась более широкая предкорреляционная полоса. Впервые техническое решение на основе «узких» корреляторов было реализовано канадской фирмой Novatel Communications в 1992 году [7, 8], а стробовые корреляторы были предложены американской фирмой Achtech [9, 10]. Кроме того, для приёмников, предназначенных для работы в дифференциальном режиме, стандарты ИКАО требовали применения SQM, при этом параметры корреляторов, которые могли использоваться в приёмнике, должны были соответствовать ширине предкорреляционной полосы. Допустимые значения этих параметров согласно стандартам ИКАО могут изменяться в довольно широких пределах. Например, для приёмника GPS, использующего корреляторы типа «опережение – запаздывание» эти пределы составляют от 2 до 24 МГц, а для приёмника ГЛОНАСС – от 7 до 18 МГц [11]. Нетрудно заметить, что их максимальные значения превышают ширину масок гармонической помехи для GPS и ГЛОНАСС, определённую по минимальному допустимому уровню помехи (20,0 и 16,4 МГц соответственно). При этом надо учитывать, что для крайних и близких к ним частотных каналов ГЛОНАСС реализация максимальной ширины предкорреляционной полосы невозможна без выхода за пределы действующей маски.

В АП-25 (изд. 2004 года) внесены изменения, касающиеся требований к диапазону частот АФУ GPS и ГЛОНАСС, учитывающие появление стандартов ИКАО. Так, теперь диапазон рабочих частот АФУ GPS должен был лежать в пределах $(1575,42 \pm 12,00)$ МГц, то есть его полная ширина была приведена в соответствие с максимальным значением ширины предкорреляционной полосы, предусмотренным для SQM (24 МГц), но при этом границы диапазона вышли за пределы маски гармонической помехи при уровне $-150,5$ дБВт.

Для ГЛОНАСС граничными частотами рабочего диапазона АФУ являлись $f_n - 5,75$ МГц и $f_v + 5,75$ МГц (где f_n и f_v – верхняя и нижняя несущие частоты ГЛОНАСС, используемые сопрягаемым с АФУ оборудованием спутниковой навигации). Такая формулировка была обусловлена продолжающимся изменением частотного плана ГЛОНАСС. При этом предполагалось, что верхним рабочим каналом будет +4, имеющий частоту 1604,25 МГц. Это гарантировало, что верхняя граница рабочего диапазона АФУ ГЛОНАСС не выйдет за пределы полосы, распределённой радионавигационной спутниковой службе (1559–1610) МГц. Допуск 5,75 МГц ограничивал выбор параметров коррелятора регионами 1 и 2, а после того, как в 2008 году частотные каналы +5 и +6 переведены из категории технологических в рабочие, в области допустимых значений остался только регион 1.

В АП-25 (изд. 2009 года) требования к диапазону частот АФУ сохранились, однако затем в них начали вноситься изменения. Так, в новых редакциях АП-23 и АП-27 (изд. 2014 года) границы диапазонов частот АФУ GPS и ГЛОНАСС стали теми же самыми, что и в АП-23 (изд. 1997 года). Для ГЛОНАСС они составляли от 1602 до 1616 МГц и соответствовали частотному плану, прекратившему действие в 1998 году, а для GPS – от 1573,41 до 1577,41 МГц, т. е. содержали отмеченную ранее опечатку, обусловленную использованием ошибочного значения несущей частоты сигнала GPS.

Точно такая же формулировка была включена и в АП-25 (изд. 2015 года). В НЛГ-23 [12], НЛГ-25 [13] и НЛГ-27 [14], утверждённых Росавиацией в 2022 году, границы диапазона частот АФУ ГЛОНАСС вернулись к первому этапу частотного плана, утратившему силу после 1998 года, требования к АФУ GPS содержали старую опечатку, а в НЛГ-29 [15] требования к АФУ отсутствовали вообще. Не удивительно, что по этой причине в 2023 году одному из известных отечественных разработчиков и изготовителей радионавигационного оборудования удалось получить

свидетельство о годности на антенну, предназначенную для приёма сигналов в полосе частот, использование которой система ГЛОНАСС прекратила ещё четверть века назад.

Результаты проведённого анализа показывают, что требования к диапазону рабочих частот АФУ оборудования спутниковой навигации, содержащиеся в АП и НЛГ, не соответствуют характеристикам сигналов ГЛОНАСС, оговорённым в ИКД [6] и в стандартах ИКАО [11] и нуждаются в пересмотре. Возможны следующие варианты изменения этих требований.

Наиболее простым решением представляется использование в качестве границ диапазона рабочих частот АФУ крайних значений частот, соответствующих минимальному пороговому уровню гармонической помехи, оговорённому стандартами ИКАО для приёмников GPS и ГЛОНАСС. При этом диапазон рабочих частот для АФУ GPS будет ограничен частотами 1565,42 и 1585,42 МГц, а его ширина составит 20 МГц, что соответствует полосе частот, занимаемой основным лепестком спектра и девятью боковыми лепестками с каждой стороны.

Для АФУ ГЛОНАСС границами диапазона в этом случае будут 1592,9525 и 1609,3600 МГц, а его ширина составит 16,4075 МГц. Это соответствует полосе частот, занимаемой основным лепестком спектра и девятью боковыми лепестками с каждой стороны для всех частотных каналов ГЛОНАСС, за исключением +5 и +6. У этих каналов при указанной верхней границе диапазона будет иметь место одностороннее ограничение спектра, а отстройка от верхней границы диапазона относительно +6 частотного канала составит 3,985 МГц (по сравнению с 5,110 МГц от нижней границы для –7 канала). При этом возможна реализация SQM ГЛОНАСС, если только параметры коррелятора и дифференциальной групповой задержки соответствуют региону 1, для которого ширина предкорреляционной полосы согласно стандартам ИКАО составляет от 7 до 9 МГц [11].

Если оборудование не предназначено для использования дифференциальных поправок, передаваемых функциональными дополнениями наземного или космического базирования (GBAS или SBAS), то необходимость применять монитор качества сигнала отпадает и отмеченное выше одностороннее ограничение спектра для частотных каналов +5 и +6 может не приниматься во внимание.

Для АФУ GPS предлагаемая ширина диапазона частот 20 МГц не ограничивает выбор параметров приёмного тракта, за исключением единственного случая, соответствующего региону 4 и связанного с использованием корреляторов типа «опережение – запаздывание», когда требуемая ширина предкорреляционной полосы должна быть в пределах от 20 до 24 МГц [11].

Поэтому представляет интерес оценка возможности расширения диапазона рабочих частот АФУ для снятия ограничений на выбор параметров, влияющих на работу SQM. Применительно к GPS единственным фактором, требующим учёта, является необходимость обеспечения повышенного уровня помехоустойчивости при смещении границ диапазона АФУ за пределы маски, определяющей значение гармонической помехи. Альтернативой этому мог бы быть пересмотр действующей маски гармонической помехи в стандарте ИКАО с целью смещения её границ на 2 МГц вниз и вверх относительно существующих. Однако такой вариант представляется маловероятным, в связи с тем, что повлечёт за собой ревизию большого количества действующих нормативных документов, включая стандарты RTCA, EUROCAE и ARINC.

Что касается ГЛОНАСС, то ввиду того, что ширина предкорреляционной полосы для региона 3 должна быть в пределах от 15 до 18 МГц [11], полное снятие ограничений требует расширения диапазона частот АФУ, при этом верхняя граница рабочего диапазона АФУ выйдет за пределы полосы частот, распределённой радионавигационной спутниковой службе (1559–1610) МГц, что недопустимо, так как может привести к радиопомехам со стороны абонентских терминалов системы спутниковой связи Globalstar, использующей полосу частот (1610,1150–1621,1850) МГц для линии Земля – космос.

Следует также отметить, что для оборудования, не рассчитанного на работу с функциональными дополнениями GBAS и/или SBAS, можно применять АФУ с более узкими по сравнению

с рассмотренными выше диапазонами рабочих частот, при условии, что ширина полосы АФУ будет достаточна для обеспечения нормальной работы подключённого к нему приёмника. Согласно требованиям ИКАО к характеристикам сигнала в пространстве, предоставляемого системами спутниковой навигации, при полёте по маршруту; в зоне аэродрома, на этапах начального и промежуточного захода на посадку и вылета, должна обеспечиваться точность определения положения в горизонтальной плоскости 3,70 км, 0,74 км и 220 м соответственно (с доверительной вероятностью 95 %), а требования к точности по вертикали при этом не предъявляются [11]. При таких условиях в качестве минимальных требований к диапазону рабочих частот АФУ можно было бы принять граничные значения, которые определяются шириной полосы основного лепестка спектра сигнала:

- от 1574,42 до 1576,42 МГц для АФУ GPS;

- от 1597,5515 до 1605,8860 МГц для АФУ ГЛОНАСС,

предусмотрев при этом достаточный технологический запас, для обоснования которого должны быть проведены дополнительные исследования.

Оценка выявленных несоответствий между масками гармонической помехи и некоторыми значениями ширины предкорреляционной полосы, установленными стандартами ИКАО для SQM, требует отдельного анализа с привлечением организаций-разработчиков оборудования спутниковой навигации. Необходимо также исследование влияния одностороннего ограничения спектра сигналов ГЛОНАСС, близких к границам частотного диапазона, на работу SQM и возможных последствий использования таких сигналов для обеспечения точного захода на посадку с помощью функциональных дополнений SBAS и GBAS.

Заключение

Требования к диапазону рабочих частот АФУ бортового оборудования спутниковой навигации, содержащиеся в нормах лётной годности и авиационных правилах, не соответствуют действующему частотному плану ГЛОНАСС, представленному в ИКД, и нуждаются в уточнении.

При определении новых границ диапазона рабочих частот АФУ должны учитываться требования ИКАО к помехоустойчивости приёмника и ширине предкорреляционной полосы, необходимой для работы монитора качества сигнала (SQM).

Для бортового оборудования спутниковой навигации, не предназначенного для работы в дифференциальном режиме, могут быть установлены минимальные требования к полосе рабочих частот АФУ, исходя из ширины основного лепестка спектра сигналов.

Новые требования к диапазону рабочих частот АФУ должны формироваться с привлечением организаций-разработчиков бортового оборудования спутниковой навигации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Авиационные правила. Часть 23. Нормы лётной годности гражданских лёгких самолётов. Москва: МАК, 1993. 227 с.
2. Авиационные правила. Часть 25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории. Москва: МАК, 1994. 322 с.
3. Авиационные правила. Часть 27. Нормы лётной годности винтокрылых летательных аппаратов нормальной категории, Москва: Авиаиздат, 2000. 102 с.
4. Авиационные правила. Часть 29. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. Москва: Авиаиздат, 2003. 130 с.

5. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС – Интерфейсный контрольный документ. Редакция 4.0. Москва: КНИЦ МО РФ, 1998. 57 с.
6. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС – Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. Москва: РНИИ КП, 2008. 74 с.
7. Patrick Fenton, Albert J. Van Dierendonck. Patent US no. 5495499A (27 Feb 1996).
8. Van Dierendonck A. J., Fenton Pat, Ford Tom. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, 1992, vol. 39, no. 3, pp. 265–284.
9. Veitsel Victor A., Zhdanov Aleksey V., Zhodzishsky Mark I. The Mitigation of Multipath Errors by Strobe Correlators in GPS/GLONASS Receivers. *GPS Solutions*, 1998, vol. 2.
10. Вейцель В. А., Жданов А. В., Жодзишский М. И. Стробовые корреляторы в навигационных приёмниках с псевдошумовыми сигналами // *Радиотехника*. 1997. № 8. С. 11–18.
11. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электро-связь. Том 1. Радионавигационные средства. Изд. 8. 2023, 880 с.
12. Нормы лётной годности гражданских лёгких самолётов – НЛГ-23. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (дата обращения: 27.05.2024).
13. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории – НЛГ-25. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (дата обращения: 27.05.2024).
14. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории – НЛГ-27. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (дата обращения: 27.05.2024).
15. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории – НЛГ-29. URL: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehniky-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (дата обращения: 27.05.2024).

References

1. Aviation Regulations. Part 23. Airworthiness standards for light civil aircraft, Moscow, IAC, 1993, 227 p. (In Russ.)
2. Aviation Regulations. Part 25. Airworthiness standards for transport category aircraft, Moscow, IAC, 1994, 322 p. (In Russ.)
3. Aviation Regulations. Part 27. Airworthiness standards for normal category rotorcraft, Moscow, Aviaizdat Publ., 2000, 102 p. (In Russ.)
4. Aviation Regulations. Part 29. Airworthiness standards for transport category rotorcraft, Moscow, Aviaizdat Publ., 2003, 130 p. (In Russ.)
5. Global navigation satellite system GLONASS – Interface Control Document. Revision 4.0, Moscow, KNITS MO RF Publ., 1998, 57 p. (In Russ.)
6. Global navigation satellite system GLONASS – Interface Control Document. Revision 5.1, Moscow, RНИИ КП Publ., 2008, 74 p. (In Russ.)
7. Patrick Fenton, Albert J. Van Dierendonck. Patent US no. 5495499A (27 Feb 1996).
8. Van Dierendonck A. J., Fenton Pat, Ford Tom. Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, 1992, vol. 39, no. 3, pp. 265–284.
9. Veitsel Victor A., Zhdanov Aleksey V., Zhodzishsky Mark I. The Mitigation of Multipath Errors by Strobe Correlators in GPS/GLONASS Receivers. *GPS Solutions*, 1998, vol. 2.
10. Veitsel V. A., Zhdanov A. V., Zhodzishsky M. I., Strobe Correlators in navigation receivers of pseudonoise signals. *Radiotekhnika*, 1997, no. 8, pp. 11–18. (In Russ.)
11. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Vol. 1. Radio Navigation Aids. Eight Ed., 2023, 854 p.

12. Airworthiness standards for light civil aircraft – NLG-23, available at: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehnikiy-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (accessed: 27.05.2024). (In Russ.)

13. Airworthiness standards for transport category aircraft – NLG-25, available at: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehnikiy-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (accessed: 27.05.2024). (In Russ.)

14. Airworthiness standards for normal category rotorcraft – NLG-27, available at: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehnikiy-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (accessed: 27.05.2024). (In Russ.)

15. Airworthiness standards for transport category rotorcraft – NLG-29, available at: <https://favt.gov.ru/sertifikaciya-avia-tehnikiy-sertifikaciya-tipa-avia-tehnika-zakony-pravila-dokumenty/?id=5498> (accessed: 27.05.2024). (In Russ.)

Информация об авторах

Маркелов Михаил Андреевич, начальник сектора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, markelov@gosniiga.ru

Потураев Алексей Викторович, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, AV_Poturaev@gosniiga.ru

Андриенко Ольга Ивановна, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, OI_Andrienko@gosniiga.ru

Федякин Владимир Иванович, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, VI_Fedyakin@gosniiga.ru

Кириков Юрий Николаевич, начальник отдела – эксперт, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, UN_Kirikov@gosniiga.ru

Authors information

Markelov Mikhail A., Head of Sector, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, markelov@gosniiga.ru

Poturaev Aleksey V., Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, AV_Poturaev@gosniiga.ru

Andrienko Olga I., Research Associate, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, OI_Andrienko@gosniiga.ru

Fedyakin Vladimir I., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, VI_Fedyakin@gosniiga.ru

Kirikov Yuriy N., Head of Department – Expert, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, UN_Kirikov@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 29.05.2024.

The article was submitted 15.02.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 29.05.2024.

Научная статья
УДК 519.711.3: 656.7

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЛИНЕЙКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ЧЕРЕЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В. П. ГОРБУНОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлен метод, позволяющий с использованием параметрического моделирования решить задачу формирования оптимальной линейки парка воздушных судов (ВС) для эксплуатации в районах Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока. Предложено рассматривать параметрическое моделирование как метод формирования оптимальной линейки ВС через представленные разработчиками основные характеристики и параметры. Показано, что достоверного результата при решении таких слабоформализованных задач, как принятие решений управления процессами и системами в средне- и долгосрочной перспективе, можно достичь с использованием композиций методов исследования временных рядов. Поэтому для исследования использованы такие факторы, как производственно-ресурсный потенциал, маршрутная сеть, параметры аэродромов для расчёта консонанса – коэффициента выравнивания модели по значимым параметрам. Такая модель может основываться на оценке зависимости темпа серийного производства самолётов от их обобщённых показателей качества, в основу которых положена функциональная связь между значениями коэффициентов потенциала пассажироместимости в решении задач по назначению и коэффициентов возможностей самолёта. Метод может применяться для решения задачи формирования флота единой дальневосточной авиакомпания.

Ключевые слова: единая дальневосточная авиакомпания, параметрическое моделирование, консолидированный заказ, воздушное судно, транспортные системы страны

Для цитирования: Горбунов В. П. Метод формирования оптимальной линейки воздушных судов через параметрическое моделирование // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 96–105.

METHOD FOR FORMING AN OPTIMAL LINE OF AIRCRAFT THROUGH PARAMETRIC MODELING

V. P. GORBUNOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article presents a method for forming an optimal line of aircraft, which allows, using parametric modeling, to solve the problem of forming an optimal line of aircraft fleet for operation in the Far North, Arctic and Far East. It proposed to consider parametric modeling as a method for forming an optimal line of aircraft through the main characteristics and parameters presented by the developers. It established that reliable results in solving such poorly formalized problems as decision-making for managing processes and systems in the medium and long term achieved, using methods based on compositions of time series research methods. Therefore, the study used factors such as production and resource potential, route network, airfield parameters to calculate consonance – the coefficient of model alignment according to significant parameters. Such a model can be based on assessing the dependence of the rate of serial production of

aircraft on their generalized quality indicators, which are based on the functional relationship between the values of the passenger capacity potential coefficients in solving mission problems and determining the corresponding capabilities of the aircraft. The method used to solve the problem of forming a fleet of a single Far Eastern airlines.

Keywords: united Far Eastern airline, consolidated order, aircraft, transport system, parameters modeling

For citation: Gorbunov V. P. Method for forming an optimal line of aircraft through parametric modeling, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 96–105. (In Russ.)

Введение

Развитие авиатранспортного сектора как важнейшей составляющей инфраструктуры Крайнего Севера, Арктики и дальневосточного региона является сегодня одним из приоритетных направлений в государственной стратегии развития Дальнего Востока. Повышение транспортной доступности и увеличение авиационной подвижности является ключевой задачей. Создание единой дальневосточной авиакомпания на основе шести оперирующих в регионе авиакомпаний с лидирующей ролью авиакомпании «Аврора» направлено на её решение.

Совокупный флот всех шести авиакомпаний составляет >130 ВС, самолётов и вертолётов различных типов. Исходя из структуры парка, включающего в себя значительное количество ВС зарубежного производства и испытывающего острые проблемы с поддержанием лётной годности, рациональным решением является консолидация региональных авиакомпаний с государственным участием, исходя из принципов оптимизации затрат по всем основным направлениям деятельности авиаперевозчиков региона.

Оптимальное количество типов ВС в парке единой авиакомпании может дать весомый синергетический эффект в таких направлениях, как формирование объединённого пула запасных частей, создание единого учебного центра по подготовке авиационного персонала с едиными программами подготовки и тренажёрным комплексом [1]. В процессе решения многофакторной задачи создания единой дальневосточной авиакомпании встаёт вопрос обновления парка ВС за счёт разработки оптимальной линейки современных ВС отечественного производства с целью создания консолидированного заказа от всех участников альянса дальневосточных авиакомпаний.

На сегодня промышленность готовится к серийному производству нескольких типов ВС, имеющих перспективу войти в состав флота дальневосточных авиакомпаний, оперирующих, в том числе в районах Крайнего Севера и Арктики, где к ВС предъявляются особые требования по эксплуатации в условиях экстремально низких температур [2–4].

Методы исследования

В условиях неопределённости с производством и сроками поставки новой отечественной авиатехники сложным является не только формализация поставленной задачи, но и выявление наиболее значимых факторов формирования парка ВС для Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока.

При выборе метода исследования было бы логичным рассматривать отдельные составляющие, строя «простые» модели, в частности модели множественной регрессии, авторегрессии. Однако прогнозы развития промышленности, количества, сроков поставок и достижения конечного результата формирования оптимальной линейки парка ВС региональной авиакомпании закладывают основу для принятия приоритетных управленческих решений. Последствия оных могут отразиться на различных сферах жизнедеятельности, поэтому модель прогнозирования должна предусматривать системный анализ предметной области, выявление наиболее значимых факторов.

Решение слабоформализованных задач по управлению процессами и системами, особенно на средне- и долгосрочную перспективу, можно получить с использованием композиций методов исследования временных рядов. Для исследования использованы такие факторы, как производственно-ресурсный потенциал, маршрутная сеть, параметры аэродромов для расчёта консонанса [5].

В процессе формирования разработчиком ВС множества параметров оптимальной линейки ВС следует учитывать относительные изменения в маршрутной сети и специфике деятельности авиаперевозчиков, которые влияют на формирование номенклатуры авиапарка в каждом конкретном регионе. Кроме перерасчёта номенклатуры ВС в условиях Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока, требуется пересмотр социальных маршрутов. На основании списков социальных маршрутов, подписанных полномочным представителем Президента в ДФО и уполномоченными лицами, рабочей группой с участием автора данной статьи был составлен единый реестр дальневосточных маршрутов, насчитывающий 504 маршрута (табл. 1) на начало 2020 года, с последующим увеличением до 535 в 2021 году, где 385 аэропортов расположены в труднодоступных населённых пунктах [1]. В табл. 2 приведены классификационные параметры аэродромов по длинам ВПП для разных типов ВС в рассматриваемых регионах.

Таблица 1

Количество заявленных маршрутов на начало 2020 года

Регион	Амурская область	ЕАО	Забайкальский край	Камчатский край	Магаданская область
Количество	19	3	31	94	26
Регион	Республика Саха (Якутия)	Приморский край	Хабаровский край	Сахалинская область	Чукотский АО
Количество	179	34	53	21	44

Таблица 2

Классификационные параметры аэродромов Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока

№ п/п	Потребная длина взлётно-посадочной полосы, м	ВС
1	≤600	вертолёты
2	>600	аналоги Ан-2, DHC-6
3	>900	аналоги Ан-2, DHC-6, L-410
4	>1500	аналоги Ан-2, DHC-6, L-410, Ил-114, Q300/400
5	>2000	SSJ100/A319/B737

Формирование системы формализованных критериев

При формировании системы формализованных критериев рациональности программы развития системы обновления авиации в условиях Крайнего Севера на долгосрочную перспективу автором настоящей статьи обоснована необходимость введения дополнительного ограничения количества ВС для Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока, что напрямую зависит от эксплуатационных и параметрических характеристик в паре «ВС – аэродром» (табл. 2) и взаимосвязано с параметрами построения перспективной маршрутной сети.

Учтём, что при формировании программы развития флота осуществляется разбивка периода планирования $[t_0, T_{\text{зад}}]$ на конечное количество T равномерных отрезков – интервалов, продолжительностью Δt каждый, т. е.

$$T = \frac{T_{\text{зад}} - t_0}{\Delta t}. \quad (1)$$

При этом считается, что поставка новых самолётов будет происходить в середине каждого интервала времени и сразу после поставки самолёты будут использоваться по назначению.

