

Том 27, № 06, 2024

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 27, No. 06, 2024

Издается с 1998 г.

Москва
2024

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, д.т.н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Боев С.Ф., проф., д. т. н., д. э. н., генеральный директор Межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, проф., д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Желтов С.Ю., заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, профессор, д. т. н., первый заместитель генерального директора ГосНИИАС, Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

Махутов Н.А., член-корреспондент РАН, профессор, д. т. н., г. н. с. ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Ченцов А.Г., член-корреспондент РАН, проф., д. ф.-м. н., г. н. с. Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

Чернышев С.Л., академик РАН, профессор, д. ф.-м. н., вице-президент РАН, научный руководитель ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д. т. н., первый заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хянань, Китай;

Франческа де Кресченцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, Транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиации, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Editorial Board

- Editor-in-Chief:** *Boris P. Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-Chief:** *Vadim V. Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana V. Naumova*, Associate Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina O. Poleshkina, Associate Professor, Doctor of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Chief Editorial Board:

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vypel", Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey Y. Zheltov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Nikolay A. Makhutov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, prof., Doctor of Science, Principal Researcher, FSBIS, Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Aleksander G. Chentsov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, prof., Doctor of Science, Principal Researcher, Institute of Mathematics and Mechanics, named after N.N. Krasovsky, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

Sergey L. Chernishov, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, Vice-President, Russian Academy of Sciences, Academic Adviser, National Research Center "Zhukovsky Institute", Moscow, Russia;

Vasily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Němec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акинишин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президиуме РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Васильев О.В., проф., д. т. н., г.н.с. ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Вышинский В.В., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татарinov В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Oleg V. Vasiliev, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guziy, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Alexandr V. Poltavsky, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Aghayev N.B., Nazarli D.Sh. Modelling of non-scheduled air transportation time series based on ARIMA	8
Машошин О.Ф., Гусейнов Г., Засухин А.С. Методика диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей с применением рекуррентных нейронных сетей (RNN) и длинно-краткосрочной памяти (LSTM)	21
Ogunwole B.I., Kutepova O.S. Integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions	42
Пенкина В.А. Механизмы государственной поддержки обеспечения комплексного развития авиатранспортной системы и региональных маршрутных сетей страны	56

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Петров Ю.В., Семакова М.В., Медведева Н.Н., Угренинов В.Г. Экспериментальные исследования влияния гироскопической системы демпфирования на аэроупругие характеристики модели крупногабаритного летательного аппарата с двигателями на упругих пилонах под крылом	72
Санько А.А., Ветошкин В.А., Ивановская Е.Л. Натурный стенд для исследований алгоритмов навигации и фильтрации бесплатформенной навигационной системы с использованием среды Matlab- Simulink	82

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Aghayev N.B., Nazarli D.Sh.

Modelling of non-scheduled air transportation time series based on ARIMA 8

Mashoshin, O.F., Huseynov, H., Zasukhin, A.S.

Methodology for diagnosing the technical condition of aviation gas turbine engines using recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory networks (LSTM) 21

Ogunwole B.I., Kutepova O.S.

Integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions 42

Penkina V.A.

The mechanisms of state support for the integrated development of the country's air transportation system and regional route networks 56

MECHANICAL ENGINEERING

Petrov Y.V., Semakova M.V., Medvedeva N.N., Ugreninov V.G.

Experimental studies of the influence of a gyroscopic damping system on the aeroelastic characteristics of a large aircraft model with elastic pylon-mounted engines under the wing 72

Sanko A.A., Vetoshkin V.A., Ivanovskaya E.L.

A full-scale simulator for research of navigation and filtering algorithms of a strapdown navigation system using the Matlab-Simulink environment 82

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-8-20

Modelling of non-scheduled air transportation time series based on ARIMA

N.B. Aghayev^{1,2}, D.Sh. Nazarli¹

¹*National Aviation Academy, Baku, Republic of Azerbaijan*

²*Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan Institute of Information Technology, Baku, Republic of Azerbaijan*

Abstract: Forecasting non-scheduled air transportation demand is essential for effective resource allocation, operational planning, and decision-making. In this paper, the use of the ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) model for forecasting non-scheduled air transportation is explored. The ARIMA model is a widely employed time series forecasting technique which combines autoregressive (AR), differencing (I), and moving average (MA) components. It has been successfully applied to various fields and can be adapted to capture the patterns and trends in non-scheduled air transportation data. To forecast non-scheduled air transportation demand, historical data, including relevant variables are firstly collected. The data are processed by identifying and addressing any missing values, outliers, or trends that could affect the model's performance. Next, the ARIMA model is applied to the pre-processed data, utilising techniques such as model identification, parameter estimation, and model diagnostics. The ARIMA model captures the relationships between past observations and uses them to predict future demand for non-scheduled air transportation. The forecasting results from the ARIMA model provide insights into expected demand levels, peak periods, and potential fluctuations in non-scheduled air transportation. These forecasts enable decision-makers to optimise resource allocation, schedule aircraft availability, and enhance operational efficiency. However, it is important to note that the accuracy of ARIMA forecasts depends on various factors, including the quality and representativeness of the data, the appropriate selection of model parameters, and the stability of underlying patterns in the time series data. Regular model evaluation and refinement are crucial in maintaining forecasting accuracy.

Key words: non-scheduled air transportation, time series analysis, ARIMA, statistical analysis, optimal model, forecasting, autoregressive model.