Первое ограничение модели оптимизации модельного ряда ВС для условий эксплуатации на Крайнем Севере, в Арктике и на Дальнем Востоке связано с планированием парка ВС для единой дальневосточной авиакомпании и имеет следующий формализованный вид:

$$\Delta N_{j\tau}^{\max} = \min \left\{ N_{i\tau}^{\text{налич_max}} + \dot{N}_{i\tau}^{\max} \Delta t_{\tau}; \left\lceil \frac{S_{\tau}^{\text{зад}}}{C_{1j}} \right\rceil \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta N_{j\tau}^{\max}$ – максимально возможное количество самолётов j -го типа, доступных для закупки на отечественном рынке на интервале времени τ ; τ – текущий интервал времени поставки t ; $N_{j\tau}^{\text{налич_max}}$ – максимальное количество самолётов j -го типа, которые уже производятся (имеются на рынке) и могут быть закуплены (или взяты в лизинг) и введены в работу на интервале времени τ ; $\dot{N}_{j\tau}^{\max}$ – максимально возможный темп серийного производства самолётов j -го типа на интервале времени τ ; $S_{\tau}^{\text{зад}}$ – финансовые ограничения на τ -м интервале времени; C_{1j} – стоимость закупки одного самолёта j -го типа; $\lceil \cdot \rceil$ в (2) означают округление до наименьшего целого.

С учётом плановой поставки ВС (табл. 3) возможно использовать многомодельную методику прогнозирования, которая будет учитывать не только производственные возможности поставок ВС, но и систему расширения маршрутной сети.

Таблица 3

Планируемый парк до использования математической модели оптимизации

Тип маршрута	Тип ВС	Количество ВС					
		2019	2021	2022	2023	2024	2025
Местные	Ми-8	92	88	80	74	69	65
	DHC-6	7	10	15	21	26	29
	L-410 / Ан-2/3	17	17	17	17	21	25
	ЛМС				2	6	10
Региональные	Ан-24/26/Як-40	80	72	57	32	5	
	Q300	6	6	6	6	6	6
	Ил-114 (Q400)	5	9	15	24	34	34
	SSJ-100	8	9	12	14	16	16
Итого		215	211	202	190	183	185
в том числе Ил-114 по графику поставки ВС					3	11	19
в том числе всего российских самолётов		25	26	29	36	54	70

Для анализа с применением показателя консонанса (C_{ij}) будем использовать второй элемент модели оптимизации модельного ряда ВС для условий Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока:

$$C_{ij} = \frac{|v_{ij} + \bar{v}_{ij}|}{|v_{ij}| + |\bar{v}_{ij}|}, \quad (3)$$

где v_{ij} , $\bar{v}_{ij}$ – пара связей в транзитивно замкнутой когнитивной матрице маршрутной сети; диссонанса (d_i);

$$d_{ij} = 1 - C_{ij} \quad (4)$$

воздействия системы поставок ВС на концепт ($\bar{P}_i$):

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (5)$$

и концепта на систему оптимизации парка ВС в каждый период времени ($\bar{P}_j$):

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}. \quad (6)$$

Показатели консонанса воздействия для большинства концептов формирования парка ВС достаточно высоки и находятся в пределах от 0,64 до 0,91. Это значит, что отклонения от начального количества поставок для разных видов ВС могут составлять от 64 до 91. При этом максимальный показатель диссонанса крайне низок и равен 0,3. То есть между отобранными концептами изначального плана количества ВС и принципами оптимизации авиапарка существует взаимозависимость, исходя из которой концепты могут быть использованы при построении сценариев развития авиационной составляющей транспортной системы страны.

Вычисление значений степени сходства между каждым из входящих в состав временных рядов, как наиболее вероятного сценария производства каждого типа ВС, и будет являться целевым временным рядом. Результаты будут иметь вид ко вектора значений сходств:

$$Sim = \{Sim_1, \dots, Sim_k\}, \quad (7)$$

где Sim_i – мера сходства между i -м входным интервалом и целевым рядом, вычисляемым по формуле (2).

Поиск оптимального значения сходства среди всех значений ко вектора, полученного на предыдущем шаге, будет иметь вид:

$$\max\{Sim_i: i=1, \dots, K\}, \quad (8)$$

где K – общее количество рассматриваемых признаков сходства ВС.

Следует отметить, что в общем случае вместо меры сходства (8) может быть использована любая другая метрика, например, стандартная $ScoreAvg$ (целевая функция времени пополнения авиапарка). Тогда соответственно решается задача минимизации – определяется пара рядов, для которых значение $ScoreAvg$ меньше всего:

$$\min\{ScoreAvg_i: i=1, \dots, K\}.$$

Таким образом, общий показатель меры сходства может быть представлен как:

$$ScoreSim(Y, X) = 100\% \cdot \left(1 - \frac{ScoreAvg_1}{ScoreAvg_0}\right). \quad (9)$$

После того, как полученные результаты сформированы, методом сравнительного анализа и рассчитанных статистик необходимо принятие управленческих решений по выбору оптимизации модельного ряда, что может потребовать дополнительных вводных данных по характеристикам, информации, а также введение уточнений в постановку задачи. Результаты оптимизации модельного ряда гражданских ВС представлены в табл. 4.

Таблица 4

Планируемый парк после применения модели оптимизации

Тип маршрута	Поставки / вывод					
	2021	2022	2023	2024	2025	Итого
Местные	–4	–8	–6	–5	–4	–27
	3	5	6	5	3	22
				4	4	8
			2	4	4	10
Региональные	–8	–15	–25	–27	–5	–80
	0	0	0	0	0	0
	4	6	9	10	0	29
	1	3	2	2	0	8
Оптимизированное значение потребного количества ВС	1	–9	–12	–12	2	–30
			3	8	8	19
	1	3	7	18	16	45

На основе полученных значений общего количества ВС вычисляется коэффициент подобия модельному ряду, предложенный автором:

$$ScoreSim(Y, X) = 100\% \cdot \left(1 - \frac{ScoreAvg_1}{ScoreAvg_0} \right) = 100\% - 100\% \times \frac{\left(\frac{1}{(\max(n, m) - (P_1 - \max(n, m)))} \sum_{k=1}^{P_1} D_1[j_p, i_p] \right)}{P_0},$$

где P_0 – начальное количество ВС модели π_0 ; P_1 – реальное количество, которое может произвести промышленность за период π_1 ; $\max(n, m)$ – максимальное среди n и m значение.

В рамках реализуемого математического метода сначала исключаются пробелы по изменениям, и только после этого выполняется операция нормализации данных.

Для приведённых входных рядов временных данных (табл. 5) нормализация выполнена по диапазону:

$$z_i = \frac{x_i - \min_{i=1, \dots, m} \{x_i\}}{\max_{i=1, \dots, m} \{x_i\} - \min_{i=1, \dots, m} \{x_i\}},$$

где $\max_{i=1, \dots, m} \{x_i\}$ – максимальное значение, среди всех значений X , а $\min_{i=1, \dots, m} \{x_i\}$ – соответственно минимальное.

Для включения к рассмотрению в качестве альтернативных для обновления парка при создании единой дальневосточной авиакомпания на долгосрочной перспективе целесообразно рассматривать только те типы самолётов, которые будут иметь требуемый уровень характеристик в выполнении задач в соответствии с возможными сценариями их применения. В то же время, в целях своевременного формирования авиапарка из выбранных типов ВС должен быть возможен максимальный темп их производства, оценку которому возможно было бы сделать с помощью соответствующей математической модели. Такая модель может основываться на оценке зависимости темпа серийного производства самолётов от их обобщённых показателей качества, в основу которых положена функциональная связь между значениями коэффициентов потенциала пассажировместимости и определению возможностей ВС, таких как максимальная дальность полёта и расход топлива.

Нормализованные значения целевого и входного временных рядов по диапазону представлены в табл. 5.

Таблица 5

Значения целевого и входного временных рядов после нормирования по диапазону

Номер индекса времени	Значение целевого временного ряда (Y)	Значение входного временного ряда (X)
1	0	0,0456026
2	0,0537353	0,1335505
3	0,2857143	0,3973941

Данные по оптимизации модельного ряда представлены в табл. 6.

Таблица 6

Данные по оптимизации модельного ряда

Класс ВС / год	Тип ВС	Целевая переменная Y , %	Обратная целевая переменная Y_0 , %	Входной временной ряд, X , %	Нормированное, %		
					Y	Y_0	X
Магистральные	Ил-96	90,5	−90,5	90,4	0	0	0,0456
	Ил-96-400	94,6	−94,6	93,1	0,0537353	−0,0537	0,1335
	SSJ100	112,3	−112,3		0,2857143	−0,2857	0,3973
Региональные	SSJ100	127,7	−127,7		0,4875491	−0,4875	0,3973
	Ту-214	117,8	−117,8	101,2	0,3577982	−0,3577	0,3973
	Ил-114	93,3	−93,3	89,0	0,0366972	−0,0366	0
	Ил-114-300	166,8	−166,8	119,7	1	−1	1
2023		114,6	−114,6	100,1	0,3158585	−0,3158	0,3615
2024		115,5	−115,5	102,5	0,327654	−0,3276	0,4397
2025		105,6	−105,6	93,5	0,197903	−0,1979	0,1465

Для каждой из определённых альтернативных форм зависимости показателя темпа серийного производства самолётов складывалась система нормальных уравнений. Уравнения

аппроксимированы методом наименьших квадратов, а система описывает условие минимизации среднего квадратического отклонения реальных значений темпа серийного производства ВС от тех, которые должны быть рассчитаны по разработанной впоследствии математической модели. Это позволит распределить значения неизвестных коэффициентов при соответствующих факторах. Для каждой альтернативной формы производилась проверка качества оценки зависимости показателя темпа серийного производства ВС от коэффициентов их потенциала.

Для обеспечения полноты проводимого многофакторного анализа в модель оптимизации модельного ряда ВС для условий Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока рекомендуется также включать финансовый фактор для определения возможного его отклонения после оптимизации модельного ряда.

Обсуждение результатов исследования

Результаты исследования методом формирования оптимальной линейки ВС через параметрическое моделирование показывают, что кроме оценки технологических возможностей отечественной авиационной промышленности по реализации заданных параметров конструкции, важным является оценка расходов при закупке парка ВС того или иного типа, с учётом стоимости всего жизненного цикла, включающей в себя стоимость поддержания лётной годности. При формировании программ развития авиации Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока и для удовлетворения потребностей единой дальневосточной авиакомпания важным является наличие адекватной информации не только об оценке стоимости ВС, но и прогнозных данных об увеличении цен во временном периоде формирования парка. Эту зависимость можно получить, если предположить, что общие расходы ресурсов в денежном выражении на разработку и подготовку серийного производства самолётов конкретного типа, которые приходятся на одно ВС из расчётной серии (планируемого объёма серийного производства), и расходы на отдельно взятый самолёт в этой серии составляют фактическую цену серийного экземпляра типа.

Применение совокупности указанных подходов позволило рассматривать модель не только с точки зрения общей характеристики отдельного фактора, но и в контексте конкретной системы, процесса, их особенностей и целевого направления. Это позволит вписать в модель оптимизации модельного ряда ВС в условиях Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока третий параметр – ограничение количества типов производимых ВС, обусловленное программой импортозамещения с 2022 года. В то же время, показатель роста количества ВС в парках авиакомпаний считается положительным фактором, поскольку свидетельствует о развитии региональной авиации, увеличении возможностей по расширению маршрутной сети, соответственно и общего показателя транспортной доступности того или иного региона.

Заключение

Предложенный метод формирования оптимальной линейки ВС через параметрическое моделирование для эксплуатации в условиях Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока показывает, что выполнение данной задачи возможно, даже в условиях текущей неопределённости и наложенных ограничений. Необходимым условием для этого является наличие актуальных сведений о производственных возможностях по увеличению количества самолётов и расширению модельного ряда исходя из располагаемых ресурсов отечественной авиационной промышленности.

Особенно значимую роль в проектировании оптимальной линейки, количества и номенклатуры ВС региона играют математические методы моделирования и оптимизации параметров и характеристик ВС или его подсистем на различных стадиях проектирования.

Определено, что для решения задачи формирования парка единой дальневосточной авиакомпании для эксплуатации в районах Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока возможно применять метод формирования оптимальной линейки ВС через параметрическое моделирование на основе представленных разработчиками основных характеристик и параметров создаваемых ВС. Рассмотрены два варианта планируемого парка: до использования математической модели оптимизации и после использования таковой. Установлено, что между отобранными концептами изначального плана количества ВС и принципами оптимизации авиапарка существует взаимозависимость, что позволило на основе полученной модели оптимизации определить потребное оптимальное количество ВС в количестве 45 единиц четырёх типов: Ил-114, SJ100, Ту-214 и Ил-96, которые могут быть использованы как оптимальная линейка ВС при построении сценариев развития парка единой дальневосточной авиакомпании.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

Список источников

1. Горбунов В. П. Основные аспекты создания единой дальневосточной авиакомпании через развитие единой маршрутной сети, флота и лётно-эксплуатационной инфраструктуры дальневосточного региона // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2023. № 2(37). https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_2_44
2. Горбунов В. П. Самолёт и холод. Климатические испытания и эксплуатация воздушных судов в условиях экстремально низких температур Арктики, Сибири и Крайнего Севера. СПб.: Научно-технические технологии, 2023. 712 с.
3. Горбунов В. П. Теплофизическое моделирование при оценке низкотемпературной надёжности воздушных судов с цифровым бортовым комплексом // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2022. № 38. С. 27–41.
4. Горбунов В. П. Метод поддержания лётной годности воздушных судов с бортовым цифровым комплексом в условиях экстремально низких температур: дис. канд. техн. наук. Москва: МГТУ ГА, 2018.
5. Юданова В. В. Оптимизация бизнес-процессов в сфере обслуживания методами имитационного моделирования // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017. № 11. URL: <http://ekoncept.ru/2017/174018.htm>
6. Курмангазиева Л. Т., Оразбаев Б. Б. Разработка математических моделей и оптимизация химико-технологических систем при нечёткости исходной информации: Монография. Академия Естествознания, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://monographies.ru/ru/book/section?id=7633&ysclid=lt8f9rts4f594116110> (дата обращения: 10.12.2023).
7. Мадера А. Г. Интервально стохастическая неопределённость оценок в многокритериальных задачах принятия решений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2014. № 3. С. 105–115. <https://www.elibrary.ru/SMFXGZ>
8. Obuchowski N. A. Multivariate statistical methods. *Am J Roentgenol*, 2005, 185(2), pp. 299–309.
9. Magnello M. Karl Pearson and the Establishment of Mathematical Statistics. *International Statistical Review. Revue Internationale De Statistique*, 2009, pp. 3–29.
10. Dhamodharavadhani S., Rathipriya R. Variable Selection Method for Regression Models Using Computational Intelligence Techniques. *Journal of Management, Technology & Social Science*, 2020, pp. 416–436.

References

1. Gorbunov V. P. The main aspects of creating a single far eastern airline through the development of a single route network, fleet and flight operational infrastructure of the far eastern region. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 2023, no. 2(37). (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_2_44

2. Gorbunov V. P. *Samolyot i kholod. Klimaticheskie ispytaniya i ehkspluatatsiya vozdushnykh sudov v usloviyakh ehkstremał'no nizkikh temperatur Arktiki, Sibiri i Krajnego Severa* [Plane and cold. Climatic tests and operation of aircraft in conditions of extremely low temperatures of the Arctic, Siberia and the Far North]. St. Petersburg, Naukoyomkie tekhnologii Publ., 2023, 712 p. (In Russ.)
3. Gorbunov V. P. Thermal and physical modeling in assessing the low-temperature reliability of aircraft with a digital onboard system. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 38, pp. 27–41. (In Russ.)
4. Gorbunov V. P. Metod podderzhaniya lyotnoj godnosti vozdushnykh sudov s bortovym tsifrovym kompleksom v usloviyakh ehkstremał'no nizkikh temperatur. Cand. Sci.diss. Moscow, MSTU CA Publ., 2018. (In Russ.)
5. Yudanov V. V. Optimizatsiya biznes-protsessov v sfere obsluzhivaniya metodami imitatsionnogo modelirovaniya. *Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal "Kontsept"*, 2017, no. 11, available at: <http://ekoncept.ru/2017/174018.htm> (In Russ.)
6. Kurmangazieva L. T., Orazbaev B. B. *Razrabotka matematicheskikh modelej i optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh sistem pri nechyotkosti iskhodnoj informatsii: Monografiya* [Development of mathematical models and optimization of chemical-technological systems with fuzzy initial information: Monograph]. Academy of Natural History, 2014. [Electronic resource], available at: <https://monographies.ru/ru/book/section?id=7633&ysclid=lt8f9rts4f594116110> (accessed 10.12.2023). (In Russ.)
7. Madera A. G. Interval'no stokhasticheskaya neopredelyonnost' otsenok v mnogokriterial'nykh zadachakh prinyatiya reshenij. *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*, 2014, no. 3, pp. 105–115. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/SMFXGZ>
8. Obuchowski N. A. Multivariate statistical methods. *Am J Roentgenol*, 2005, 185(2), pp. 299–309.
9. Magnello M. Karl Pearson and the Establishment of Mathematical Statistics. *International Statistical Review. Revue Internationale De Statistique*, 2009, pp. 3–29.
10. Dhamodharavadhani S., Rathipriya R. Variable Selection Method for Regression Models Using Computational Intelligence Techniques. *Journal of Management, Technology & Social Science*, 2020, pp. 416–436.

Информация об авторе

Горбунов Владимир Павлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Gorbunov_VP@gosniiga.ru

Author information

Gorbunov Vladimir P., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy General Director, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Gorbunov_VP@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 28.06.2024; принята к публикации 04.07.2024.
The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 28.06.2024; accepted for publication 04.07.2024.

Научная статья

УДК 621.396.969:623.746-519

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПРОСТРАНСТВА ПЕЛЕНГАЦИОННОЙ ПАРОЙ БАРРАЖИРУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е. Г. БОРИСОВ¹, И. И. ГОЦКО¹, О. Г. ПЕТКАУ¹, С. Л. ЧУКАЛИН², И. Н. ШЕСТАКОВ²

¹ НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

³ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен вариант решения задачи определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) парой барражирующих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при реализации согласованного полёта по окружности относительно заданного центра. Предложенное решение основано на обработке разностно-дальномерных измерений в последовательных циклах анализа с дальнейшим расчётом угловых координат и местоположения ИРИ. Предложенное решение может быть полезно в интересах охраны объектов аэропортов для обнаружения несанкционированных ИРИ, выявления использования нелегального оборудования вблизи аэродрома с целью обеспечения безопасности полётов в районе аэродромных схем взлёта и захода на посадку.

Ключевые слова: воздушный транспорт, аэропорт, радиомониторинг, источник радиоизлучения, имитационно-статистическое моделирование, беспилотный летательный аппарат, транспортные системы страны

Для цитирования: Борисов Е. Г., Гоцко И. И., Петкау О. Г., Чукалин С. Л., Шестаков И. Н. Определение местоположения источников радиоизлучения при мониторинге пространства пеленгационной парой барражирующих беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 106–114.

DETERMINING THE LOCATION OF RADIO EMISSION SOURCES DURING MONITORING OF SPACE BY A DIRECTION FINDING PAIR OF LOITERING UNMANNED AERIAL VEHICLES

E. G. BORISOV¹, I. I. GOTSKO¹, O. G. PETKAU¹, S. L. CHUKALIN², I. N. SHESTAKOV³

¹ Research Institute “Vector”, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg State Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

³ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. A variant of solving the problem of determining the location of a radio emission source (RES) by a pair of loitering unmanned aerial vehicles (UAV) in the implementation of coordinated flight along a circle relative to a given center is considered. The proposed solution is based on the accumulation of difference-range measurements in successive analysis cycles with further calculation of angular coordinates and RES. The proposed solution can be useful in the interests of protecting airport facilities from unauthorized entry by RES,

identifying the use of unlicensed equipment near the airfield, ensuring flight safety in the area of airfield take-off and landing patterns through detecting threats of dangerous UAV flights.

Keywords: air transport, airport, radio monitoring, radio source, simulation and statistical modeling, unmanned aerial vehicle, transport systems of the country

For citation: Borisov E. G., Gotsko I. I., Petkau O. G., Chukalin S. L., Shestakov I. N. Determining the location of radio emission sources during monitoring of space by a direction finding pair of loitering unmanned aerial vehicles, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 106–114. (In Russ.)

Введение

В последнее время имеет место устойчивая тенденция к усложнению радиоэлектронной обстановки (РЭО) в транспортных системах страны, что связано с ростом количества разнотипных ИРИ при высокой пространственной плотности их размещения в условиях городской застройки, в том числе и в районах аэропортов. Наряду с зарегистрированными ИРИ там могут находиться нелегализованные радиоэлектронные средства (РЭС), которые могут быть источниками непреднамеренных или специально организованных помех и каналов утечки информации. Под нелегализованными ИРИ будем понимать излучения радиосредств, принадлежащих радиоулиганам и различным незаконным формированиям.

В связи с этим задача радиомониторинга нелегализованных ИРИ является актуальной.

Проблематике радиомониторинга посвящён ряд фундаментальных работ [1, 2], в которых рассмотрены задачи, решаемые с помощью средств радиомониторинга в самых различных областях. Изложены теоретические и практические вопросы построения и функционирования радиотехнических систем радиомониторинга, определения местоположения ИРИ и оценивания параметров сигналов. В работе [3] подчёркивается, что современный аэропорт представляет собой сложноорганизованный механизм, эффективное функционирование которого во многом зависит от надёжной работы радиоэлектронных средств. На работу аэродромного радиоэлектронного оборудования могут оказывать влияние различные источники радиоизлучений и электромагнитных помех естественного или искусственного происхождения, расположенные вблизи аэродрома, которые и подлежат выявлению. Проблематика определения местоположения ИРИ рассмотрена в обширной библиографии. Так в [4] рассмотрена задача многоцелевого трассового сопровождения источников радиоизлучения с использованием однопозиционных систем радиомониторинга воздушного базирования. В [5] рассмотрена постановка задачи разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетевидной авиационной системы мониторинга. В [6] предложен способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием моностатической азимутально-угломерной системы, размещённой на БПЛА вертолётного типа. В работе [7] приведены основные результаты исследования зависимости ошибок определения местоположения источника сигнала разностно-дальномерным методом пассивной локализации от точности измерения взаимного запаздывания сигналов, принятых разнесёнными в пространстве антеннами.

В работе [8] проведён обзор базовых концепций построения современных пассивных и пассивно-активных комплексов локализации в коротковолновой области. В [9] рассмотрены способы определения координат источника радиоизлучения с лётно-подъёмного средства. Предложен вариант повышения точности за счёт более полного учёта пространственной ориентации антенной решётки измерителя и особенностей рельефа местности.

Работа [10] посвящена анализу перспективных методов пассивного определения координат ИРИ, в том числе и с воздушных носителей. В статье [11] описывается метод определения

координат ИРИ при приёме радиосигналов с использованием нелинейных (в том числе круговых) антенных систем произвольной формы, состоящих из слабонаправленных и направленных элементов, размещённых как на земле, так и на БПЛА.

В [12] показана возможность определения координат ИРИ по результатам оценки принимаемой мощности с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Работа [13] посвящена исследованию алгоритма высокоточного определения координат источников радиоизлучения, основанного на совместной обработке разностно-временных и разностно-фазовых измерений сигналов от двух разнесённых приёмников, расположенных на одном БПЛА.

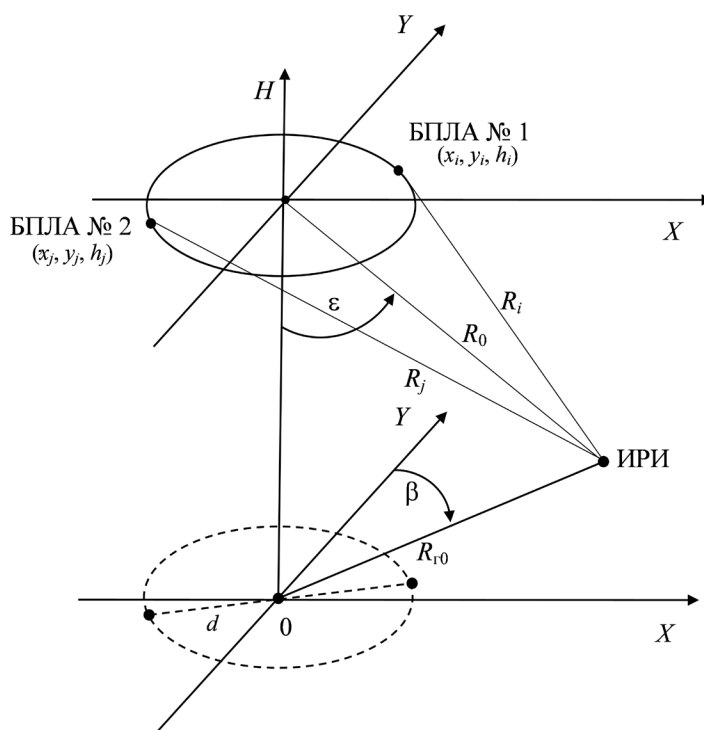
Целью статьи является разработка способа определения угловых координат ИРИ с применением двух БПЛА, осуществляющих полёт по кругу.

Описание способа

Сущность способа заключается в том, что два БПЛА осуществляют программно-управляемый полёт по окружности относительно заданного центра, образуя пеленгационную ячейку. После обнаружения факта наличия ИРИ вычисляются разности расстояний до него при перемещении БПЛА относительно заданного центра. Использование малогабаритных широкополосных ненаправленных антенн небольшой массы позволит осуществить длительное дежурство БПЛА в воздухе. Высокая мобильность БПЛА и относительно простое наращивание кратности таких пеленгационных пар позволит создать требуемую зону радиомониторинга, в том числе и в условиях сложного рельефа местности и плотной городской застройки.

Постановка задачи и решение

Пусть два БПЛА с известными координатами x_i, y_i, h_i и x_j, y_j, h_j совершают полёт по окружности (рисунок) с центром в точке $X_{C0}=0,5(x_i+x_j), Y_{C0}=0,5(y_i+y_j), H_{C0}=0,5(h_i+h_j)$.



Пояснение взаимодействия элементов системы при решении задачи местоопределения ИРИ

Первичными данными для определения местоположения ИРИ являются разности расстояний ΔR_{ij} , которые выразим через прямоугольные координаты ИРИ и БПЛА:

$$\Delta R_{ij} = \sqrt{(X_S - x_i)^2 + (Y_S - y_i)^2 + (H_S - h_i)^2} - \sqrt{(X_S - x_j)^2 + (Y_S - y_j)^2 + (H_S - h_j)^2}, \quad (1)$$

где X_S, Y_S, H_S – координаты ИРИ.

Плоскость XOY лежит в плоскости земли ($H=0$). Точка 0 является проекцией центра окружности барражирования на плоскость XOY . Под центром барражирования понимается некоторая точка на оси H , относительно которой БПЛА описывают окружность.

Представим формулу (1) в следующей форме записи, учитывая, что центр барражирования имеет координаты $X_{C0}=0, Y_{C0}=0$:

$$\Delta R_{ij} = R_0 \sqrt{1 - \frac{2X_S x_i}{R_0^2} - \frac{2Y_S y_i}{R_0^2} - \frac{2H_S h_i}{R_0^2} + \frac{d_i^2}{R_0^2}} - R_0 \sqrt{1 - \frac{2X_S x_j}{R_0^2} - \frac{2Y_S y_j}{R_0^2} - \frac{2H_S h_j}{R_0^2} + \frac{d_j^2}{R_0^2}}, \quad (2)$$

где R_0 – расстояние от центра барражирования БПЛА до ИРИ; $d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + h_i^2}$, $d_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + h_j^2}$ – расстояния от начала координат до соответствующих БПЛА.

Формулу (2) с учётом связи прямоугольных координат со сферическими запишем как

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij} = R_0 \sqrt{1 - \frac{2x_i \sin \varepsilon \sin \beta}{R_0} - \frac{2y_i \sin \varepsilon \cos \beta}{R_0} - \frac{2h_i \cos \varepsilon}{R_0} + \frac{d_i^2}{R_0^2}} - \\ - R_0 \sqrt{1 - \frac{2x_j \sin \varepsilon \sin \beta}{R_0} - \frac{2y_j \sin \varepsilon \cos \beta}{R_0} - \frac{2h_j \cos \varepsilon}{R_0} + \frac{d_j^2}{R_0^2}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где β, ε – азимут и угол места ИРИ относительно центра барражирования.

Разлагая (3) в ряд Тейлора относительно $x_{i(j)}/R_0, y_{i(j)}/R_0$ и $h_{i(j)}/R_0$ и учитывая члены разложения ряда не выше второго, представим (3) как:

$$\Delta R_{ij} \approx \Delta x_{ij} \sin \varepsilon \sin \beta + \Delta y_{ij} \sin \varepsilon \cos \beta + \Delta h_{ij} \cos \varepsilon, \quad (4)$$

где: $\Delta x_{ij} = x_i - x_j, \Delta y_{ij} = y_i - y_j, \Delta h_{ij} = h_i - h_j$.

Можно показать, что при значениях $d_i/R_0 = 0,2$ и менее методическая ошибка в определении разностей расстояний по (1) и (4) составляет доли процента от истинного значения азимута и угла места. Их влияние на точность оценивания угловых координат проявляется во втором-третьем знаке после запятой, чем можно пренебречь для практических вычислений.

При наличии N значений разностей расстояний (4), полученных в различных точках положения БПЛА на окружности, составим систему линейных уравнений, заменяя знак приближённого равенства точным:

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{ij(1)} &= \Delta x_{ij(1)} \sin \varepsilon \sin \beta + \Delta y_{ij(1)} \sin \varepsilon \cos \beta + \Delta h_{ij(1)} \cos \varepsilon, \\ \Delta R_{ij(2)} &= \Delta x_{ij(2)} \sin \varepsilon \sin \beta + \Delta y_{ij(2)} \sin \varepsilon \cos \beta + \Delta h_{ij(2)} \cos \varepsilon, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta R_{ij(n)} &= \Delta x_{ij(n)} \sin \varepsilon \sin \beta + \Delta y_{ij(n)} \sin \varepsilon \cos \beta + \Delta h_{ij(n)} \cos \varepsilon, \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta R_{ij(N)} &= \Delta x_{ij(N)} \sin \varepsilon \sin \beta + \Delta y_{ij(N)} \sin \varepsilon \cos \beta + \Delta h_{ij(N)} \cos \varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Систему уравнений (5) можно свести к матричной форме:

$$Z_{\Delta R} = (A_{\Delta R}^T A_{\Delta R})^{-1} A_{\Delta R}^T B_{\Delta R}, \quad (6)$$

где

$$A_{\Delta R[3 \times N]} = \begin{bmatrix} \Delta x_{ij(1)} & \Delta y_{ij(1)} & \Delta h_{ij(1)} \\ \Delta x_{ij(2)} & \Delta y_{ij(2)} & \Delta h_{ij(2)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta x_{ij(n)} & \Delta y_{ij(n)} & \Delta h_{ij(n)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Delta x_{ij(N)} & \Delta y_{ij(N)} & \Delta h_{ij(N)} \end{bmatrix}, \quad B_{\Delta R[1 \times N]} = \begin{bmatrix} \Delta R_{ij(1)} \\ \Delta R_{ij(2)} \\ \dots \\ \Delta R_{ij(n)} \\ \dots \\ \Delta R_{ij(N)} \end{bmatrix}.$$

Решением (6) МНК относительно неизвестных $Z_{SS} = \sin \varepsilon \sin \beta$, $Z_{SC} = \sin \varepsilon \cos \beta$ и $Z_C = \cos \varepsilon$ будет матрица вида

$$Z_{\Delta R} = \begin{bmatrix} Z_{SS} \\ Z_{SC} \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon \sin \beta \\ \sin \varepsilon \cos \beta \\ \cos \varepsilon \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из (7) можно определить искомые углы:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \arctg \left(\frac{Z_{SS}}{Z_{SC}} \right) + \Psi; \\ \varepsilon &= \arctg \left(\frac{\sqrt{Z_{CS}^2 + Z_{CC}^2}}{Z_C} \right). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В (8) Ψ вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Psi &= 0,5\pi(2 - \text{sgn}(Z_{SS}) - \text{sgn}(Z_{SS})\text{sgn}(Z_{SC})); \\ \text{sgn}(Z) &= \begin{cases} 1, & Z \geq 0; \\ -1, & Z < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Таким образом Ψ принимает значения 0, π или 2π в зависимости от соотношения значений в (7).

При известной высоте H_{C0} центра барражирования пары БПЛА координаты ИРИ определяются как:

$$\left. \begin{aligned} X_S &= H_{C0} \text{tg} \varepsilon \sin \beta; \\ Y_S &= H_{C0} \text{tg} \varepsilon \cos \beta. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Апробация способа

Оценка точности определения угловых координат ИРИ по (8), а его местоположения по (9) производилась путём имитационно-статистического моделирования на высокоуровневом языке программирования Python. Моделирование проводилось для случая пеленгации ИРИ со средней мощностью 40 Вт с центральной несущей частотой 5800 МГц в полосе 8 МГц, средние квадратические ошибки (СКО) определения местоположения БПЛА в пространстве полагались одинаковыми и равными 5 м.

Для моделирования было задействовано 10 точек положения каждого БПЛА на окружности при различных высотах, при количестве циклов моделирования в каждой точке 1000. СКО определения местоположения оценивалась по следующей зависимости $\sigma_{МП} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$, σ_X , σ_Y – СКО определения прямоугольных координат ИРИ. Результаты моделирования приведены в таблице. Из таблицы следует что при увеличении радиуса d окружности, по которой движутся БПЛА, среднеквадратическая ошибка измерения угла азимута σ_β уменьшается. Это вызвано увеличением значений разностей расстояний от ИРИ до антенн БПЛА. Для получения приемлемой для практики точности измерения угла места σ_ϵ необходимо создать измерительную базу по высоте. В таблице приняты следующие обозначения: $R_{Г0}$ – горизонтальная дальность от точки 0 (проекции центра барражирования) до ИРИ, H_1 – высота полёта БПЛА № 1, H_2 – высота полёта БПЛА № 2.

Результаты имитационно-статистического моделирования

$R_{г0}=40000\text{ м}, H_1=4000\text{ м}, H_2=4000\text{ м}$						
$d, \text{ м}$	200	600	1000	2000	3000	6000
$\sigma_{\beta}, ^\circ$	1,26	0,425	0,253	0,123	0,083	0,043
$\sigma_{\varepsilon}, ^\circ$	30,0	29,32	30,8	28,488	29,688	28,78
$\sigma_{МП}, \text{ м}$	Измерение невозможно или недостоверно					
$R_{г0}=40000\text{ м}, H_1=500\text{ м}, H_2=4000\text{ м}$						
$d, \text{ м}$	200	600	1000	2000	3000	6000
$\sigma_{\beta}, ^\circ$	1314	0,43	0,245	0,127	0,084	0,044
$\sigma_{\varepsilon}, ^\circ$	0,122	0,101	0,102	0,102	0,101	0,101
$\sigma_{МП}, \text{ м}$	1792	1303	1290	1288	1258	1250
$R_{г0}=20000\text{ м}, H_1=500\text{ м}, H_2=4000\text{ м}$						
$d, \text{ м}$	200	600	1000	2000	3000	6000
$\sigma_{\beta}, ^\circ$	0,73	0,252	0,152	0,07	0,05	0,026
$\sigma_{\varepsilon}, ^\circ$	0,101	0,066	0,062	0,061	0,061	0,066
$\sigma_{МП}, \text{ м}$	409	227	202	193	190	196

Результаты имитационно-статистического моделирования показали, что точность определения угловых координат и местоположения ИРИ с помощью пары барражирующих БПЛА позволяет оперативно получить данные о наличии и месте несанкционированного ИРИ и передать информацию соответствующим службам во избежание ущерба от его деятельности.

При проведении работ по практическому внедрению в авиационную деятельность предложенного способа следует решить вопросы обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения, которые авторами в настоящей статье не рассматривались. Поэтому перед практическим применением полученных результатов потребуется провести метрологическую экспертизу разработанной в предложенном способе методологии с учётом принципов и критериев, изложенных в [14], а также метрологическую аттестацию этой методологии для оценки числовых значений ошибок с использованием алгоритмов, представленных в [15], в том числе для исключения возникновения метрологических рисков негативных ситуаций.

Заключение

В работе получены аналитические выражения для оригинального способа определения угловых координат и местоположения ИРИ в системе двух БПЛА, совершающих полёт по окружности относительно заданного центра.

Представленный способ выявления ИРИ и определения его местоположения является эффективным и реализуемым для обеспечения безопасности полётов и снижения угроз нарушения штатного функционирования аэропорта. Одним из преимуществ рассмотренного способа является отсутствие избыточных требований к антенным системам, что позволяет для решения рассматриваемой задачи использовать недорогие БПЛА с возможностью длительного барражирования. Используя несколько пар БПЛА, возможно создать многопозиционную систему пассивной локации, позволяющую оценивать координаты ИРИ любым вариантом триангуляционного способа с приемлемой точностью.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. Изд. 2. Москва: Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.
2. Кирсанов Э. А., Сирота А. А. Обработка информации в пространственно-распределённых системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы. Москва: Физматлит, 2012. 344 с.
3. Шестаков А. С. Контроль источников радиоэлектронных излучений в районе аэропорта «Пулково» // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. 2007. № 117. С. 150–153.
4. Белик Б. В., Белов С. Г. Многоцелевое сопровождение источников радиоизлучения в однопозиционной системе радиомониторинга воздушного базирования // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5 [Электронный журнал]. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/3/text.pdf> (дата обращения: 04.03.2024).
5. Архимандритов И. Б., Белов С. Г., Верба В. С., Липатов А. А., Миляков Д. А., Сидоров И. А., Четыркин Д. Ю. Задача разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетевцентрической авиационной системы мониторинга // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. [Электронный журнал]. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.5.5>
6. Ашихмин А. В., Виноградов А. Д., Рембовский А. М., Сладких В. А. Способ однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения с использованием бортового радиопеленгатора беспилотного летательного аппарата вертолётного типа // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 40–57. <http://doi.org/10.24412/2410-9916-2021-4-40-57>
7. Марьев А. А., Маркович И. И., Завтур Е. Е. Исследование погрешностей разностно-дальномерного метода пассивной локации // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Тр. Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 391–395.
8. Ильин Е. М., Климов А. Э., Пашин Н. С., Полубехин А. И., Черевко А. Г., Шумский В. Н. Пассивные локационные системы. Перспективы и решения // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 7–20.
9. Наумов А. С., Елизаров В. В. Определение координат источника радиоизлучения при пеленговании с лётно-подъёмного средства // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 7. С. 56–61.
10. Южаков В. В. Современные методы определения местоположения источников электромагнитного излучения // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 8. С. 67–79.
11. Грешилов А. А. Определение координат источника радиоизлучения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 12 [Электронный ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1156.html> (дата обращения: 04.03.2024).

12. Евдокимов Ю. Ф., Медведев В. П. Амплитудный способ определения местоположения источников излучения с использованием метода наименьших квадратов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. 2003. № 3(32). С. 155–157.
13. Потапова Т. П., Топорков Н. В., Шабатура Ю. М. Алгоритм определения координат источников радиоизлучения с летательного аппарата на основе фазово-временной сигнальной информации от двух приёмных модулей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 1. С. 52–61.
14. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Об опыте проведения метрологической экспертизы технической документации на авиационную технику: критерии, методология, результаты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14(325). С. 40–55.
15. Богоявленский А. А. Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31–41.

References

1. Rembovskij A. M., Ashikhmin A. V., Koz'min V. A. *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring: tasks, methods, tools]. Ed. 2. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2010, 624 p. (In Russ.)
2. Kirsanov Eh. A., Sirota A. A. *Obrabotka informatsii v prostranstveno-raspredelyonnykh sistemakh radiomonitoringa: statisticheskij i nejrosetevoj podkhody* [Information processing in spatially distributed radio monitoring systems: statistical and neural network approaches]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 344 p. (In Russ.)
3. Shestakov A. S. The control of sources of radio-electronic emission in area of airport “Pulkovo”. *Civil Aviation High Technologies*, 2007, no. 117, pp. 150–153. (In Russ.)
4. Belik B. V., Belov S. G. Mnogotselevoe soprovozhdenie istochnikov radioizlucheniya v odnopozitsionnoj sisteme radiomonitoringa vozdušnogo bazirovaniya. *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, no. 5 [Electronic journal], available at: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/3/text.pdf> (accessed: 04.03.2024). (In Russ.)
5. Arkhimandritov I. B., Belov S. G., Verba V. S., Lipatov A. A., Milyakov D. A., Sidorov I. A., Chetyrkin D. Yu. Zadacha razrabotki modeli tsifrovoj platform sbora, obrabotki i rasprostraneniya prostranstvennykh dannykh, postroennoj s ispol'zovaniem setetsentricheskoj aviatsionnoj sistemy monitoring. *Zhurnal radioelektroniki*, 2018, no. 5 [Electronic journal]. (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.5.5>
6. Ashikhmin A. V., Vinogradov A. D., Rembovskij A. M., Sladkikh V. A. Method for single-position positioning of radio emission sources using an on-board radio direction finder of an unmanned aerial vehicle of a helicopter type. *Systems of Control, Communications and Security*, 2021, no. 4, pp. 40–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2410-9916-2021-4-40-57>
7. Mar'ev A. A., Markovich I. I., Zavtur E. E. Issledovanie pogreshnostej raznostno-dal'nomernogo metoda passivnoj lokatsii. *Proceedings of the international scientific conference “Radiation and scattering of electromagnetic waves”*. Rostov-on-Don, YuFU Publ., 2015, pp. 391–395. (In Russ.)
8. Il'yin E. M., Klimov A. E., Pashchin N. S., Polubekhin A. I., Cherevko A. G., Shumskiy V. N. Passive location systems. Perspectives and solutions, *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*, 2015, no. 2, pp. 7–20. (In Russ.)
9. Naumov A. S., Elisarov V. V. The position measurement of a radio emission source when it's direction finding from a flying-lifting vehicle. *Achievements of Modern Radio electronics*, 2015, no. 7, pp. 56–61. (In Russ.)
10. Yuzhakov V. V. Sovremennye metody opredeleniya mestopolozheniya istochnikov ehlektromagnitnogo izlucheniya. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1987, no. 8, pp. 67–79. (In Russ.)
11. Greshilov A. A. The method of determining the coordinates of the radio source. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, Issue 12 [Electronic resource], available at: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1156.html> (accessed: 04.03.2024). (In Russ.)

12. Evdokimov Yu. F., Medvedev V. P. Amplitudnyj sposob opredeleniya mestopolozheniya istochnikov izlucheniya s ispol'zovaniem metoda naimen'shikh kvadratov. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2003, no. 3(32), pp.155–157. (In Russ.)

13. Potapova T. P., Toporkov N. V., Shabatura Yu. M. Algoritm opredeleniya koordinat istochnikov radioizlucheniya s letatel'nogo apparata na osnove fazovo-vremennoj signal'noj informatsii ot dvukh priyomnykh module. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering, Metrology, Information-Measuring Instruments and Systems*, 2010, no. 1, pp. 52–61. (In Russ.)

14. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. About the experience of conducting metrological examination of technical documentation for aircraft: criteria, methodology and results. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 14(325), pp. 40–55. (In Russ.)

15. Bogoyavlenskiy A. A. Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated systems for diagnostics airborne equipment of aircraft. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 37, pp. 31–41. (In Russ.)

Информация об авторах

Борисов Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника научно-технического центра по научной работе, НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия, nii@nii-vektor.ru

Гоцко Иван Иванович, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия, goiw@ya.ru

Петкау Олег Гергардович, кандидат технических наук, доцент, советник генерального директора, НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия, nii@nii-vektor.ru

Чукалин Сергей Львович, начальник лаборатории, НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия, nii@nii-vektor.ru

Шестаков Иван Николаевич, доктор технических наук, доцент, учёный секретарь, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shestakovin@gosniiga.ru

Authors information

Borisov Evgeniy G., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Scientific and Technical Center for Scientific Work, Research Institute “Vector”, Saint Petersburg, Russia, nii@nii-vektor.ru

Gotsko Ivan I., Postgraduate Student, Saint Petersburg State Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia, goiw@ya.ru

Petkau Oleg G., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Advisor to Director General, Research Institute “Vector”, Saint Petersburg, Russia, nii@nii-vektor.ru

Chukalin Sergei L., Head of Laboratory, Research Institute “Vector”, Saint Petersburg, Russia, nii@nii-vektor.ru

Shestakov Ivan N., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shestakovin@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 13.06.2024; принята к публикации 20.06.2024.

The article was submitted 04.04.2024; approved after reviewing 13.06.2024; accepted for publication 20.06.2024.

Научная статья

УДК 656.7.022.9:656.7.025

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ АВИАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ РЕГИОНОВ РОССИИ

А. А. ФРИДЛЯНД¹, М. М. ГЯЗОВА², В. А. МЕЛАНИН¹

¹ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы совершенствования развития авиатранспортной системы Российской Федерации на основе разработки и внедрения алгоритмов оценки и планирования роста авиационной транспортной доступности (АТД) регионов Российской Федерации. Планирование развития аэропортовой и маршрутной сети региона (субъекта Российской Федерации, федерального округа) и обоснование принимаемых на перспективу решений возможно на основе оценки как основных региональных факторов (рост перевозок, сроки окупаемости инвестиций), так и факторов, влияющих на формирование и обеспечение авиационной транспортной доступности и качества её обеспечения. В статье представлен разработанный алгоритм определения уровня АТД и качества её обеспечения. Предлагается использовать показатели АТД региона для повышения комплексности оценки предлагаемых проектов развития аэропортовых и маршрутных сетей.

Ключевые слова: воздушный транспорт, авиационная транспортная доступность, маршрутная сеть, транспортные системы страны, воздушное судно, аэропорт, пассажиропоток

Для цитирования: Фридлянд А. А., Гязова М. М., Меланин В. А. Алгоритм оценки авиационной транспортной доступности регионов России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 115–122.

AN ALGORITHM FOR ASSESSING THE AVIATION TRANSPORT ACCESSIBILITY OF RUSSIAN REGIONS

A. A. FRIDLYAND¹, M. M. GYAZOVA², V. A. MELANIN¹

¹ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The issues of improving the development of the air transport system of the Russian Federation based on the development and implementation of algorithms, assessment and planning of the growth of aviation transport accessibility of the regions of the Russian Federation are considered. Planning for the development of the airport and route network of the region (a subject of the Russian Federation, the federal District) and justification of decisions taken in the future is possible based on an assessment of both the main factors (growth in traffic, payback periods for investments) and factors influencing the formation and provision of aviation transport accessibility and the quality of its provision. The article presents the developed algorithm for determining the level of aviation transport accessibility and the quality of its provision. It is proposed to use the administrative divisions of the regions to increase the complexity of the assessment of proposed projects for the development of airport and route networks.

Keywords: air transport, aviation transport accessibility, route network, transport systems of the country, aircraft, airport, passenger traffic

For citation: Fridlyand A. A., Gyazova M. M., Melanin V. A. An algorithm for assessing the aviation transport accessibility of Russian regions, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 115–122. (In Russ.)

Введение

Транспортная доступность города, населённого пункта и региона по отношению к основным центрам формирования и роста пассажиропотоков, обеспеченность обслуживания населения и бизнеса различными видами транспорта являются одними из важнейших факторов, предопределяющих развитие городов, населённых пунктов и регионов [1].

Повышение транспортной доступности обозначено как одна из приоритетных целей в Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (далее – ТС 2035)¹, Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года², целевых программах развития транспортных систем страны и прочих стратегических документах федерального и регионального уровней.

В ТС 2035 транспортная доступность (далее будем использовать её компоненту – авиационную транспортную доступность или АТД) указана как оценка возможности достижения территории из определённой точки или другого региона при помощи транспорта, определяемая временем в пути.

Количественное определение АТД и формализованный подход к её оценке имеют практическую значимость при организации управления развитием транспортных систем, так как наличие АТД создает необходимые предпосылки для развития регионов и повышения качества жизни населения [2].

Терминология и постановка задачи формализованной оценки авиационной транспортной доступности

Пространственная организация общества состоит из блоков: размещения производительных сил (населения) и операторов различных взаимодействий (транспорт и телекоммуникации). Ключевым фактором обеспечения эффективных взаимодействий является наличие транспортной доступности, которая создаёт возможности для физических перемещений.

Транспортная доступность оказывает влияние на основные характеристики развития общества и может рассматриваться по отношению к транспортному комплексу как отраслевой показатель – фактор, влияющий на подвижность населения, в соответствии с его потребностями [3].

В ТС 2035 в числе требований к характеристикам перевозки как предоставляемой потребителям услуги указано время совершения поездки. Поэтому возможности и время транспортировки пассажира или груза воздушным транспортом из какого-либо рассматриваемого места расположения на авиационной транспортной сети страны или региона до необходимых мест назначения (то есть АТД) могут оцениваться продолжительностью поездки (средними затратами времени в часах) в эконом-классе из рассматриваемого населённого пункта в ближайший от него крупный международный авиационный узел, из которого далее он сможет достигнуть любого желаемого места назначения. Для того, чтобы крупный узел мог предоставлять потребителю развитую маршрутную сеть, он должен иметь статус международного – тогда пассажир сам выберет внутренний или международный авиационный маршрут ему нужен.

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р) [Электронный ресурс]. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577>

² Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72074066>

Количественная оценка АТД характеризует удобство транспортно-географического положения любого города, населённого пункта или региона для населения в условиях существующей или перспективной авиационной маршрутной сети. При этом оценку АТД определяют географические характеристики территории (конфигурация сети населённых пунктов региона по расстоянию между ними, наличие либо отсутствие наземного транспортного сообщения) и технологические особенности авиационной транспортной инфраструктуры региона, которые носят долговременный стратегический характер (в том числе наличие аэропортов, аэродромов и посадочных площадок, типы эксплуатируемых воздушных судов (ВС)), а также конфигурация его маршрутной сети и действующее расписание рейсов, которые могут оперативно меняться (например, при снижении частоты авиарейсов среднее время перемещения до ближайшего крупного международного авиаузла будет увеличиваться, тем самым снижая потенциально достижимую АТД населённого пункта или региона). Далее будем использовать зависящий от авиарасписания показатель качества обеспечения (КО) АТД – как количественный показатель, отражающий изменение показателя доступности при дополнительных потерях времени потребителем из-за низкой частоты рейсов и/или при росте интервалов между рейсами.

На основании количественной оценки АТД и КО населённые пункты предлагается в дальнейшем разделить на зоны, характеризующиеся высокой, средней, удовлетворительной и неудовлетворительной транспортной доступностью.

Связанность населённых пунктов или регионов – совокупная оценка АТД и КО для населения или бизнеса в городах, населённых пунктах или регионах, которая зависит от структуры построения, характеристик маршрутной сети и предусмотренной расписанием частоты рейсов. Проблема обеспечения транспортной связанности страны, приемлемого качества транспортного обслуживания территории и населения стоит в России чрезвычайно остро [4]. Отдалённые, труднодоступные и малонаселённые регионы (ОТДМР) занимают около 2/3 территории страны. Они характеризуются малой плотностью населения – порядка 1 человека на км² и менее, а также сложными природно-климатическими условиями, большой протяжённостью – достаточно взглянуть на прибрежные территории вдоль Севморпути – и удалённостью от относительно густонаселённых регионов страны. В основном ОТДМР находятся в Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах, в районах Крайнего Севера или приравненных к ним местностях. Однако такие регионы встречаются и в европейской части России (например, в Северо-Западном федеральном округе). Важнейшая роль в освоении и развитии ОТДМР принадлежит воздушному транспорту.

Имеется ряд подходов к оценке транспортной доступности на уровне конкретных регионов [5–7], в рамках которых введены такие понятия, как «транспортный фокус территории», «коэффициент наличия видов транспорта», «коэффициент резерва конфигурации транспортной сети». Данные показатели не учитывают фактическое время в пути из точки А в точку Б, кроме того, доступность оценивается только по отдельным видам транспорта, а не по их совокупности.

Математические модели оценки авиационной транспортной доступности

С учётом специфики воздушного транспорта для количественной оценки показателей АТД населённого пункта, обеспеченного авиационным транспортным сообщением, авторами предлагаются излагаемые далее математические модели.

При беспересадочном (прямом) рейсе до ближайшего крупного узлового международного аэропорта АТД населённого пункта рассчитывается следующим образом:

$$АТД = T_1 + T_2 + T_3, \quad (1)$$

где T_1 – время на поездку до ближайшего аэропорта и регистрацию, ч; T_2 – время полёта до ближайшего крупного узлового международного аэропорта (ч);

$$T_2 = \frac{P_0}{C_{кр0}} + T_{вп0},$$

где P_0 – протяжённость маршрута полёта, км; $C_{кр0}$ – крейсерская скорость ВС, км/ч; $T_{вп0}$ – дополнительное время на набор высоты и снижение ВС, ч; T_3 – время на получение багажа и доставку пассажира наземным транспортом по месту назначения, ч.

При рассмотрении полёта с пересадкой в ближайшем узловом аэропорту с целью последующего перемещения в крупный узловой международный аэропорт АТД рассчитывается следующим образом:

$$АТД = T_1 + T_4 + T_5 + T_6 + T_3, \quad (2)$$

где T_4 – время на поездку до ближайшего аэропорта и регистрацию, ч:

$$T_4 = \frac{P_1}{C_{кр1}} + T_{вп1},$$

где P_1 – протяжённость маршрута полёта (до пересадочного узла), км; $C_{кр1}$ – крейсерская скорость ВС на этом маршруте, км/ч; $T_{вп1}$ – дополнительное время на набор высоты и снижение ВС, ч; T_5 – принятое расчётное время ожидания стыковочного рейса при составном (пересадочном) маршруте, ч; T_6 – время полёта до ближайшего крупного узлового международного аэропорта (ч):

$$T_6 = \frac{P_2}{C_{кр2}} + T_{вп2},$$

где P_2 – протяжённость маршрута полёта (после пересадочного узла), км; $C_{кр2}$ – крейсерская скорость ВС на этом маршруте, км/ч; $T_{вп2}$ – дополнительное время на набор высоты и снижение ВС, ч.

При расчётах по формулам (1), (2) используются следующие средние значения:

$$T_1 = 2,25 \text{ ч};$$

$$T_3 = 1,25 \text{ ч};$$

$$T_5 = 3 \text{ ч};$$

$$T_{вп} = 0,50 \text{ ч при протяжённости маршрута } P < 1200 \text{ км};$$

$$T_{вп} = 0,65 \text{ ч при } P \geq 1200 \text{ км};$$

$$C_{кр} = 250 \text{ км/ч при полётах на местных воздушных линиях протяжённостью } P < 500 \text{ км};$$

$$C_{кр} = 500 \text{ км/ч при полётах на местных и региональных воздушных линиях протяжённостью } 500 \leq P < 1200 \text{ км};$$

$$C_{кр} = 840 \text{ км/ч при полётах на средне- и дальнемагистральных воздушных линиях протяжённостью } P \geq 1200 \text{ км}.$$

При беспересадочном (прямом) рейсе (маршруте) до ближайшего крупного узлового международного аэропорта показатель КО рассчитывается следующим образом:

$$КО = \frac{12}{R},$$

где R – среднее число рейсов в сутки по маршруту.

При рассмотрении полёта с пересадкой в ближайшем узловом аэропорту с целью последующего перемещения в крупный узловой международный аэропорт показатель КО рассчитывается следующим образом:

$$КО = \frac{12}{R_1} + T_5 + \frac{12}{R_2} - 3,$$

где R_1, R_2 – среднее число рейсов в сутки на маршрутах до и после пересадочного узла соответственно.

Для сравнительной оценки уровня АТД и качества её обеспечения авторами предложено и апробировано использование метода экспертной оценки для установления граничных значений показателей АТД и КО, характеризующих различные их уровни.

По результатам сравнительного анализа проведено ранжирование показателей АТД и КО по следующему алгоритму: массив значений каждого рассматриваемого показателя разделяется на две группы величиной среднего значения (на группу «лучше» среднего значения и группу «хуже» среднего значения), после чего в каждой из двух групп находятся свои средние, которые разделяют, в свою очередь, каждую из групп на две. В итоге получим следующие группы показателей:

- I – лучшая половина из группы «лучше» среднего значения;
- II – худшая половина из группы «лучше» среднего значения;
- III – лучшая половина из группы «хуже» среднего значения;
- IV – худшая половина из группы «хуже» среднего значения.

В итоге граница между группами I и II отделяет высокие значения показателя от средних, граница между группами III и IV отделяет удовлетворительные значения показателя от неудовлетворительных, а среднее значение показателя в объединённой группе II+III отделяет средние значения показателя от удовлетворительных (табл. 1, 2).

Таблица 1

Оценка АТД

Оценка уровня АТД (населённого пункта, региона)	Границы оценки АТД, ч	Диапазоны границ оценки АТД
Высокий	$\leq 4,96$	$(\leq 4,96 \text{ ч})$
Средний	$\leq 6,00$	$(> 4,96 \text{ ч и } 6,00 \text{ ч})$
Удовлетворительный	$\leq 8,80$	$(> 6,00 \text{ ч и } \leq 8,80 \text{ ч})$
Неудовлетворительный	$> 8,80$	$(> 8,80 \text{ ч})$

Таблица 2

Оценка КО

Оценка КО населённого пункта, региона	Границы оценки КО, ч	Диапазоны границ оценки КО
Высокое	$\leq 10,04$	$(\leq 10,04 \text{ ч})$
Среднее	$\leq 31,72$	$(> 10,04 \text{ ч и } \leq 31,72 \text{ ч})$
Удовлетворительное	$\leq 67,71$	$(> 31,72 \text{ ч и } \leq 67,71 \text{ ч})$
Неудовлетворительное	$> 67,71$	$(> 67,71 \text{ ч})$

При оценке КО АТД в ситуации, когда из-за малой частоты авиарейсов КО получает низкую оценку, возможность добраться до ближайшего крупного узлового международного аэропорта, используя железнодорожный транспорт, может существенно улучшить данный показатель. Расчёт при этом производится по следующей формуле:

$$КО = \frac{12}{R_3} + \Delta T,$$

где R_3 – среднее число рейсов в сутки на маршруте железнодорожного транспорта; ΔT – увеличение времени поездки до ближайшего крупного узлового международного аэропорта при замене полёта воздушным транспортом поездкой по железной дороге, ч.

Далее по данным отраслевой статистики из числа крупных узловых международных аэропортов выбираются несколько крупных в каждом из федеральных округов (не более 4, так как наибольшая концентрация крупных аэропортов имеет место в центре европейской части России – аэропорты Шереметьево, Домодедово, Внуково и Жуковский, т. е. 4), обслуживавших пассажиропотоки свыше 1,5 млн пассажиров в предковидном, максимальном по объёму авиaperевозок 2019 году и имеющих не менее 5 регулярных международных маршрутов. В результате по вышеперечисленным условиям авторами были выбраны 19 крупных международных аэропортов, соответствующих установленным выше критериям по объёмам перевозок и существующим маршрутным сетям на международных воздушных линиях, охватывающим в совокупности территории всех федеральных округов: Москва (Шереметьево, Домодедово, Внуково, Жуковский), Санкт-Петербург (Пулково), Сочи, Новосибирск (Толмачево), Екатеринбург (Кольцово), Краснодар (Пашковский), Уфа, Казань, Владивосток, Ростов-на-Дону, Самара, Минеральные Воды, Красноярск, Иркутск, Калининград, Хабаровск.

Далее производятся расчёты времени в пути из каждого действующего аэропорта существующей сети авиамаршрутов до ближайшего крупного узлового международного аэропорта федерального округа при использовании прямого маршрута или, при его отсутствии, с использованием пересадки в промежуточных узловых аэропортах.

Когда прямые рейсы между рассматриваемыми городами отсутствуют, необходимо построение сложного маршрута: комбинации двух или трёх рейсов на воздушном транспорте.

При оценке показателей АТД время поездки по маршрутам, по которым нет регулярного авиационного сообщения, увеличивается на время поездки наземным или водным транспортом до ближайшего аэропорта.

Заключение

Предлагается при планировании развития аэропортовой и маршрутной сети региона (субъекта Российской Федерации, федерального округа) и обосновании принимаемых на перспективу решений, в дополнение к традиционным показателям (рост перевозок, сроки окупаемости инвестиций) использовать АТД региона для повышения комплексности оценки предлагаемых проектов. Показатели АТД регионов формируются путём определения средних взвешенных значений их отдельных составляющих территорий («взвешивание» – пропорционально численности населения указанных территорий), с учётом расположения населённых пунктов.

Если в районе какого-то города отсутствует действующий аэропорт, к маршрутному времени при оценке АТД, определяемому по формулам (1) или (2), добавляется время поездки наземным или водным транспортом до ближайшего действующего аэропорта.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Кузнецова О. В. Региональная политика России: 20 лет реформ и новые возможности. Изд. 3. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ» (URSS), 2017. 392 с.
2. Бугроменко В. Н. Транспортная составляющая пространственной организации общества // Теория социально-экономической географии: современное состояние и перспективы развития: Материалы Международной научной конференции / Под ред. А. Г. Дружинина, В. Е. Шувалова. 2010. С. 209–214.
3. Лавриненко П. А., Ромашина А. А., Степанов П. С., Чистяков П. А. Транспортная доступность как индикатор развития региона // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6. С. 136–146.
4. Дутов А. В., Клочков В. В., Рождественская С. М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и её регионов // Россия: тенденции и перспективы

развития: Ежегодник / Отв. ред. В. И. Герасимов. Москва: Институт научной информации по общественным наукам РАН, Отдел научного сотрудничества. 2019. С. 43–48.

5. Бугроменко В. Н. Транспорт в территориальных системах. Москва: Наука, 1987. 112 с.

6. Гольц Г. А. Закономерности дальности внутрирегиональных и межрегиональных транспортных связей // География и хозяйство, Вып. № 2. Территориальные транспортные системы (Сборник научных трудов). Ленинград: ГО СССР, 1988. С. 12–22.

7. Иванов М. В. К вопросу о теории транспортной доступности // Организационные и экономические проблемы развития предприятий транспортной отрасли: Материалы Седьмых Прохоровских чтений. Нижний Новгород: Литера, 2011. С. 115–117.

References

1. Kuznetsova O. V. *Regional'naya politika Rossii: 20 let reform i novye vozmozhnosti [Russia's regional policy: 20 years of reforms and new opportunities]*. Ed. 3. Moscow, Knizhnyj dom "LIBROKOM" (URSS) Publ., 2017, 392 p. (In Russ.)

2. Bugromenko V. N. *Transportnaya sostavlyayushchaya prostranstvennoj organizatsii obshchestva. Theory of socio-economic geography: current state and development prospects. Materials of the International scientific conference*. Ed. A. G. Druzhinin, V. E. Shuvalov, 2010, pp. 209–214. (In Russ.)

3. Lavrinenko P. A., Romashina A. A., Stepanov P. S., Chistyakov P. A. *Transportnaya dostupnost' kak indikator razvitiya regiona. Problems of Forecasting*, 2019, no. 6, pp. 136–146. (In Russ.)

4. Dutov A. V., Klochkov V. V., Rozhdestvenskaya S. M. *Izmerenie i normirovanie transportnoj svyazanosti i kachestva transportnogo obsluzhivaniya strany i eyo regionov. Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya. Ezhegodnik*. Ed. V. I. Gerasimov, Moscow, Institut nauchnoj informatsii po obshchestvennym naukam RAN, Otdel nauchnogo sotrudnichestva, 2019, pp. 43–48. (In Russ.)

5. Bugromenko V. N. *Transport v territorial'nykh sistemakh [Transport in territorial systems]*. Moscow, Nauka Publ., 1987, 112 p. (In Russ.)

6. Gol'ts G. A. *Zakonomernosti dal'nosti vnutriregional'nykh i mezregional'nykh transportnykh svyazey. Geography and Economy, Issue no. 2. Territorial transport systems*. Moscow, IG AN Publ., 1988, pp. 12–22. (In Russ.)

7. Ivanov M. V. *K voprosu o teorii transportnoj dostupnosti. Organizatsionnye i ehkonomicheskie problemy razvitiya predpriyatij transportnoj otrasli. Materialy Sed'mykh Prokhorovskikh chtenij*. Nizhny Novgorod, Litera Publ., 2011, pp. 115–117. (In Russ.)

Информация об авторах

Фридлянд Александр Абрамович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, info@aeroprogress.ru

Гязова Марина Мухарбиевна, доктор экономических наук, доцент кафедры «Инновационная экономика, финансы и управление проектами», Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), mgyazova@gmail.com

Меланин Владимир Александрович, кандидат экономических наук, доцент, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, v.melanin@yandex.ru

Authors information

Fridlyand Aleksandr A., Doctor of Sciences (Economics), Candidate of Sciences (Engineering), Professor, Director of the Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, info@aeroprogress.ru

Gyazova Marina M., Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor of the Department of Innovative Economics, Finance and Project Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), mgyazova@gmail.com

Melanin Vladimir A., Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Deputy Director of the Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, v.melanin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена после рецензирования 27.05.2024; принята к публикации 01.06.2024.

The article was submitted 15.03.2024; approved after reviewing 27.05.2024; accepted for publication 01.06.2024.

Научная статья
УДК 351.814.2:656.71

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КАК ОСНОВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭРОПОРТА

(публикуется в рамках молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

Т. Г. УЛАСЮК, Б. Р. МЕДЕТБЕКОВ

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева,
Ульяновск, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы применения методов морфологического синтеза (МС) для решения актуальных задач своевременного выявления уязвимых элементов системы обеспечения транспортной безопасности применительно к структуре аэропорта. Показано, что МС, в отличие от методов структурного и параметрического синтеза, в любой предметной области играет ключевую роль в прогнозировании развития тех или иных негативных явлений на основе выявленных фактов нарушения установленных правил, в частности, правил транспортной безопасности. При этом прогнозирующая роль методов МС опирается на использование вычислительных средств в формате искусственного интеллекта, ежегодно демонстрирующих очевидный прирост в производительности и точности получаемых финальных результатов вычислений. Обосновано, что развитие средств МС представляет актуальную задачу, которая является приоритетной относительно методов структурного и параметрического синтеза. В связи с использованием в системе обеспечения авиационной безопасности (ОАБ) человеко-машинных систем управления получает дальнейшее развитие понятие морфологического множества, первоначально введённого швейцарским астрономом Ф. Цвикки в 30-е годы XX века для развития чисто технических и технологических концепций.

Ключевые слова: авиационная безопасность, технология акта незаконного вмешательства, концептуальная модель, семантическая модель, угроза, уязвимость, транспортные системы страны

Для цитирования: Уласюк Т. Г., Медетбеков Б. Р. Морфологический синтез как основа совершенствования системы обеспечения транспортной безопасности аэропорта // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 123–130.

MORPHOLOGICAL SYNTHESIS AS A BASIS FOR IMPROVING THE AIRPORT TRANSPORT SECURITY SYSTEM

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin
of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

T. G. ULASYUK, B. R. MEDETBEKOV

Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

Abstract. The article discusses the application of morphological synthesis (MS) methods to solve urgent problems of timely identification of vulnerable elements of the transport security system in relation

to the airport structure. It is shown that MS, unlike methods of structural and parametric synthesis in any subject area, plays a key role in predicting the development of certain negative phenomena based on identified violations of established rules, in particular transport safety rules, new scientific information from various fields of knowledge and experience in the application of automated safety management systems. At the same time, the predictive role of MS methods is based on the unconditional use of computing tools in the format of artificial intelligence, which every year receive an unconditional increase in productivity and accuracy of the final calculation results obtained. On this basis, it is proved that the development of MS tools is an urgent task, which turns out to be a priority with respect to methods of structural and parametric synthesis. In connection with the use of human-machine control systems in the aviation security system, the concept of a morphological set, introduced earlier for the development of purely technical and technological concepts, is being further developed.

Keywords: aviation security, technology of an act of unlawful interference, conceptual model, semantic model, threat, vulnerability, transport systems of the country

For citation: Ulasjuk T. G., Medetbekov B. R. Morphological synthesis as a basis for improving the airport transport security system, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 123–130. (In Russ.)

Введение

Определённым прообразом системы морфологического синтеза (МС) явилась стратегическая сессия, проведённая 24.01.2024 на базе Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). Организаторами сессии явились Департамент развития технологического предпринимательства и трансфера технологий Минобрнауки России совместно с Фондом поддержки проектов Национальной технологической инициативы в рамках реализации федерального проекта «Перспективные технологии для беспилотных авиационных систем (БАС)» национального проекта «Беспилотные авиационные системы» государственной программы «Научно-технологическое развитие России»¹. Участниками сессии стали представители отечественных технических вузов.

В ходе сессии рассмотрены вопросы развития перспективных технологий для беспилотных авиационных систем (БАС), среди которых выделялись: технологии компоновки и принципы движения БАС; энергетические и силовые установки; технологии навигации, радионавигации; технологии, методы и средства связи; технологии технического зрения для БАС, новые технологии производства и новые материалы группового взаимодействия для БАС; технологии интеграции БАС в единое воздушное пространство; фотонные интегральные информационные системы.

Указанные направления в обобщённой форме определяют состав морфологического множества $\{M\}$, из которого необходимо по составу определённой целевой функции выделить сочетания предметных областей, приводящих к новым неизвестным ранее решениям. Система обеспечения транспортной безопасности аэропорта также включает в себя различные компоненты, такие как технические средства обеспечения безопасности, информационные и цифровые системы, процедуры обучения и тренировки персонала, управленческие методы. Целью морфологического синтеза является поиск нового решения в процессе совместного функционирования выбранных компонентов, входящих во множество $\{M\}$ для обеспечения эффективной и максимально безопасной работы системы [1–3]. Например, использование новых материалов в целях снижения радиолокационной заметности БАС или минимизация их размеров, решающие подобную задачу. Объединение указанных свойств БАС может быть использовано для деструктивных воздействий на систему обеспечения авиационной безопасности (ОАБ). Следовательно, выбранная целевая

¹ Распоряжение Минобрнауки России от 19.01.2024 № МН-14/30.

функция $F\{X, Y\}$, где $\{X\}$ – множество средств ОАБ, а $\{Y\}$ – условия их применения, будет носить с точки зрения ОАБ двоякий характер: с одной стороны, например, решается задача эффективного использования БАС для решения контроля периметра аэропорта, с другой стороны, эти же свойства могут быть использованы злоумышленником для достижения совсем противоположных целей. Тогда целевая функция $F\{X, Y\}$, с точки зрения ОАБ, носит отрицательный характер. Предвидение подобных событий службой ОАБ позволяет исключить фактор внезапности при проявлении воздействий на систему аэропорта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) минимальных размеров, которые неоднозначно определяются радиолокационными средствами, что может использоваться для достижения деструктивных воздействий на систему ОАБ аэропорта. Таким образом, МС системы ОАБ – сложный многоуровневый процесс, включающий процедуру выделения множества $\{M\}$, морфологический анализ и последующий морфологический синтез выделенных элементов из $\{M\}$ [4].

Целью статьи является описание принципов МС как основы опережающего совершенствования транспортной безопасности на базе прогнозирования высоковероятных негативных воздействий на систему ОАБ аэропорта.

Особенности системы обеспечения транспортной безопасности аэропорта

Главной целью системы безопасности является обеспечение устойчивого функционирования объекта и предотвращение угроз, защита от противоправных посягательств, охрана жизни и здоровья пассажиров и персонала, недопущение хищения и уничтожения имущества и ценностей, разглашения, утраты, утечки, искажения и уничтожения служебной информации, нарушения работы технических средств.

Среди задач системы безопасности можно выделить: прогнозирование, своевременное выявление и устранение угроз безопасности; создание и поддержание в готовности систем ограниченного доступа; отнесение ресурсов аэропорта к различным уровням опасности; предотвращение утечки информации, а также несанкционированного уничтожения, искажения, копирования, блокирования информации в системах информатизации; создание и поддержание в полной дееспособности механизма оперативного реагирования на угрозы безопасности объекта [5].

Процессы, направленные на поиск уязвимых мест, угроз и рисков потенциального несанкционированного проникновения злоумышленников называются анализом уязвимостей. Если в результате такого анализа выявлены слабые места, это негативно сказывается на работе всего объекта, так как он становится менее защищённым перед недобросовестными конкурентами, что может привести к раскрытию конфиденциальной информации, а также нанесению вреда системам. Источниками угроз могут выступать случайные факторы, а также преднамеренные попытки нанесения вреда объекту. Одним из способов противоборства угрозам в адрес системы безопасности авиапредприятия могут выступать методы морфологического поиска. Суть этих методов заключается в изучении поставленного вопроса в два основных этапа – проведение анализа существующих на данный момент особенностей (сбор текущей информации об объекте изучения, определение всех компонентов изучаемой системы, анализ их взаимосвязей) и синтез полученных данных. В результате получаем новые или видоизменённые системы, определяем оптимальную структуру изучаемого объекта из множества полученных альтернатив [6, 7].

Чтобы повысить эффективность работы системы безопасности авиапредприятия, необходимы комплексные исследования и объективное представление происходящих процессов и их последствий. Таким образом, требуется системное описание процессов и явлений с использованием методов морфологического анализа и синтеза. Так как при решении подобных задач возможны различные варианты протекания процессов, то желательно иметь модели, описывающие как отдельные процессы, так и подстраиваемую морфологическую модель. С целью создания подобной модели требуется провести её описание, а также определить и выстроить взаимосвязи.

Первоначально определим типовую структуру подразделения транспортной безопасности аэропорта, проведём морфологический анализ и получим базовое количество компонентов и связей, обеспечивающих выполнение структурных функций. Затем выделим из них те компоненты и связи, без которых осуществление системой своей деятельности невозможно. В результате выявляются процессы, проходящие на стыке разных компонентов. Все эти действия требуются для выстраивания полноценного видения процессов и связей взаимодействия.

На рис. 1 представлена графическая модель процесса принятия решения сотрудником подразделения транспортной безопасности. В случае поступления информации о возможном акте незаконного вмешательства, лицо, принимающее решение (ЛПР), идёт по установленному алгоритму действий. Представим это в виде блока Выбор 1.



Рис. 1. Графическая модель процесса принятия решения сотрудником подразделения транспортной безопасности

Данное действие предполагает, что все составляющие сложившейся ситуации уже прописаны, чётко установлена законодательная база по решению данного вопроса, имеются все необходимые технические и инженерные решения, персонал имеет достаточную квалификацию и опыт для работы по установленному алгоритму. В случае, когда ситуация складывается именно таким образом, система безопасности работает на максимально возможном уровне. Однако в реальной жизни обстоятельства могут сложиться совершенно иначе. При возникновении угрозы акта незаконного вмешательства ЛПР не имеет всех необходимых ресурсов для принятия Выбора 1, или же открываются новые, ранее не изученные обстоятельства, требуются дополнительные действия и уточнения. Данная ситуация требует изменения или совершенствования существующих канонов и алгоритмов. В таком случае ЛПР принимает Выбор 2. Получаем видоизменённый набор базовых элементов, имеющий новые организационные и технические решения. В совокупности формируется новый алгоритм действий ЛПР. Описанная модель представляется общей, имеющей способность подстраиваться под постоянно меняющуюся действительность, однако не предполагающей внесения конкретных изменений в действующие алгоритмы.

Для решения задач реагирования на акты незаконного вмешательства возможно применить методы морфологического поиска с целью наиболее подробного рассмотрения всех возможных аспектов и более тщательного подбора компонентов системы безопасности. Такой подход возможно

использовать на всех этапах развития процесса или решения задачи. Для целей данной статьи применение морфологического поиска поможет рассмотреть наиболее полно варианты оптимального решения поставленных вопросов [8].

Используя систематизацию процессов, принимающих участие в построении системы безопасности в аэропорту, и системный подход в решении данных задач, следует осуществить построение модели искомой системы посредством описания её структуры, так как знание внутреннего устройства, т. е. элементов и их взаимосвязей в системе, обеспечит повышение эффективности управления.

Таким образом, учитывая мощность множества $\{M\}$, необходимо использовать современные методы его нейросетевого описания на основе различных вариантов моделирования свойств и возможного развития событий из этого множества, что в большей степени по вычислительным возможностям соответствует стратегической деятельности центральных органов обеспечения транспортной безопасности.

На эти органы возлагается ответственность коррекции содержания руководящих документов, исходя из результатов МС и реальных событий, произошедших в предметной области, и определяющих последующие действия по структурному и параметрическому синтезу в системе авиапредприятий.

Модели и методы МС в системе обеспечения транспортной безопасности аэропорта

Рассмотрим одно из направлений анализа и моделирования структуры системы для решения задач, направленных на снижение вероятности возникновения актов незаконного вмешательства в аэропорт. Данное направление позволяет проработать различные варианты поиска оптимальных средств, используемых для управления процессами [9].

Разработанная морфологическая модель изменения системных свойств любого объекта представлена на рис. 2. Итак, есть система – объект, где возможно возникновение актов незаконного вмешательства. Это могут быть любые объекты, находящиеся под контролем, например, склад горюче-смазочных материалов, контрольно-пропускной пункт. Исходная система (техническая или организационная) состоит из компонентов (элементов) вида $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ и связей между ними, т. е. множества $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$.

Представим это в виде подразделения транспортной безопасности в аэропорту. Тогда исходную или общую структуру объекта SO можно также записать как множество вида

$$SO = \{(K_1, K_2, \dots, K_n) (C_1, C_2, \dots, C_n)\}. \quad (1)$$

В структуре системы организации подразделения транспортной безопасности существуют типовые правила, рекомендации, регламенты, предназначенные для проведения действий в различных штатных и нештатных ситуациях. Однако в реальной жизни всё сложнее, чем это прописано в нормативах, постоянно появляются новые угрозы, которые ранее не были предусмотрены. На практике не всегда известно поведение пассажира. При решении возникшей проблемы из анализа новых потребностей ЛПП (будь то оператор рентгентелевизионного интроскопа, инспектор по досмотру или начальник дежурной смены), формирует функции, которые необходимо выполнить, чтобы решать возникающие задачи. Новые потребности можно удовлетворить несколькими разными вариантами и способами. На начальном этапе намечают новые пути решения поставленных задач и определяют наиболее весомые взаимосвязи и компоненты, дающие возможность реализации новых ресурсов.

Модель на рис. 2 показывает, что для этого в исходную систему надо ввести m элементов или осуществить удаление (вывод) n связей и компонентов, которые сдерживают или не позволяют сформировать требующиеся системы вида A_i и B_j . Отметим, что выбор действий по изменению

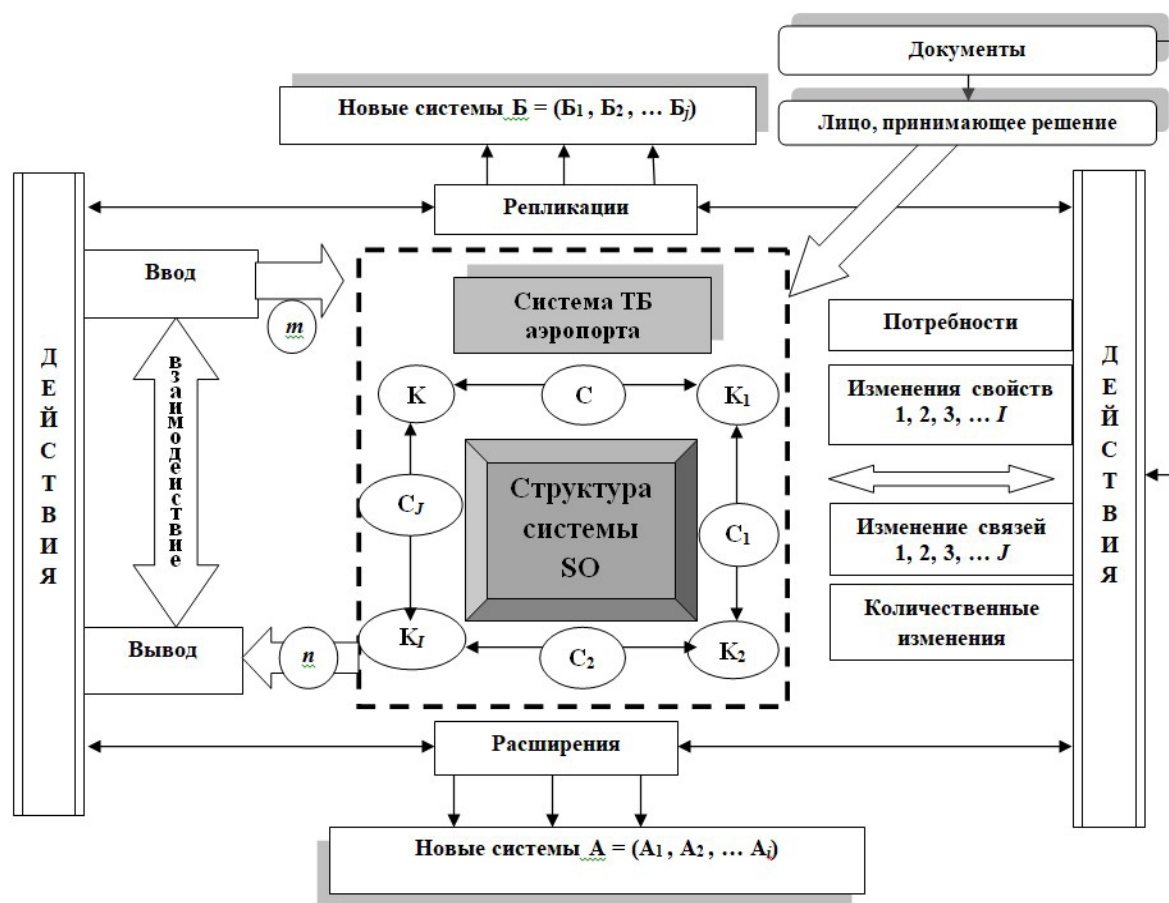


Рис. 2. Морфологическая модель системы безопасности объекта

структуры исследуемой системы осуществляет ЛПР посредством управления свойствами элементов $K_1, K_2, \dots, K_I$ и их связями $C_1, C_2, \dots, C_I$.

В поиске новых решений ставится задача выбора рациональных способов выполнения требуемых функций. За этим следует этап синтеза и реализации возможных принципов действий необходимых технических средств, требующихся для выполнения задуманных физических операций. Возникновение новых угроз для системы безопасности заставляет ЛПР искать новые пути, названные *расширения* или *репликации* исходной системы:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}; B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}. \quad (2)$$

Система безопасности аэропорта состоит из нескольких взаимосвязанных и взаимодополняющих систем: видеонаблюдения, охранной сигнализации помещений и периметра, контроля и управления доступом, охранного освещения, пожаротушения и охранно-пожарной сигнализации. Вниманию сотрудников подразделения транспортной безопасности подлежат все помещения аэровокзального комплекса, периметр, склады, ангары, места стоянок самолётов. Вопросы структурного и параметрического синтеза в системе обеспечения транспортной безопасности могут решаться на уровне авиапредприятия и аэропорта.

Заключение

МС в системе транспортной безопасности носит стратегический характер. Выводы, сделанные в ходе проведения МС, должны быть учтены руководством при реализации мероприятий

по текущему и долгосрочному планированию. К тому же переборные методы в реализации вычислительного процесса подобного синтеза требуют больших мощностей вычислителей.

В транспортных системах страны для реализации МС в иерархической структуре организации транспортной безопасности авиапредприятий требуется работа по вопросам выполнения требований руководящих документов и своевременного информирования вышестоящих звеньев управления об особенностях реализации руководящих положений. Применение МС на авиапредприятии может сыграть решающую роль в изменении целевой функции управления и пополнении морфологического множества $\{M\}$.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Zwicky F. *Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach*. New York, McMillan, 1969.
2. Акимов С. В. Мультиагентная модель автоматизации структурно-параметрического синтеза // Системы управления и информационные технологии. 2005. № 3(20). С. 45–48.
3. Акимов С. В. Модель морфологического множества уровня идентификации // Труды учебных заведений связи. 2005. № 172. С. 120–135.
4. Акимов С. В. Четырёхуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза // Труды учебных заведений связи. 2004. № 171. С. 165–173.
5. Акимов С. В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области. URL: <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2> (дата обращения: 04.12.2023).
6. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечёткие модели и сети. 2-е изд. Москва: Горячая линия – Телеком, 2017. 284 с.
7. Клименко И. С. Комплексная защита инфокоммуникационных объектов: детерминированные модели. Москва: Добросвет, 2020. 175 с.
8. Клименко И. С. Морфологический подход Фрица Цвигке к проектированию систем комплексной защиты инфокоммуникационных объектов // Современная наука и инновации. 2021. № 3. С. 53–61.
9. Юдаев В. В., Гладких А. А., Уласюк Т. Г. Моделирование процесса вероятной реализации акта незаконного вмешательства в аэропорту и его нейтрализации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 118–125.

References

1. Zwicky F. *Discovery, Invention, Research through the Morphological Approach*. New York, McMillan, 1969.
2. Akimov S. V. Mul'tiagentnaya model' avtomatizatsii strukturno-parametricheskogo sinteza. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*, 2005, no. 3(20), pp. 45–48. (In Russ.)
3. Akimov S. V. Model' morfologicheskogo mnozhestva urovnya identifikatsii. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2005, no. 172, pp. 120–135. (In Russ.)
4. Akimov S. V. Chetyryokhurovnevaya integrativnaya model' dlya avtomatizatsii strukturno-parametricheskogo sinteza. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2004, no. 171, pp. 165–173. (In Russ.)
5. Akimov S. V. Vvedenie v morfologicheskie metody issledovaniya i modelirovanie znaniy predmetnoj oblasti, available at: <https://structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm#m2> (accessed: 04.12.2023). (In Russ.)

6. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechyotkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]*. 2nd ed. Moscow, Goryachaya liniya – Telecom Publ., 2017, 284 p. (In Russ.)
7. Klimenko I. S. *Kompleksnaya zashchita infokommunikatsionnykh ob'ektov: determinirovannye modeli [Complex protection of infocommunication facilities: deterministic models]*. Moscow, Dobrosvet Publ., 2020, 175 p. (In Russ.)
8. Klimenko I. S. Fritz zwicki's morphological approach to the design of integrated protection systems for information and communication facilities. *Sovremennaya nauka i innovatsii*, 2021, no. 3, pp. 53–61. (In Russ.)
9. Yudaev V. V., Gladkikh A. A., Ulasjuk T. G. Modeling the process of probable implementation of an act of unlawful interference in an airport and its neutralization. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 118–125. (In Russ.)

Информация об авторах

Уласюк Татьяна Георгиевна, старший преподаватель, аспирант кафедры обеспечения авиационной безопасности, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, tgu-7@yandex.ru

Медетбеков Бейбит Рахымжанович, лектор кафедры, АО «Академия гражданской авиации» (АГА), Республика Казахстан; аспирант кафедры обеспечения авиационной безопасности, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, b.medetbekov@agakaz.kz

Authors information

Ulasjuk Tatyana G., Senior Lecturer, Postgraduate Student at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, tgu-7@yandex.ru

Medetbekov Beibit R., Lecturer of the Department, Civil Aviation Academy, Almaty, Republic of Kazakhstan; Postgraduate Student at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, b.medetbekov@agakaz.kz

*Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.
The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 10.06.2024.*

Обзорная статья
УДК 004.81:351.814.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФРАКТАЛЬНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

(публикуется в рамках молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

С. Е. ПОТАПОВА, А. В. ДОРМИДОНТОВ, Ю. С. АКСЕНОВА

*Ульяновский институт гражданской авиации
имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия*

Аннотация. В статье проведён обзор литературы, где рассматривается возможность применения фрактального структурирования к оценке параметров и зависимостей устойчивости динамической системы в сфере обеспечения безопасности на воздушном транспорте (ВТ). Прогнозирование вероятности возникновения деструктивного явления, способного повлечь за собой значительный материальный ущерб и масштабные человеческие жертвы, является актуальной задачей в формировании комплекса мер защиты в сфере гражданской авиации (ГА). Для решения указанной задачи предлагается использовать метод фрактально-кластерного анализа систем авиационной безопасности, а также применить универсальность фрактала при моделировании событий в сфере ГА. Определены кластеры фрактальной системы безопасности объектов транспортной инфраструктуры и взаимозависимые показатели, определяющие уровни устойчивости динамических систем. Обозначен критический уровень устойчивости рассматриваемой системы. Цель данной работы – обосновать применение фрактального структурирования систем безопасности для оценки устойчивого состояния при различных видах деструктивных воздействий.

Ключевые слова: воздушный транспорт, система безопасности авиапредприятий, устойчивость динамических систем, фрактальная модель, транспортные системы страны

Для цитирования: Потапова С. Е., Дормидонтов А. В., Аксенова Ю. С. Применение метода фрактального структурирования при оценке устойчивости систем безопасности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 131–138.

APPLICATION OF THE FRACTAL STRUCTURING METHOD IN ASSESSING THE STABILITY OF SECURITY SYSTEMS

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin
of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

S. E. POTAPOVA, A. V. DORMIDONTOV, YU. S. AKSENOVA

Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

Abstract. In this paper, a review of the literature is conducted, which examines the possibility of applying fractal structuring for the assessment of parameters and dependencies of the stability of a dynamic system in the field of air transport safety. Forecasting the likelihood of a destructive phenomenon that can lead to significant material damage and large-scale human casualties is an urgent task in the formation of a set of protection measures

in the field of civil aviation. To solve this problem, it is proposed to use the method of fractal cluster analysis of aviation security systems, as well as to apply the versatility of the fractal in modeling events in the field of civil aviation. Clusters of the fractal security system of transport infrastructure facilities and interdependent indicators of the levels of dynamic systems stability are determined. The critical level of the system stability under consideration is also indicated. The purpose of this work is to substantiate the application of fractal structuring of security systems to assess the stable state under various types of destructive influences.

Keywords: air transport, aviation safety system, stability of dynamic systems, fractal model, transport systems of the country

For citation: Potapova S. E., Dormidontov A. V., Aksenova Yu. S. Application of the fractal structuring method in assessing the stability of security systems, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 131–138. (In Russ.)

Введение

Свойства фрактальности в настоящее время широко применяются в предметных областях, связанных с техническими решениями. Особое значение фракталам придаётся при описании и структурировании сложных динамических нелинейных систем. Динамической системой является объект, для которого задана функциональная зависимость между временем и совокупностью допустимых состояний рассматриваемого объекта, представленная законом, описывающим изменения (эволюцию) этих состояний. Описания динамических систем для задания закона эволюции также разнообразны: с помощью дифференциальных уравнений, дискретных отображений, теории графов, теории Марковских цепей. Выбор одного из способов описания задаёт конкретный вид математической модели соответствующей динамической системы [1]. Математическая модель считается заданной при установлении параметров системы, которые определяют её состояние, и закона эволюции. Значимым понятием в описании динамических систем является устойчивость – способность продолжительное время поддерживать состояние, приближённое к равновесию, и сохранять свойства при малых изменениях параметров системы [2].

Динамическая система может быть применена как модель для теоретического исследования поведения реальных объектов. К таким объектам относится система безопасности на ВТ, обладающая свойством изменчивости с течением времени под влиянием внутренних и внешних факторов; для оценки устойчивости такой системы нужна математическая модель. В качестве математической модели может выступать фрактальное структурирование, которое в узком смысле имеет математическое определение и поддается анализу [3].

Фрактальная модель системы безопасности на воздушном транспорте

Обеспечение безопасности на объектах транспортной инфраструктуры рассматривается как деятельность, направленная на предупреждение деструктивных проявлений в ГА. В то же время безопасность может быть рассмотрена и как результат деятельности по обеспечению безопасности объекта. Достижение абсолютного показателя безопасности не представляется возможным, поэтому обеспечение безопасности сводится к стремлению установить приемлемое состояние безопасности. Приемлемое состояние безопасности определяется уровнем безопасности, который может быть количественно выражен как динамическая величина, изменяющаяся во времени под воздействием внутренних и внешних угроз, а также мер противодействия им [4].

Безопасность на объектах транспортной инфраструктуры обеспечивается комплексно в следующих направлениях: совершенствование нормативно-правового сопровождения, наращивание потенциала технической оснащённости и оптимизация человеческого фактора. Кроме

того, организация обеспечения безопасности обладает свойством иерархичности, отражающемся в указанных направлениях. В целях оценки состояния безопасности объекта транспортной инфраструктуры целесообразно его рассматривать как систему.

На любую систему всегда действуют различные факторы-возмущения, которые могут нарушить её нормальную работу. Хорошая система должна устойчиво функционировать при всех действующих на неё возмущениях. Понятие устойчивости системы связано с её способностью возвращаться в состояние равновесия после исчезновения внешних сил, которые вывели её из этого состояния. Если система неустойчива, то она не возвращается в состояние равновесия, из которого её вывели, а либо удаляется от него, либо совершает вокруг него возрастающие по амплитуде колебания. Очевидно, что система с расходящимся процессом была бы неработоспособной. Устойчивость является необходимым условием работоспособности любой системы [5].

Проведение оценки состояния безопасности относится к тем практическим задачам, в которых параметры оценки заранее не известны и их необходимо определить. Для определения параметров можно применить системный подход. Поиск параметров будет основываться на информации, полученной посредством наблюдений [6]. На этапе сбора информации вместо точных параметров исследуемой динамической системы можно использовать их приблизительные значения для изучения и прогнозирования волатильности состояния системы с течением времени [7].

В качестве механизма оценки устойчивости состояния системы безопасности может быть применен фрактально-кластерный анализ. Фрактальные кластеры имеют иерархичную структуру и могут быть интересны в плане рассмотрения особенностей деструктивных проявлений в деятельности ГА. Фрактально-кластерный анализ в области оптимизации деструктивных проявлений требует статистических данных о подобных событиях для выявления динамики. Такой подход позволяет определить наиболее критические элементы и интенсивность их влияния на состояние безопасности объекта транспортной инфраструктуры. Также фрактально-кластерный анализ предоставляет возможность прогнозирования наиболее вероятных новых деструктивных проявлений, что важно для предотвращения их негативных последствий.

Можно выделить три укрупнённых кластера системы безопасности: правового обеспечения (ПО), материального обеспечения (МО), кадрового обеспечения (КО).

В каждом кластере рассмотрим профессиональную достаточность (компетентность) для качественного выполнения поставленных задач.

Введём показатели, которые будут характеризовать способность системы выполнять в рассматриваемый период поставленные задачи соответственно требованиям, например:

$C_{\text{ПО}}$ – степень соответствия нормативно-правовых документов текущим условиям в задачах обеспечения безопасности от различных видов угроз;

$C_{\text{МО}}$ – вероятность выполнения профессиональных функций в задачах предотвращения противоправных действий с учётом характеристик используемых технических средств (обнаружение запрещённых предметов и веществ, пресечение попытки проникновения посторонних лиц);

$C_{\text{КО}}$ – степень соответствия компетентности специалистов транспортной безопасности требованиям, указанным в Профессиональном стандарте¹ и закреплённых в Приложении № 2 к Приказу от 21 августа 2014 г. № 231².

Выделенные кластеры при выполнении своих профессиональных задач находятся под воздействием внутренних и внешних факторов, оказывающих влияние с течением времени. Система

¹ Профессиональный стандарт «Специалиста транспортной безопасности на воздушном транспорте гражданской авиации».

² Приказ Минтранса России от 21 августа 2014 г. № 231 «Об утверждении Требований к знаниям, умениям, навыкам сил обеспечения транспортной безопасности, личностным (психофизиологическим) качествам, уровню физической подготовки отдельных категорий сил обеспечения транспортной безопасности, включая особенности проверки соответствия знаний, умений, навыков сил обеспечения транспортной безопасности, личностных (психофизиологических) качеств, уровня физической подготовки отдельных категорий сил обеспечения транспортной безопасности применительно к отдельным видам транспорта» (с изменениями на 4 сентября 2017 года).

обеспечения безопасности объекта транспортной инфраструктуры является детерминированной, и важным становится прогнозирование поведения системы с учётом реальной обстановки [8].

Применительно к системе безопасности как динамической детерминированной системе, с учётом обозначенных фрактальных элементов – укрупнённых кластеров, можно смоделировать фрактальную модель системы безопасности (рис. 1). В представленной модели ветвь каждого кластера в свою очередь может быть масштабирована и будет содержать подобные элементы, это кластеры: ПО, МО, КО. Фрактальность понимается как согласованность между составляющими систему элементами в масштабе. Для математического определения необходимо обозначить размерность. Фрактальная размерность представлена степенью (численным выражением) масштабирования, то есть повторения элементов изначальной системы в уменьшенном виде на всех уровнях [9]. Математическое выражение такого повторения имеет вид:

$$P_i(t) = P_{i0} t^a,$$

где $P_i(t)$ – исследуемый показатель каждого кластера, a – фрактальная размерность, P_{i0} – начальное значение исследуемого показателя, t – временной период изменения значения исследуемого показателя.

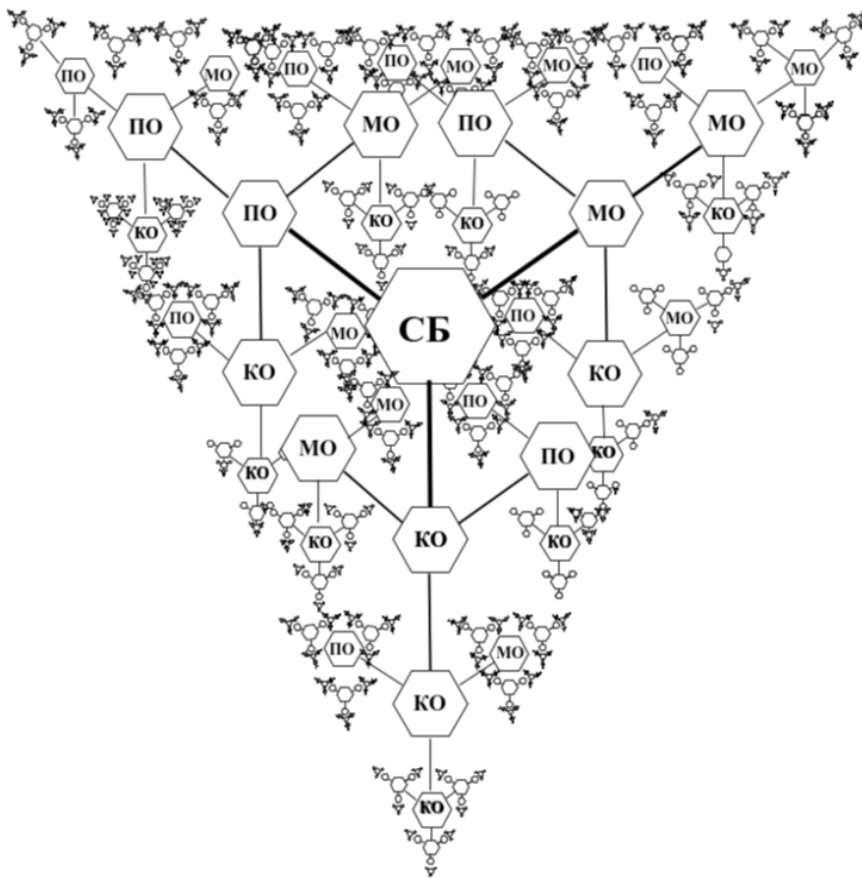


Рис. 1. Фрактальная модель системы безопасности на объектах транспортной инфраструктуры

Оценка воздействия негативного явления в системе безопасности

Результат воздействия факторов на изменения системы можно отразить путём введения k – управляющего коэффициента [9]. Этот коэффициент является синтезированным показателем влияния внутренних и внешних факторов на систему и их взаимодействия между собой:

$$k = \frac{C_0}{C},$$

где C – реальный уровень компетентности специалиста в системе безопасности; C_0 – требуемый уровень компетентности. Уровень компетентности закрепляется результатами аттестации специалистов транспортной безопасности на ВТ.

Для технических средств отмеченные показатели определяются их паспортными данными и результатами регламентных работ. Степень соответствия нормативно-правового обеспечения определяется результатом процедуры аккредитации юридических лиц в качестве подразделения транспортной безопасности.

Вероятность возникновения негативного явления предлагается формализовать с помощью рекуррентного соотношения П. Ферхюльста, которое отражает универсальность динамических систем и может быть применимо и к системе безопасности на ВТ [8]:

$$P_{t+1} = kP(1 - P_t), \quad (1)$$

где P_{t+1} и P_t – вероятности возникновения негативного явления в моменты времени $t+1$ и t , P – прогнозируемая вероятность негативного явления.

Единицы t , $t+1$, в соотношении (1) выбираются в зависимости от требований лица, принимающего решения, и структурных кластеров с целью представления реального текущего состояния системы.

Анализ отношения (1) показывает, что прогнозирование вероятности возникновения негативного явления в системе безопасности в диапазоне значений $0 \leq P \leq 1$ возможно только в случае, если значения $k \in [0, 4]$. В [9] установлено, что специалистом на зрительную обработку информации с приборов визуально затрачивается (55–60) с. Применительно к специалистам авиационной безопасности установим, что при проведении процедуры досмотра багажа и пассажиров на обработку информации, получаемой посредством авиационного профайлинга и считываемой с технических средств досмотра, специалисту необходимо для принятия решения $t \approx 60$ с. При принятии решения о вероятности возникновения негативного явления важное значение приобретает коэффициент k , функционально связанный со способностью специалиста сохранять работоспособность при воздействии внешних и внутренних факторов, то есть, резилентностью m . В работе [4] приведена эмпирическая формула показателя резилентности:

$$m = \frac{128}{2^{2k}}.$$

Таким образом, вероятность возникновения риска при выполнении функциональных обязанностей стремится к 1 при показателе резилентности $m \leq 1$. Система безопасности обладает свойством динамичности. Исходя из этого, при показателе управляющего коэффициента $k < 4$ система сохраняет устойчивость. В данном случае устойчивость рассматривается как реакция системы на малое возмущение её состояния. Одним из методов оценки устойчивости динамических систем является метод бифуркаций (новообразований). Бифуркации – это разновидности преобразований, которые лежат в основе развития и динамических систем. Бифуркации моделируются как переход из наибольшей степени устойчивости в наименьшую, то есть отображают нарастающую неустойчивость в системах с учётом неопределённости движения этих переходов [10]. Радикальное изменение состояния системы может повлечь необратимые последствия – разрушение системы. Критические моменты бифуркации интересны с точки зрения прогнозирования интервалов между ними, при которых развитие состояния системы может пойти в различных направлениях. В системах безопасности, включающих набор элементов и связей между ними, состояние системы может быть трудно прогнозируемым. В случае с системой безопасности на ВТ точкой бифуркации является уровень резилентности m [10]. Пример бифуркационной

диаграммы, с учётом указанных условий, приведён на рис. 2. Бифуркационная диаграмма, по мнению авторов, в общем случае может быть представлена как фрактальная модель.

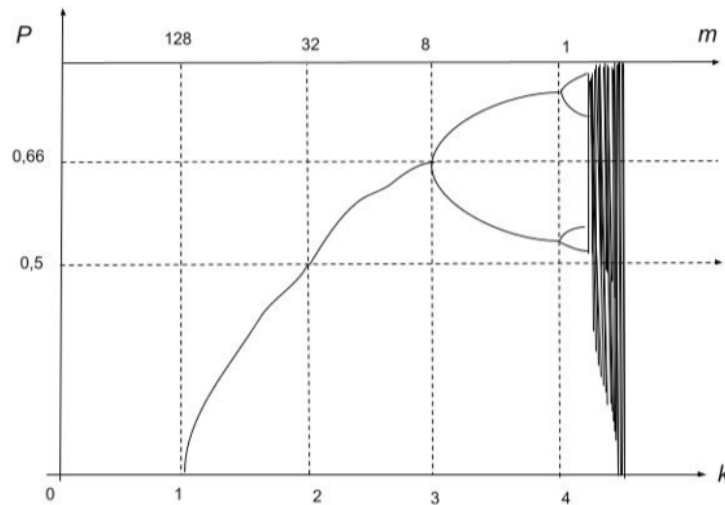


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма вероятности деструктивного явления [10]

В случае, когда показатель управляющего коэффициента достигает верхнего предела $k=4$, система входит в точку бифуркации, то есть становится крайне неустойчивой с необратимой вероятностью возникновения деструктивного явления. Следовательно, показатель резилентности демонстрирует уровень устойчивости системы. Можно говорить, что регулирование показателя резилентности даёт возможность прогнозирования устойчивости системы.

Заключение

Проведён обзор и анализ источников и рассмотрена возможность оценки устойчивости систем безопасности объектов транспортной инфраструктуры с применением фрактально-кластерного структурирования деятельности в сфере ГА.

Отмечено, что универсальность фракталов позволяет применять их при анализе и оценке устойчивости динамических детерминированных систем. При этом комплексное и иерархичное построение структуры безопасности на ВТ обеспечивает возможность применения метода фрактального структурирования для прогнозирования вероятности возникновения деструктивного явления в деятельности ГА. Определена взаимосвязь показателей устойчивости системы безопасности и установлен их критический уровень.

В дальнейшем авторами планируется оценить валидность предлагаемого подхода на основании статистических данных показателей деятельности укрупнённых кластеров объектов транспортной инфраструктуры ГА, в частности, рассмотреть развитие бифуркаций под влиянием факторов, оказывающих кардинальное воздействие и способствующих возникновению предельного цикла для состояния системы безопасности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Layek G. C. *An Introduction to Dynamical Systems and Chaos*. New Delhi, Springer India, 2015, 622 p.
2. Кроновер Р. М. *Фракталы и хаос в динамических системах*. Москва: Техносфера, 2006. 488 с.

3. Иудин Д. И., Копосов Е. В. Фракталы: от простого к сложному. Н. Новгород: Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2012. 200 с.
4. Елисов Л. Н., Овченков Н. И., Фадеев Р. С. Введение в теорию авиационной безопасности / Под ред. Л. Н. Елисова. Ярославль: Филигрань, 2016. 320 с.
5. Bulkina E., Firsov A. Numerical-analytical method for solving the inverse problem of stability for technical systems with multiple uncertain parameters. *Int. Sci. Journal. Mach. Technol. Mater.* 2016, vol. 10, no. 11, pp. 12–14.
6. Жабко А. П., Котина Е. Д., Чижова О. Н. Дифференциальные уравнения и устойчивость. Санкт-Петербург: Лань, 2015. 320 с. <https://elibrary.ru/VLRGVX>
7. Лэ В. Х. Устойчивость динамической системы с приближенными параметрами, найденными методом регуляризации Тихонова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 429–435. <https://elibrary.ru/ZPAQSW>
8. Эрвин Ласло. Век бифуркации. Постигание изменяющегося мира. Пер. Ю. А. Данилова. Москва, 1995. Электронная публикация: Центр гуманитарных технологий. URL: <https://gtmarket.ru/library/basis/4545> (дата обращения: 19.02.2024).
9. Михайлов В. В., Кирносов С. Л., Гедзенко М. О. Методика построения системы поддержки принятия метеозависимых решений на базе фрактальных структур // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2014. № 2. С. 35–42.
10. Базарский О. В., Михайлов В. В., Кирсонов С. Л. Потенциальная информационная ёмкость изображений, обрабатываемых автоматизированной системой и зрительным аппаратом человека // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2006. № 1. С. 20–27.

References

1. Layek G. C. *An Introduction to Dynamical Systems and Chaos*. New Delhi, Springer India, 2015, 622 p.
2. Kronover R. M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh [Fractals and chaos in dynamical systems]*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006, 488 p. (In Russ.)
3. Iudin D. I., Koposov E. V. *Fraktaly: ot prostogo k slozhnomu*. Nizhny Novgorod, Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t Publ., 2012, 200 p. (In Russ.)
4. Elisov L. N., Ovchenkov N. I., Fadeev R. S. *Introduction to the theory of aviation safety*. Eds. L. N. Elisov, Yaroslavl', Filigran' Publ., 2016, 320 p. (In Russ.)
5. Bulkina E., Firsov A. Numerical-analytical method for solving the inverse problem of stability for technical systems with multiple uncertain parameters. *Int. Sci. Journal. Mach. Technol. Mater.* 2016, vol. 10, no. 11, pp. 12–14.
6. Zhabko A. P., Kotina E. D., Chizhova O. N. *Differentsial'nye uravneniya i ustojchivost' [Differential equations and stability]*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2015, 320 p. (In Russ.)
7. Le V. H. Stability of a dynamic system with approximate parameters found by the Tikhonov regularization method. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2022, no. 12, pp. 429–435. (In Russ.)
8. Ervin Laszlo. The Age of Bifurcation. Understanding the Changing World. Translation by Yu. A. Danilov, Moscow, 1995. Electronic publication: Centre for Humanitarian Technologies, available at: <https://gtmarket.ru/library/basis/4545> (accessed: 19.02.2024). (In Russ.)
9. Mikhailov V. V., Kirnosov S. L., Gedzenko M. O. The methodical of building a system of support weather dependent decision on the basis of fractal structures, *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2014, no. 2, pp. 35–42. (In Russ.)
10. Bazarskii O. V., Mikhailov V. V., Kirsonov S. L. Potential information capacity of images processed by the automated system and human visual apparatus. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2006, no. 1, pp. 20–27. (In Russ.)

Информация об авторах

Потапова Светлана Евгеньевна, старший преподаватель кафедры обеспечения авиационной безопасности, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, oabuvauga@mail.ru

Дормидонтов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой обеспечения авиационной безопасности, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, oabuvauga@mail.ru

Аксенова Юлия Сергеевна, старший преподаватель кафедры обеспечения авиационной безопасности, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, oabuvauga@mail.ru

Authors information

Potapova Svetlana E., Senior Lecturer at the Department of Aviation Security, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, oabuvauga@mail.ru

Dormidontov Alexander V., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Aviation Security, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, oabuvauga@mail.ru

Aksenova Yulia S., Senior Lecturer at the Department of Aviation Security, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, oabuvauga@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 22.05.2024; принята к публикации 30.05.2024.

The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 22.05.2024; accepted for publication 30.05.2024.

Научная статья
УДК 629.735.064.53

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

С. М. МУСИН¹, В. А. КАЛИЙ²

¹ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

² Уфимское агрегатное производственное объединение, Уфа, Россия

Аннотация. Замещение зарубежного авиационного оборудования на самолётах SSJ-95NEW-100 и MC-21 отечественными системами и комплексами осуществляется на основе применения новых технологий и материалов. Ключевым элементом системы генерирования электроэнергии трёхфазного переменного тока номинального напряжения 200/115 В переменной частоты от 360 до 800 Гц из состава системы электроснабжения этих самолётов является блок регулирования, защиты и управления. Достижения в области технологии производства программируемых логических интегральных схем позволили разработать блок регулирования, защиты и управления с функциями управляющих информационных систем, обладающий совокупными преимуществами аналоговых и цифровых регуляторов со встроенным программным обеспечением. В статье описан блок регулирования, защиты и управления для импортозамещения системы электроснабжения MC-21 с маршевым двигателем ПД-14, созданный на основе технологии программируемых логических интегральных схем, обосновано его функционирование как пропорционально-интегрального-дифференциального регулятора, который использует среднее действующее значение напряжения трёх фаз, сформированное на основе метода скользящего окна.

Ключевые слова: воздушный транспорт, самолёт, система электроснабжения, система генерирования электроэнергии, электрический генератор, электрический регулятор, электрическая защита, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Мусин С. М., Калий В. А. Реализация алгоритмов управления синхронными генераторами переменной частоты с применением программируемых логических интегральных схем // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 139–147.

REALIZATION OF ALGORITHMS OF MANAGEMENT BY SYNCHRONOUS GENERATORS OF VARIABLE FREQUENCY WITH APPLICATION OF PROGRAMMED LOGIC INTEGRATED SCHEMES

S. M. MUSIN¹, V. A. KALIY²

¹ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

² Ufa Aggregate Production Association, Ufa, Russia

Abstract. Replacement of the foreign aviation equipment by planes SSJ-95NEW-100 and MS-21 domestic systems and complexes is carried out on the basis of application of new technologies and materials.

In intellectual transport systems the aviation power supply system is considered as power information system with feedback, steady against refusals of the functional onboard equipment, with the purpose of localization or identification of refusal and an estimation of size of change of the parameter necessary for an establishment of a degree of defeat of system, definition thus an opportunity of its further operation. A key element of system of generating of the electric power of a three-phase alternating current of rated voltage 200/115 V variable frequencies from 360 up to 800 Hz from structure of aviation power supply system is the block of regulation, protection and management. Achievements in the field of the “know-how” of programmed logic integrated schemes have allowed to develop the block of regulation, protection and management with functions of the operating information systems, possessing cumulative advantages of analog and digital regulators with the built in software. The block of regulation, protection and management for import replacement of aviation power supply system MS-21 with mid-flight engine PD-14 is created on the basis of technology of programmed logic integrated schemes and functions on a principle proportion integrator differential a regulator which uses average operating value of a pressure of three phases, generated on the basis of a method of a sliding window.

Keywords: air transport, aircraft, power supply system, power generation system, electric generator, electrical regulator, electrical protection, intelligent transport systems

For citation: Musin S. M., Kalij V. A. Realization of algorithms of management by synchronous generators of variable frequency with application of programmed logic integrated schemes, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 139–147. (In Russ.)

Введение

В настоящее время в системах электроснабжения воздушных судов (ВС) находят широкое применение системы генерирования переменного тока переменной частоты. Такие системы применяются как для первичных, так и для вторичных систем генерирования и специальных систем электроснабжения, в том числе на ветрогенераторах, используемых в качестве источников в аварийном режиме работы системы электроснабжения ВС [1, 2].

Системы генерирования переменного тока переменной частоты применяются на самолётах зарубежного производства, таких как Боинг В-787, Эйрбас А-380, А-350, и в системах электроснабжения отечественных самолётов типов МС-21 и SSJ-95NEW (вторичная система генерирования).

Основные требования к качеству электроэнергии систем электроснабжения изложены в национальном стандарте ГОСТ Р 54073-2017¹, где представлены системы электроснабжения переменного трёхфазного тока номинальных напряжений 115/200 В и 230/400 В переменной частоты (360–800) Гц.

В качестве первичного (основного) источника электрической энергии в таких системах электроснабжения может применяться трёхфазный трёхкаскадный синхронный генератор переменного тока с электромагнитным возбуждением, работающий без привода постоянной частоты вращения (рис. 1). Управление генератором осуществляется блоком регулирования, защиты и управления (БРЗУ).

Электропитание БРЗУ постоянным током и формирование тока возбуждения для регулирования выходного напряжения переменного тока осуществляется от подвозбудителя генератора, выходное напряжение переменного тока которого после выпрямления изменяется в широком диапазоне в зависимости от частоты вращения [3].

¹ ГОСТ Р 54073-2017. П. 5.1. Системы электроснабжения самолётов и вертолётот. Общие требования и нормы качества электро-энергии. Москва: Стандартинформ, 2018.

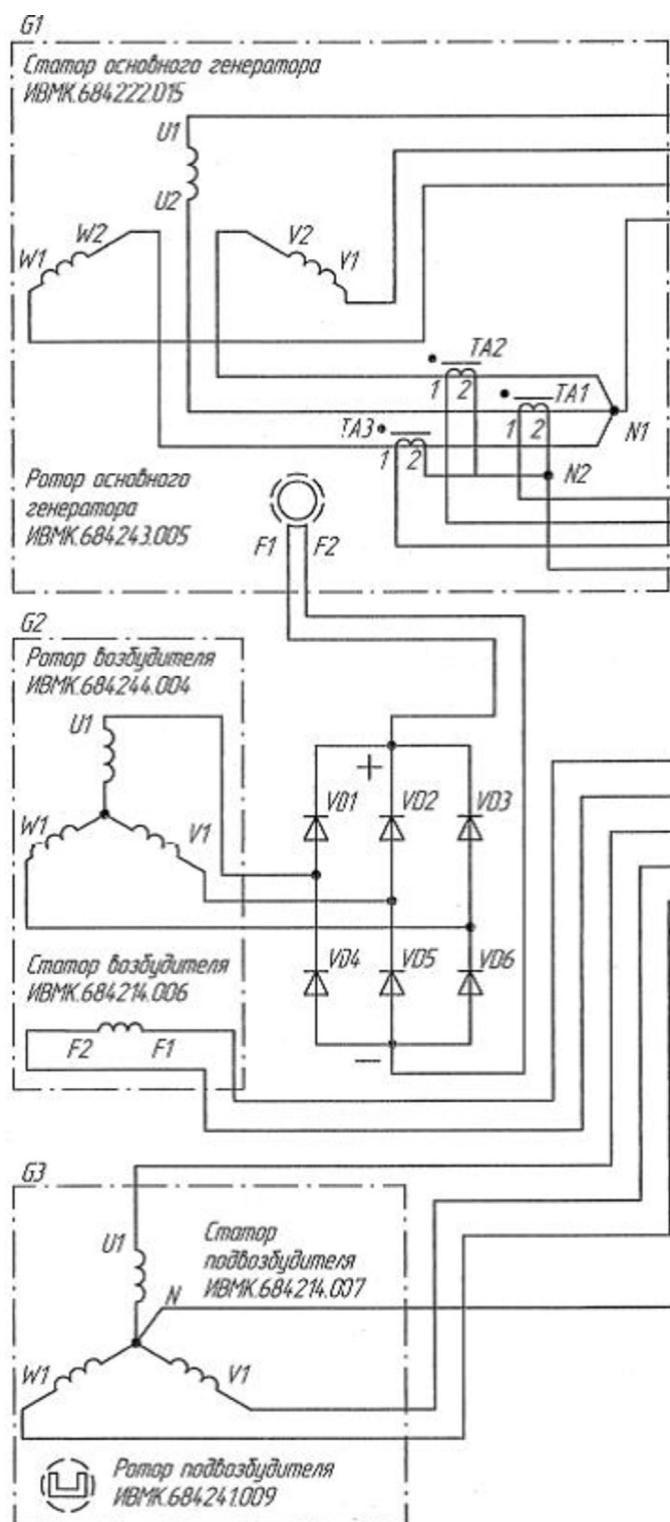


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная трёхкаскадного синхронного генератора ГСР-90/120К

Постановка задачи

Цель данной статьи – обосновать функции БРЗУ, работающего на базе технологии программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), совместно с трёхфазным трёхкаскадным синхронным генератором переменного тока переменной частоты с электромагнитным возбуждением [4, 5].

Основные функции БРЗУ [1, 6]:

- регулирование выходного напряжения генератора;
- защита генератора от перегрева;
- защита генератора от перегрузки по току;
- дифференциальная защита по току фидера генератора;
- защита от напряжения, не соответствующего требованиям качества электроэнергии;
- управление линейным коммутационным устройством, через контакты которого выработанная генератором электроэнергия подаётся на основную шину первичного распределительного устройства;
- выдача сигнализации о состоянии канала генерирования электроэнергии;
- выдача информации о режиме работы системы электроснабжения в систему управления общесамолётным оборудованием;
- выдача информации о режиме функционирования на мнемосхему системы электроснабжения на индикаторе пилота;
- выдача информации в систему регистрации полётных данных.

Основные задачи управления каналом генерирования электроэнергии заключаются в следующем:

- выдача сигнала на включение линейного коммутационного устройства генератора при включённом возбуждении и отсутствии неисправности в канале генерирования;
- развозбуждение генератора и снятие сигнала на включение линейного коммутационного устройства, и, в определённых случаях, формирование команды на включение расцепителя (отсоединение вала генератора от привода), при срабатывании одной из защит по току, напряжению, частоте, температуре.

Методы решения

БРЗУ, разработанный для синхронного трёхкаскадного генератора, работает со всеми тремя электрическими машинами, входящими в генератор (рис. 1).

В качестве закона регулирования для БРЗУ используем функцию, реализуемую ПИД-регулятором (пропорционально-интегральный-дифференциальный регулятор), где в контуре формируется управляющий сигнал, равный сумме трёх составляющих, первая из которых пропорциональна разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), вторая – интегралу сигнала рассогласования, третья – производной сигнала рассогласования (рис. 2) [7]:

$$\Delta U = K_1(U_0 - U_C) + K_2 \frac{(U_0 - U_{CN}) - (U_0 - U_{CN-1})}{\Delta t} + K_3 I_U;$$

$$I_U = \begin{cases} 0, & \text{при } |U_0 - U_{CN}| \geq U_{0I}; \\ \sum_{k=1}^{N-1} (U_0 - U_{Ck}) \Delta t + (U_0 - U_{CN}) \Delta t, & \text{при } |U_0 - U_{CN}| < U_{0I}, \end{cases}$$

где K_1, K_2, K_3 – коэффициенты передачи соответственно сигнала рассогласования, его интеграла и производной, рад;

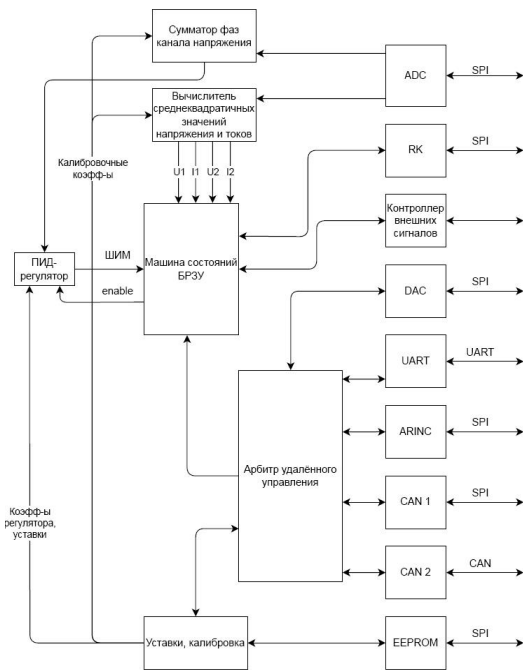
U_0 – величина номинального фазного напряжения генератора, В;

U_C – величина текущего значения фазного напряжения в точке регулирования; U_{Ck} , $k=1, \dots, N$ – она же на моменты дискретизации (отсчёта) аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), В;

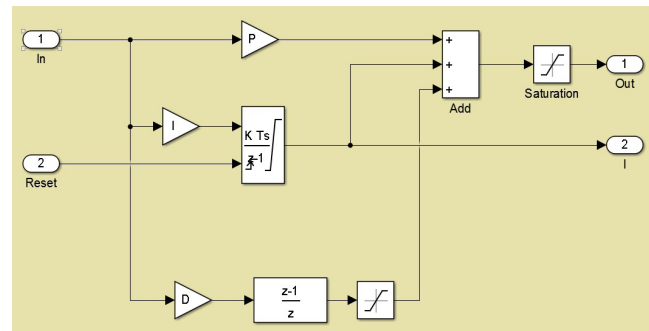
I_U – ток нагрузки в точке регулирования напряжения, А;

Δt – рассматриваемый промежуток времени (шаг дискретизации АЦП по времени), с;

U_{0I} – пороговая величина текущего фазного напряжения, В (см. ниже).



а



б

Рис. 2. Схема функциональная регулятора БРЗУ – а; модель процесса контроля напряжений в среде Simulink – б

Пороговое напряжение U_{0I} фактически разделяет управление на два регулятора. При переходных процессах с большим размахом работает ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор), при малых отклонениях – ПИД-регулятор.

Блок БРЗУ для регулирования напряжения в точке регулирования и на клеммах основного генератора непосредственно контролирует напряжение с помощью гальванически развязанных портов. При этом фактически контролируется мгновенное напряжение как классическое трёхфазное синусоидальное напряжение со сдвигом фаз на 120° в любой момент времени t в трёхфазной системе координат:

$$\begin{aligned} u_A &= U \sin(\omega t), \\ u_B &= U \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_C &= U \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения напряжения, В, соответственно в фазах A, B, C в точке регулирования; U – амплитуда мгновенного напряжения, В; ω – круговая частота мгновенного напряжения, рад/с; t – время, с.

Регулирование напряжения основного генератора в точке регулирования осуществляется воздействием регулятора напряжения блока БРЗУ на обмотку возбуждения возбудителя (ОВВ). Регулятор поддерживает среднее по трём фазам значение напряжения в заданных пределах в симметричных режимах и ограничивает наибольшее из фазных напряжений в аварийных несимметричных режимах работы системы генерирования.

Регулирование напряжения осуществляется по среднему значению напряжения трёх фаз в симметричном режиме, поэтому текущее действующее значение для регулятора определяется как

$$U_{cp.rms} = \frac{U_{Arms} + U_{Brms} + U_{Crms}}{3} = U_C,$$

где $U_{cp.rms}$ – среднее значение фазного напряжения по дискретным отсчётам трёх фаз A, B, C ; $U_{Arms}, U_{Brms}, U_{Crms}$ – текущее действующее значение фазного напряжения по дискретным отсчётам АЦП, В, фаз A, B, C в точке регулирования.

Для работы с АЦП в схеме вычисления среднего значения фазного напряжения трёх фаз используем теорему Котельникова, согласно которой непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно точно восстановить по его дискретным отсчётам, если взять частоту дискретизации, превышающую максимальную частоту сигнала минимум в два раза. Выберем частоту дискретизации 25 кГц. Действующее напряжение фазы A U_{Arms} будет равно:

$$U_{Arms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{An}^2},$$

где u_{An}^2 – квадрат мгновенного напряжения фазы A , В²; N – количество отсчётов АЦП.

Действующие значения напряжений фаз B и C определяются аналогичным образом.

Для дискретизированного гармонического сигнала с количеством отсчётов N_S на период частоты F_0 действующее значение приближённо определяем с помощью усредняющего «скользящего окна» [9]:

$$U_{rms}[i] = \frac{2}{N_S} \sum_{j=i-S/2+2}^i |u[j]|,$$

где U_{rms} – среднее действующее значение напряжения, В, фаз A, B, C ; N_S – количество отсчётов (дискретизация на периоде частоты); i, j, S – порядковые номера отсчётов.

Для частоты $F_0 = 400$ Гц количество отсчётов сигнала за период $N_S = 80$ при частоте дискретизации 32 кГц.

Заданное номинальное фазное напряжение порогового значения, уставки U_0 формируется в цифровом модуле [9, 10], реализованном на базе технологии ПЛИС относительно Altera Cyclone IV (рис. 3), в диапазоне от 115,0 до 117,0 В пропорционально значениям фазного напряжения. Текущее среднее значение напряжения и заданное значение подаются на вход широтно-импульсного модулятора (ШИМ). На выходе ШИМ формируются прямоугольные импульсы, скважность которых γ прямо пропорциональна разности напряжений на двух входах ШИМ. Эти импульсы поступают в усилитель мощности, на выходе которого работающий в ключевом режиме транзистор периодически подключает выпрямленное напряжение подвозбудителя генератора к ОБВ.

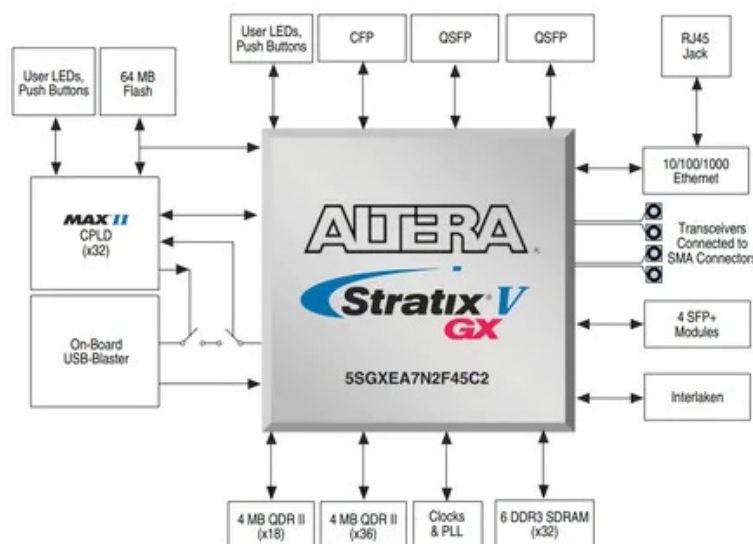


Рис. 3. Программируемая логическая интегральная схема Altera Cyclone IV

Таким образом, время питания ОВВ определяется величиной скважности импульсов напряжения, подаваемых на данную обмотку, и, следовательно, разностью входных напряжений ШИМ. Эта разность, в свою очередь, зависит от величины выходного напряжения синхронного генератора.

Работу ШИМ как формирователя прямоугольных импульсов напряжения скважности γ (в относительных значениях от максимальной частоты ШИМ) описываем уравнениями:

$$\begin{cases} \gamma = 0,05 & \text{при } \Delta U = \Delta U_{\min}; \\ \gamma = \gamma_0 + k_\gamma \Delta U & \text{при } \Delta U_{\min} < \Delta U < \Delta U_{\max}; \\ \gamma = 0,8 & \text{при } \Delta U = \Delta U_{\max}, \end{cases}$$

где $\Delta U_{\min}$ и $\Delta U_{\max}$ – значения минимальной и максимальной ошибок по нижнему и верхнему пороговым значениям, уставкам (определяются экспериментально); k_γ – коэффициент пропорциональности ошибки по напряжению скважности, 1/В; γ_0 – скважность ШИМ, соответствующая номинальному значению фазного напряжения.

Напряжение на ОВВ генератора определяется уравнением:

$$u_{\text{ВВ}} = \gamma u_{\text{ПВ}},$$

где $u_{\text{ВВ}}$ – напряжение, В, постоянного тока на обмотке возбуждения; $u_{\text{ПВ}}$ – напряжение, В, переменного тока на обмотке подвозбудителя; γ – коэффициент выпрямления.

При увеличении тока нагрузки генератора свыше двух номинальных значений U_0 интегральная составляющая в законе регулирования отключается. При этом по факту регулятор переходит из регулятора напряжения в регулятор тока. При входе генератора в режим симметричного трёхфазного короткого замыкания (КЗ), характеризуемый отсутствием перекосов напряжений и токов фаз, ток возбуждения возбудителя должен быть максимальным, соответственно и скважность должна быть максимальной.

Таким образом, алгоритм управления БРЗУ обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Контролирует величины:

$I_{\text{НАГР}}$ – ток нагрузки, А; $U_{\text{НАГР}}$ – напряжение в точке регулирования, В; f – частоту напряжения переменного тока в точке регулирования, Гц; dt – время переходного процесса, с.

2. Задаёт пороговые значения, уставки:

U_0 – уставка по номинальному фазному напряжению; $I_{\text{НАГР.МАКС}}$ – наибольший ток перегрузки при нормальном напряжении; $I_{\text{НАГР.КЗ}}$ – уставка по току КЗ; $U_{\text{ОВ.МАКС}}$ – верхний предел напряжения возбуждения.

3. Осуществляет регулирование по фазному напряжению при малом токе нагрузки (холостой ход).

4. Осуществляет регулирование по фазному напряжению при токе нагрузки $>0,1$ от перегрузочного, но меньше наибольшего перегрузочного и напряжении нагрузки $<0,4$ от уставки регулирования.

5. Осуществляет регулирование по току при токе нагрузки больше наибольшего перегрузочного и напряжении нагрузки $<0,4$ от уставки регулирования (режим КЗ).

6. Осуществляет регулирование по напряжению при токе нагрузки больше наибольшего перегрузочного и напряжении нагрузки $>0,4$ от уставки регулирования (режим перегрузки).

Заключение

Функциональная реализация блока регулирования, защиты и управления генератора трёхфазного переменного тока номинального напряжения 200/115 В переменной частоты от 360 до 800 Гц с применением пропорционально-интегрального-дифференциального

регулятора на базе технологии ПЛИС позволит добиться наилучшей точности регулирования, управления, обеспечить эффективную селективность защиты компонентов системы электропитания и потребителей (приёмников) электроэнергии, и вывести бортовую авиационную электроэнергетику ВС на новый технический уровень, присущий интеллектуальным транспортным системам.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Мусин С. М., Левин А. В., Харитонов С. А., Халютин С. П. и др. Электрический самолёт. Концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.
2. Жмуров Б. В. Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект автоматизации // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 1. С. 88–103.
3. Коптев А. Н., Яковенко Н. А. Теория и практика анализа, синтеза и реализации программ контроля и диагностирования блока регулирования, защиты и управления БРЗУ-115 системы электроснабжения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4(2). С. 400–405.
4. Мусин С. М., Калий В. А., Плотников А. В. Надёжность программных средств бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 145–153.
5. Халютин С. П., Давидов А. О., Жмуров Б. В. Электрические и гибридные самолёты: перспективы создания // Электричество. 2017. № 9. С. 4–16.
6. Zharkov M. A., Zotov L. S., Razinkin V. P., Atuchin V. V. Flying apparatus DC-DC starter-generator convertor based on switching capacitor structures Starting mode of three-stage brushless generator operation, *Electrical Engineering*, 2020, vol. 102, no. 2, pp. 643–650. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00900-y>
7. Демин И. О., Саблина Г. В. Исследование методов настройки ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1(31). С. 174–180.
8. Воронов П. Л. Особенности применения матриц преобразования и уравнения связи при анализе несимметричных повреждений // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 1. С. 27–37.
9. Luzgin L. A., Valiev V. E., Ismagilov F. R., Vavilov V. E. Modern methodology for the design of advanced electrical machines and electronics units based on FMEA concept. *International Review of Aerospace Engineering*, 2021, vol. 14, no. 6, pp. 326–337. <https://doi.org/10.15866/irease.v14i6.20632>
10. Varyukhin A. N., Zakharchenko V. S., Ismagilov F. R., Vavilov V. E. Conceptual design of electrical machines for a serial hybrid propulsion system of commuter airliner. *International Review of Aerospace Engineering*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 80–96. <https://doi.org/10.15866/irease.v14i2.19303>

References

1. Musin S. M., Levin A. V., Kharitonov S. A., Halyutin S. P. et al. *Ehlektricheskij samolyot. Kontseptsiya i tekhnologii [The Electric plane. The concept and technologies]*. Ufa, UGATU Publ., 2014, 388 p. (In Russ.)
2. Zhmurov B. V. Aircraft power supply system design process as an automation object. *Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 88–103. (In Russ.)
3. Koptev A. N., Yakovenko N. A. The theory and practice of the analysis, synthesis and realization of the control and diagnostics of electrical supply systems generator control unit GCU-115. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 4(2), pp. 400–405. (In Russ.)
4. Musin S. M., Kaliy V. A., Plotnikov A. V. Reliability of aircraft onboard equipment software. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40(351), pp. 145–153. (In Russ.)
5. Khalyutin S. P., Davidov A. O., Zhmurov B. V. Electric and hybrid aircraft development prospects. *Elektrichestvo*, 2017, no. 9, pp. 4–16. (In Russ.)

6. Zharkov M. A., Zotov L. S., Razinkin V. P., Atuchin V. V. Flying apparatus DC-DC starter-generator convertor based on switching capacitor structures Starting mode of three-stage brushless generator operation, *Electrical Engineering*, 2020, vol. 102, no. 2, pp. 643–650. <https://doi.org/10.1007/s00202-019-00900-y>
7. Demin I. O., Sablina G. V. Research of methods for setting parameters of the PID controller. *Automatics & Software Enginery*, 2020, no. 1(31), pp. 174–180. (In Russ.)
8. Voronov P. L. On using trasformation matrices and constraint equations for analysis of non-symmetric faults. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 27–37. (In Russ.)
9. Luzgin L. A. Valiev V. E. Ismagilov F. R. Vavilov V. E. Modern methodology for the design of advanced electrical machines and electronics units based on FMEA concept. *International Review of Aerospace Engineering*, 2021, vol. 14, no. 6, pp. 326–337. <https://doi.org/10.15866/irease.v14i6.20632>
10. Varyukhin A. N., Zakharchenko V. S., Ismagilov F. R., Vavilov V. E. Conceptual design of electrical machines for a serial hybrid propulsion system of commuter airliner. *International Review of Aerospace Engineering*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 80–96. <https://doi.org/10.15866/irease.v14i2.19303>

Информация об авторах

Мусин Сергей Миргасович, доктор технических наук, профессор, главный специалист, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, smusin@tdhc.ru

Калий Валерий Алексеевич, доктор технических наук, директор Обособленного конструкторского бюро, Уфимское агрегатное производственное объединение, Уфа, Россия, KalijVA@tdhc.ru

Authors information

Musin Sergey M., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Chief Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, smusin@tdhc.ru

Kalij Valery A., Doctor of Sciences (Engineering), Director of the Separate Design Bureau, Ufa Aggregate Production Association, Ufa, Russia, KalijVA@tdhc.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 14.06.2024; принята к публикации 21.06.2024.
The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 14.06.2024; accepted for publication 21.06.2024.

Обзорная статья
УДК 004.056

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ АВИАПРЕДПРИЯТИЯ

С. А. ГАРАНИН¹, А. Ю. КОНЬКОВ², А. Н. ШАРЫПОВ²

¹ *Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия*

² *Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обеспечения информационной безопасности в распределённых информационных системах (ИС) предприятий гражданской авиации (ГА) на примере информационно-аналитической системы мониторинга лётной годности воздушных судов (ИАС МЛГВС). Освещается спектр проблем безопасности, включая разнообразные виды кибератак, внутренних угроз и уязвимостей. Описаны методы обеспечения информационной безопасности, как традиционные (шифрование данных, многоуровневая аутентификация и авторизация, цифровые подписи и сертификаты), так и перспективные технологии: квантовая криптография, блокчейн-технологии и системы искусственного интеллекта. Проведён обзор перспектив развития методов защиты и показаны возможные пути повышения безопасности данных, а также потенциал инновационных технологий для создания более надёжных и безопасных ИС в ГА. На основе анализа даны рекомендации по мероприятиям для достижения необходимого уровня кибербезопасности как со стороны разработчика, так и со стороны администраторов системы.

Ключевые слова: гражданская авиация, воздушный транспорт, информационная система, кибербезопасность, защита данных, распределённые системы, аутентификация, методы шифрования, искусственный интеллект, блокчейн, квантовая криптография, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Гаранин С. А., Коньков А. Ю., Шарыпов А. Н. Тенденции в развитии методов защиты данных в распределённых информационных системах авиапредприятия // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 148–156.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF DATA PROTECTION METHODS IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS OF AIRCRAFT COMPANY

S. A. GARANIN¹, A. YU. KONKOV², A. N. SHARYPOV²

¹ *Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

² *The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract. The article deals with the issues of information security in distributed information systems of civil aviation enterprises on the example of information-analytical system of aircraft airworthiness monitoring. Covers a range of security issues, including various types of cyber attacks, internal threats and vulnerabilities. Ensuring information security includes analysis of the use of both traditional security methods, such as data encryption, multi-level authentication and authorization, digital signatures and certificates, and promising technologies: quantum cryptography, blockchain technologies and artificial intelligence systems. A review

of the prospects for the development of protection methods and possible ways to improve data security, as well as the potential of innovative technologies for creating more reliable and secure information systems in civil aviation is carried out. Based on the analysis, recommendations are provided on measures both on the part of the developer and on the part of system administrators necessary to achieve the required level of cybersecurity.

Keywords: civil aviation, air transport, information system, cybersecurity, data protection, distributed systems, authentication, encryption methods, artificial intelligence, blockchain, quantum cryptography, intelligent transport systems

For citation: Garanin S. A., Konkov A. Yu., Sharypov A. N. Trends in the development of data protection methods in distributed information systems of aircraft company, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 148–156. (In Russ.)

Введение

Информационная безопасность в интеллектуальных транспортных системах на авиапредприятиях (авиакомпания, завод-изготовитель или центр технического обслуживания и ремонта) является критически важным аспектом, напрямую влияющим практически на все направления их деятельности. Сложность ИС постоянно растёт и охватывает всё более широкий спектр задач и функций, от ведения складского и бухгалтерского учёта до управления полётами. С развитием технологий и цифровизации авиационной отрасли возникают новые вызовы в обеспечении безопасности хранения и передачи информации в распределённых ИС. Несмотря на ряд уже имеющихся решений и прилагаемых усилий, в данной сфере всё ещё существуют проблемы, такие как вирусы, взломы, DDoS-атаки, ошибки аутентификации, потеря и искажение данных. Решение этих проблем требует комплексного подхода, который включает в себя совершенствование технологий безопасности, обучение персонала, регулярное обновление систем безопасности и усиление мер по защите информационных ресурсов от разнообразных угроз. Это необходимо для обеспечения стабильности, надёжности и безопасности авиационных ИС.

Разработанная в ГосНИИ ГА информационно-аналитическая система мониторинга лётной годности воздушных судов (ИАС МЛГВС) обладает базовым функционалом, обеспечивающим безопасность данных [1]. Но в связи с тем, что система является в общем случае распределённой, т. е. её компоненты находятся на разных устройствах, серверах, а зачастую и разнесены по разным городам, существует проблема обеспечения необходимого уровня защиты при передаче и хранении рабочей информации. В состав ИАС МЛГВС входят пользовательские модули, устанавливаемые в авиакомпаниях, на заводах-изготовителях авиационной техники, в центрах технического обслуживания и государственных органах надзора, различающиеся в зависимости от места установки системы, требований к её функционалу и степени защищённости [2]. В связи с этим необходимо рассмотреть полный спектр методов защиты данных, причём не только реализованных на данный момент, но и перспективных для оперативного реагирования на возникающие проблемы кибербезопасности.

В ИАС МЛГВС, как и во многих других ИС, вся информация хранится в незашифрованном виде, что не является проблемой, так как и сама система и её база данных находятся в закрытом доступе на серверах предприятия. Для передачи какого-либо массива данных от одного элемента системы к другому производится обмен, основанный на передаче «обменных файлов», которые содержат информационные фрагменты и не представляют ценности по отдельности в случае их перехвата злоумышленниками [3]. Однако в некоторых случаях необходимо существенно увеличивать уровень кибербезопасности, и далее будут рассмотрены методы, которые можно для этого использовать.

Шифрование данных в распределённых системах

Одним из основных методов защиты, который используется повсеместно, является шифрование данных. Это процесс преобразования информации в непонятную для посторонних форму, чтобы она оставалась читаемой только для тех, кто имеет право на доступ [4]. Существует два основных типа алгоритмов шифрования:

Симметричные – один ключ используется как для шифрования, так и для расшифровки данных. Как пример можно привести алгоритмы AES, либо ГОСТ 28147-89. Описать такой алгоритм можно в виде:

- шифрование – $m \rightarrow E(k, m)$, где k – ключ, m – сообщение;
- расшифровка – $D(k, E(k, m)) \rightarrow m$.

Асимметричные используют пару ключей: публичный и приватный. Публичный ключ используется для шифрования, а приватный – для расшифровки. В качестве примера можно привести RSA. Описать такой алгоритм можно в виде:

- шифрование – $m \rightarrow C = E_{\text{pub}}(m)$, где E_{pub} – функция шифрования с использованием публичного ключа;
- расшифровка – $D_{\text{priv}}(C) \rightarrow m$, где D_{priv} – функция расшифровки с использованием приватного ключа.

Несмотря на высокую надёжность большинства алгоритмов шифрования, важно правильно подбирать именно те, которые будут отвечать текущим задачам и регулярно обновлять ключи для максимальной защиты от киберугроз. В ИАС МЛГВС реализована возможность обмениваться данными в зашифрованном виде, используя разработанную технологию «криптоТуннеля», и при передаче данных между субъектами системы администраторам целесообразно использовать данный функционал.

Использование цифровых подписей и сертификатов безопасности

Если шифрование направлено в основном на защиту данных от прочтения, то для обеспечения и повышения безопасности передачи информации и защиты от подделок и изменений данных в процессе передачи используются цифровые подписи и сертификаты безопасности.

Цифровая подпись представляет собой электронный аналог обычной подписи, подтверждающий авторство сообщения или документа. Она создаётся с использованием криптографических алгоритмов и ключей. Исходное сообщение хешируется, например, используя алгоритм SHA-256 с использованием хеш-функции $H = \text{hash}(m)$, создавая уникальный хеш-код. Процесс хеширования необратим. Полученный хеш-код шифруется с использованием закрытого ключа отправителя (секретного уникального набора символов, который формируется криптопровайдером), формируя цифровую подпись. Цифровая подпись в свою очередь прикрепляется к исходному сообщению.

Процесс проверки цифровой подписи происходит в обратном порядке. От отправителя должен быть получен сертификат безопасности, содержащий публичный ключ, с помощью которого происходит расшифровка цифровой подписи для получения хеш-кода. Из полученного сообщения формируется новый хеш-код, и его сравнение с полученным используется для подтверждения целостности и подлинности сообщения.

Таким образом, хеширование обеспечивает целостность данных, а цифровая подпись подтверждает их авторство и неизменность после подписания. Эти методы особенно востребованы субъектами системы в тех случаях, когда основной упор делается не просто на безопасную передачу информации между отправителем и получателем, а именно когда получатель должен быть абсолютно уверен в том, что данные были отправлены из проверенного источника и гарантировано не изменялись во время передачи [5].

Многоуровневая аутентификация и авторизация

Наиболее часто в ИС на авиапредприятиях используются простые и хорошо зарекомендовавшие себя методы защиты от несанкционированного доступа, такие как ввод логина и/или пароля, биометрическая авторизация или использование ключей. Например, может быть реализовано несколько таких механизмов – по умолчанию всегда запрашивается логин и пароль пользователя, если этого уровня безопасности недостаточно, то есть возможность подключить авторизацию по отпечатку пальца. В зависимости от конфигурации оборудования и сетевых настроек также есть возможность привязки программного обеспечения к конкретным рабочим местам. Но с увеличением количества пользователей системы пропорционально растёт и требование к повышению защищённости. Одним из лучших решений является переход от обычной к многоуровневой аутентификации.

Такая форма аутентификации требует от пользователей предоставления нескольких форм идентификации для доступа к системе. Получается дополнительный слой защиты, обеспечивающий безопасность даже в случае компрометации одного из методов аутентификации. Основные запрашиваемые параметры образно можно представить в виде вопросов.

- *Что знаете? (знание).* То, что пользователь знает, например, пароль или секретный вопрос.
- *Что имеет? (владение).* То, что пользователь имеет физически, например, ключ или устройство аутентификации.
- *Кто вы? (личность).* То, что определяет личность пользователя, например, отпечаток пальца или голосовой отпечаток.

Практически во всех случаях при установке модулей ИАС МЛГВС администраторам рекомендуется использовать именно многоуровневую аутентификацию. В качестве вариантов можно выбрать:

Биометрический скан + пароль. Для доступа необходимо просканировать отпечаток пальца, а затем ввести пароль.

Аппаратный токен + пароль. Пользователь использует физическое устройство (например, USB-ключ) в сочетании с паролем для входа в систему.

После успешной аутентификации происходит авторизация, что означает предоставление доступа к определенным ресурсам или функциям в системе в зависимости от уровня разрешений и прав пользователя.

Технологии защиты от DDoS-атак

На данный момент большая часть функционала ИАС МЛГВС работает в виде web-приложений и web-сервисов. В связи с этим DDoS-атаки (атаки на отказ обслуживания) могут привести к нарушению нормальной работы систем, а иногда и к полной остановке в работе. Необходимо использовать методы, позволяющие максимально обезопасить систему от такого вида киберугроз.

Технологии фильтрации трафика, такие как IngressFiltering, EgressFiltering, TrafficScrubbing, RateLimiting, Anomaly-BasedDetection, решают вопросы анализа и управления сетевым трафиком для идентификации и блокировки потенциально вредоносных или нежелательных пакетов данных, поступающих в сеть или проходящих через неё [6]. Если этого недостаточно, возможно использовать контент-доставочные сети (CDN), которые помогают распределить трафик и обработку запросов, снижая нагрузку на серверы, и повышают устойчивость системы в целом.

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для обнаружения угроз

Все решения и их анализ, приведённые выше, основаны на самых распространённых и положительно себя зарекомендовавших методах обеспечения кибербезопасности, которые призваны обеспечивать необходимый уровень защиты данных от таких же «повседневных» не-

гативных факторов. Но бурное развитие IT-технологий ведёт к возникновению новых, ранее не существовавших угроз. Поэтому сейчас разработчикам важно уделять максимально возможное внимание внедрению в функционал систем перспективных защитных технологий.

Ныне в сфере кибербезопасности на первый план выходят искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение. Они могут на порядок повысить уровень безопасности при передаче данных в ИС, позволяют создавать интеллектуальные подсистемы, способные автоматически обнаруживать и предсказывать угрозы, что помогает оперативно реагировать на потенциальные риски [7]. Системы обнаружения вторжений (Intrusion Detection Systems) и системы предотвращения вторжений (Intrusion Prevention Systems) используют методы машинного обучения для анализа сетевого трафика и обнаружения аномалий, указывающих на потенциальные кибератаки. Они же способны анализировать накопленные массивы данных о кибератаках и уязвимостях, чтобы предсказывать угрозы и способствовать принятию превентивных мер. ИИ способен реагировать на угрозы и кибератаки, уведомлять об этом администраторов систем безопасности или запускать процессы для блокирования атаки.

Технологии ИИ позволяют анализировать большие объёмы данных в реальном времени, выявляя потенциальные угрозы и мгновенно и оперативно реагируя на них. Применение методов обучения с подкреплением позволяет системам самостоятельно улучшать свои способности в обнаружении и предотвращении угроз путём взаимодействия с окружающей средой и получения обратной связи [8].

Анализ больших данных, в том числе такие рутинные действия, как сбор и обработка данных из различных источников, включая журнал событий, данные о сетевом трафике, информацию об устройствах и приложениях для выявления потенциальных уязвимостей, также тесно связан с технологиями ИИ.

Использование блокчейн-технологий для обеспечения целостности данных

Помимо непосредственно защиты данных существует ещё одна задача – создать единую систему передачи и хранения информации на основе блокчейн-технологий.

Блокчейн является инновационной технологией, позволяющей создавать распределённые и надёжные базы данных, которые невозможно изменить без согласия всех участников сети. В большинстве случаев информационные системы на авиапредприятиях (например Эрлан, АвиаБит, AMOS, AMASIS) используют различные виды баз данных, организованных на локальных серверах предприятия, либо, в редких случаях, на удалённых «облачных» сервисах. Такой способ организации требует наличия дорогостоящих решений по созданию систем резервного копирования и хранения данных. Но даже постоянное резервирование не даёт гарантий в том, что данные не будут в какой-то момент изменены злоумышленниками или утрачены вследствие, например, ошибки оператора. Как раз эти задачи по передаче и хранению информации призвана решить технология блокчейн в области обеспечения безопасности данных.

На примере ИАС МЛГВС проведём анализ преимуществ, которые даст внедрение в информационные процессы этой технологии.

Наиболее важным механизмом блокчейна можно назвать «децентрализацию». Информация хранится в виде блоков на множестве устройств в сети, и чтобы изменить данные, необходимо изменить информацию на большинстве этих устройств одновременно, что делает систему устойчивой к любым нежелательным манипуляциям. Один из инструментов, обеспечивающих децентрализацию в блокчейне – консенсус-протоколы, используемые для достижения согласия между участниками относительно состояния системы или порядка событий. Наиболее распространённые консенсус-протоколы: Proof of Work, Proof of Stake, Delegated Proof of Stake, Proof of Authority, Practical Byzantine Fault Tolerance, Raft [9]. Каждый из них имеет свои преимущества

и недостатки, и выбор зависит от конкретных потребностей блокчейн-системы: от скорости транзакций до степени децентрализации и общей безопасности сети.

Блокчейн имеет такие преимущества, как использование хеш-функций и цифровых подписей. Каждый блок в блокчейне содержит данные транзакций и ссылку на предыдущий блок в цепочке. Хеш генерируется на основе содержимого, включая хеш предыдущего блока. Любое изменение данных в блоке приведёт к изменению его хеша, что сделает его невалидируемым и несоответствующим остальной цепочке. Цифровые подписи в свою очередь используются для подтверждения транзакций. Каждая транзакция подписывается отправителем с использованием его закрытого ключа. Получатель может затем использовать открытый ключ для проверки подписи и подлинности транзакции. При добавлении нового блока в цепочку он подписывается ключом участника или узла, который создал этот блок. Это подтверждает, что блок был создан этим узлом и обеспечивает аутентификацию этого блока в сети.

Использование блокчейна обеспечит прозрачность, невозможность фальсификации, поможет предотвратить манипуляции с данными, сохранять их целостность и доверие к ним всех участников системы [10]. В случае успешной реализации этого функционала в ИАС МЛГВС процессы хранения, пересылки данных, а также проверка их аутентичности будут существенно упрощены.

Применение квантовой криптографии в контексте безопасности информационных систем

На сегодняшний день квантовые компьютеры не широко распространены, но могут решать задачи, с которыми не справятся даже самые мощные классические суперкомпьютеры. Это означает, что, например, все методы классического шифрования могут быть расшифрованы с помощью квантовых вычислений. Для противодействия деструктивным факторам уже разрабатывается адекватный метод защиты, а именно – квантовая криптография. Эта технология представляет собой направление в обеспечении безопасности передачи данных, основанное на принципах квантовой механики, что позволяет создавать и использовать такие методы шифрования, которые будут устойчивы к взлому как с применением обычных средств, так и с помощью квантовых вычислений.

В основе квантовой криптографии лежит принцип неопределённости Гейзенберга, утверждающий, что невозможно одновременно точно измерить определённые пары физических величин, например, положение и импульс частицы. Это означает, что чем точнее измерение одной величины, тем менее точно измерение другой. В контексте квантовой криптографии принцип неопределённости играет важную роль, так как он имеет прямое отношение к обнаружению перехватов в процессе передачи информации [11].

Например, при попытке отследить состояние квантовых частиц при передаче для перехвата ключа, злоумышленник изменит их состояние, что приведёт к нарушению целостности передаваемой информации и будет обнаружено получателем.

Рассмотрим основные методы квантовой криптографии.

С использованием одиночных фотонов. В этом методе информация кодируется в состояниях одиночных фотонов (квантов), которые затем передаются по квантовым каналам связи. Принципы квантовой механики, такие как принцип невозможности клонирования и наблюдения без вмешательства, позволяют обнаруживать любые попытки прослушивания или изменения передаваемой информации.

Протокол квантового ключа. Использует квантовые сигналы для создания общего секретного ключа между двумя удалёнными сторонами, который можно использовать для шифрования и дешифрования данных [12]. Наиболее известными такими протоколами являются:

- BB84 (предложен Чарльзом Беннеттом и Жильем Брассаром), позволяет двум участникам безопасно обмениваться квантовым ключом через небезопасный канал связи, который может быть подвергнут перехвату или прослушиванию.

- E91 (предложен Артуром Экертом), использует квантовые состояния, созданные с использованием пар энтанглированных частиц для безопасного распределения ключей между двумя сторонами. Энтанглированные состояния связывают две частицы таким образом, что изменения в одной частице немедленно отражаются на другой, независимо от расстояния между ними.

- SARG04 (Six-state protocol, Acín-Ribordy-Gisin-Sangouard), основан на использовании шести ортогональных состояний квантовых битов, что является большим по сравнению с некоторыми стандартными протоколами, такими как BB84, и позволяет увеличить эффективность и безопасность передачи ключа.

Квантовая телепортация. Это процесс передачи состояния квантовой системы от одного места к другому с использованием предварительно согласованных квантовых бит (которые не могут быть скопированы или перехвачены). Хотя квантовая телепортация не используется напрямую для шифрования данных, она может быть использована для безопасного распределения информации, не подверженной перехвату.

Квантовые точки доступа. Идея метода связана с созданием «квантовых узлов» или точек доступа, которые могут выполнять функции шифрования, дешифрования, аутентификации и других операций с данными с использованием квантовых принципов.

Квантовая аутентификация. Создание уникальных и невозможных для воспроизведения «квантовых отпечатков» или ключей, которые могут быть использованы для проверки подлинности устройства или пользователя. Эти квантовые отпечатки могут быть связаны с уникальными квантовыми свойствами, такими как фотоны или квантовые состояния.

Квантовая криптография представляет собой перспективное направление в обеспечении безопасности ИС, однако на данный момент эта технология находится на стадии разработки. В случае дальнейшего развития она станет основой для создания совершенно новых и гораздо более надёжных методов защиты данных от взлома, в том числе при использовании квантовых компьютеров.

Заключение

В настоящем обзоре рассмотрены основные направления в развитии технологий и методов обеспечения защиты данных в ИС авиапредприятий. На примере ИАС МЛГВС показаны актуальные проблемы безопасности, описаны перспективы применения новых технологий и оценена их эффективность.

Показано, что существующие разработки в области кибербезопасности, включённые в систему, являются крайне важным и необходимым функционалом, но с развитием технологий требуют непрерывного совершенствования, так как потенциальные атаки с использованием квантовых технологий и систем ИИ продолжают оставаться вызовами для информационной безопасности, а отвечающие уровню этих угроз методы защиты, такие как квантовая криптография, блокчейн и машинное обучение, требуют дополнительных исследований и ресурсов для практического применения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Кирпичев И. Г., Гаранин С. А. Интеграция предприятий авиационной промышленности в единое информационное пространство сопровождения эксплуатации авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. № 1(312). С. 169–174.

2. Шапкин В. С., Брусникин В. Ю., Глухов Г. Е., Черников П. Е., Гаранин С. А., Камзолов С. К. Современные подходы к проблемам защиты изделий авиационной техники от фальсификации и противодействия незаконному обороту продукции авиационной промышленности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 22. С. 59–68.
3. Брусникин В. Ю., Гаранин С. А., Глухов Г. Е. Оптимизация процесса обмена информацией между авиапредприятиями в рамках единого информационного пространства // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 17(328). С. 27–33.
4. Жук А. П., Жук Е. П., Лепёшкин О. М., Тимошкин А. И. Защита информации. 2-е изд. Москва: Издательский Центр РИОР, 2015. 392 с.
5. Гаранин С. А., Глухов Г. Е., Брусникин В. Ю., Черников П. Е., Карапетян А. Г., Коваль С. В. Об алгоритмах обработки информации при мониторинге жизненного цикла и оценке аутентичности компонентов воздушного судна // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 30–40.
6. Остапенко Г. А., Бурса М. В., Попов Е. А., Вяхирева С. С. Информационные ресурсы инновационных проектов: риск-моделирование в условиях DDoS-атак // Информация и безопасность. 2012. Т. 15. № 3. С. 345–352.
7. Гаранин С. А., Коньков А. Ю., Брусникин В. Ю., Шарыпов А. Н., Коваль С. В. Системы искусственного интеллекта в рамках современных задач гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 38. С. 84–91.
8. Червяков Н. И., Евдокимов А. А., Галушкин А. И., Лавриненко И. Н., Лавриненко А. В. Применение искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов в криптографии. Москва: Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2012. 280 с.
9. Федотова В. В., Емельянов Б. Г., Типнер Л. М. Понятие блокчейн и возможности его использования // EuropeanScience. 2018. № 1(33). С. 40–48.
10. Ищукова Е. А., Панасенко С. П., Романенко К. С., Салманов В. Д. Криптографические основы блокчейн-технологий. Москва: ДМК Пресс, 2022. 302 с.
11. Квантовая криптография: идея и практика / Под ред. С. Я. Килина, Д. Б. Хорошко, А. П. Низовцева. Минск: Издательский дом «Белорусская наука», 2007. 391 с.
12. Арбеков И. М. Элементарная квантовая криптография: Для криптографов, не знакомых с квантовой механикой. Москва: ЛЕНАНД, 2022. 168 с.

References

1. Kirpichev I. G., Garanin S. A. Integration of the aviation industry into the common information space tracking operation of aircraft. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2011, no. 1(312), pp. 169–174. (In Russ.)
2. Shapkin V. S., Brusnikin V. Yu., Glukhov G. E., Chernikov P. E., Garanin S. A., Kamzolov S. K. Modern approaches to the problems of protection of the products of aviation technology from tampering and illegal distribution of products of aviation industry. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 22, pp. 59–68. (In Russ.)
3. Brusnikin V. Yu., Garanin S. A., Glukhov G. E. Optimization of the process of exchange of information among aviation enterprises, within the unified information space. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2017, no. 17(328), pp 27–33. (In Russ.)
4. Zhuk A. P., Zhuk E. P., Lepyoshkin O. M., Timoshkin A. I. *Zashchita informatsii [Information security]*. Ed. 2. Moscow, Izdatel'skiy Tsentr RIOR Publ., 2015, 392 p. (In Russ.)
5. Garanin S. A., Glukhov G. E., Brusnikin V. Yu., Chernikov P. E., Karapetyan A. G., Koval S. V. About information processing algorithms when monitoring a life cycle and assessing the authenticity of aircraft components. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 31, pp. 30–40. (In Russ.)
6. Ostapenko G. A., Bursa M. V., Popov E. A., Vyakhireva S. S. Informatsionnye resursy innovatsionnykh proektov: risk-modelirovanie v usloviyakh DDoS-atak. *Informatsiya i bezopasnost'*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 345–352. (In Russ.)

7. Garanin S. A., Konkov A. Yu., Brusnikin V. Yu., Sharypov A. N., Koval S. V. Development of artificial intelligence systems in the framework of modern civil aviation tasks. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 38, pp. 84–91. (In Russ.)
8. Chervyakov N. I., Evdokimov A. A., Galushkin A. I., Lavrinenko I. N., Lavrinenko A. V. *Primenenie iskusstvennykh neyronnykh setej i sistemy ostatochnykh klassov v kriptografii [Application of artificial neural networks and residual class systems in cryptography]*. Moscow, Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura" Publ., 2012, 280 p. (In Russ.)
9. Fedotova V. V., Emelyanov B. G., Tipner L. M. The concept of blockchain and the possibility of using it. *European Science*, 2018, no. 1(33), pp. 40–48. (In Russ.)
10. Ishchukova E. A., Panasenko S. P., Romanenko K. S., Salmanov V. D. *Kriptograficheskie osnovy blokchejn-tekhnologij [Cryptographic foundations of blockchain technologies]*. Moscow, DMK Press Publ., 2022, 302 p. (In Russ.)
11. *Kvantovaya kriptografiya: ideya i praktika*. Ed. S. Ya. Kilin, D. B. Khoroshko, A. P. Nizovtsev. Minsk, Izdatel'skij dom "Belorusskaya nauka" Publ., 2007, 391 p.
12. Arbekov I. M. *Ehlementarnaya kvantovaya kriptografiya: Dlya kriptografov, ne znakomykh s kvantovoj mekhanikoj [Elementary quantum cryptography: for cryptographers not familiar with quantum mechanics]*. Moscow, LENAND Publ., 2022, 168 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Гаранин Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, garanins@mail.ru

Коньков Александр Юрьевич, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, konkov@mlgvs.ru

Шарыпов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, ведущий инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, sharypov@mlgvs.ru

Authors information

Garanin Sergey A., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, garanins@mail.ru

Konkov Aleksandr Yu., Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, konkov@mlgvs.ru

Sharypov Andrey N., Candidate of Sciences (Engineering), Lead Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, sharypov@mlgvs.ru

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 21.05.2024.
The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 21.05.2024.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-61476 от 24 апреля 2015 г.

Подписано в печать 08.07.2024

Печать офсетная
17,8 усл. печ. л.

Формат 60x84 1/8
Заказ № 24-35ж

12,1 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО «Типография Миттель Пресс»

e-mail: mittelpress@mail.ru

Автор вёрстки: Михеева А. В.