For citation: Aghayev, N.B., Nazarli, D.Sh. (2024). Modelling of non-scheduled air transportation time series based on ARIMA. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-8-20

Моделирование временных рядов нерегулярных воздушных перевозок на основе ARIMA

Н.Б. Агаев^{1,2}, Д.Ш. Назарли¹

¹*Национальная авиационная академия, г. Баку, Азербайджанская Республика*

²*Институт информационных технологий Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика*

Аннотация: Прогнозирование спроса на нерегулярные авиаперевозки имеет важное значение для эффективного распределения ресурсов, оперативного планирования и принятия решений. В этой статье мы исследуем использование модели ARIMA (авторегрессивное интегрированное скользящее среднее) для прогнозирования нерегулярных

авиаперевозок. Модель ARIMA – это широко используемый метод прогнозирования временных рядов, который сочетает в себе компоненты авторегрессии (AR), разности (I) и скользящего среднего (MA). Он успешно применяется в различных областях и может быть адаптирован для выявления закономерностей и тенденций в данных о нерегулярных авиаперевозках. Для прогнозирования спроса на нерегулярные авиаперевозки сначала собираются исторические данные, включая соответствующие переменные. Данные предварительно обрабатываются, выявляются и устраняются любые пропущенные значения, выбросы или тенденции, которые могут повлиять на производительность модели. Затем к предварительно обработанным данным применяется модель ARIMA, при этом используются такие методы, как идентификация модели, оценка параметров и диагностика модели. Модель ARIMA фиксирует взаимосвязи между прошлыми наблюдениями и использует их для прогнозирования будущего спроса на нерегулярные авиаперевозки. Результаты прогнозирования модели ARIMA дают представление об ожидаемых уровнях спроса, пиковых периодах и потенциальных колебаниях нерегулярных авиаперевозок. Эти прогнозы позволяют лицам, принимающим решения, оптимизировать распределение ресурсов, планировать доступность самолетов и повышать эксплуатационную эффективность. Однако важно отметить, что точность прогнозов ARIMA зависит от различных факторов, включая качество и репрезентативность данных, соответствующий выбор параметров модели и стабильность основных закономерностей в данных временных рядов. Регулярная оценка и уточнение модели имеют решающее значение для поддержания точности прогнозирования.

Ключевые слова: нерегулярные авиаперевозки, анализ временных рядов, ARIMA, статистический анализ, оптимальная модель, прогнозирование, авторегрессионная модель.

Для цитирования: Агаев Н.Б., Назарли Д.Ш. Моделирование временных рядов нерегулярных воздушных перевозок на основе ARIMA // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-8-20

Introduction

Non-scheduled air transportation, also known as charter or on-demand flights, is characterised by a flexible and responsive operational model. Unlike scheduled flights, which adhere to fixed timetables, non-scheduled flights are tailored to meet specific demands, making them highly variable and subject to dynamic changes. Time series methods play a crucial role in the non-scheduled air transportation field, where operations are often dynamic and subject to various external factors. These methods involve analysing and forecasting data points collected over time to make qualified decisions on future trends and patterns. Currently, passenger flow prediction methods are based on historical data, including time-series methods. Time series methods, such as ARIMA, SARIMA (Seasonal ARIMA), or even more advanced models, can be applied to historical data on passenger counts, booking trends, and other relevant metrics. Forecasting demand is essential for optimising flight schedules, resource allocation, and ensuring adequate capacity to meet customer needs. Several methods have been used for scheduled and non-scheduled air passenger forecasting, including second-degree polynomial [1–5], the autoregressive integrated moving average (ARIMA) mod-

el, and the seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) model [6–9]. The prediction of civil aviation passenger transportation based on the ARIMA model has been investigated by researchers [10]. Forecasting air passengers using a mixture of local expert models and related methods in this field has been implemented in this industry [11]. According to the theory of time-series analysis, the ARIMA model is considered optimal for the prediction and analysis of stationary time series, and the passenger flow data is generally a nonstationary series that needs to be smoothed by difference. The differential autoregressive moving average model (ARIMA) and other related works are being used to predict passenger flow in the several papers. [12–14].

Basing on the facts mentioned above, it can be stated that the ARIMA is the best choice model for calculations in non-scheduled passenger air transportation because:

- The ARIMA model better approximates random processes [15, 16];
- The ARIMA model gives better results in inertial systems (in these systems, each situation depends on the previous situation) [17, 18].

Problem statement

In this paper, the time series of non-scheduled passenger air transportation was modeled based on the ARIMA model, and the forecasting results for the relevant period were obtained. Since the process of irregular air transportation is random, it is considered more necessary to forecast with autoregressive models than trend models in order to obtain more optimal forecasting results.

Methods and Methodology

The differential autoregressive moving average model (ARIMA) is an important method for studying time series. In ARIMA (p, d, q) , p is the number of autoregressive items, q is the moving average item number, and d is the number of differences made to make it a stationary sequence. The ARIMA (p, d, q) model is an extension of the ARMA (p, q) model.

To make calculations, we write the ARIMA model in the following form:

$$Y_t = y_t + z_t, \quad (1)$$

where, y_t is trend and z_t is deviation.

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p}, \quad (2)$$

$$z_t = \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} & \sum_{t=1}^N Y_{t-1}^2 & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} \bar{Y}_{t-1} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} \bar{Y}_{t-1} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} \bar{Y}_{t-p} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} \bar{Y}_{t-p} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p}^2 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-1} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-p} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Considering expressions (6) and (7) in formula (5), unknown coefficients are found.

The vector $\varphi (c, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p)$ is a $(p + 1)$ dimensional vector.

The vector ε_t is a vector of random deviations determined after the trend model is determined. In the first approach, the elements of this vector are defined as the difference between the actual data and the trend model. In this approach, since the vector ε_t is expressed by a linear model, it is calculated by a formula similar to formula (5). The formulae are not given in the article so as not to repeat them.

The method of least squares is applied to find the unknown coefficients. For this, the following issue should be resolved:

$$\sum_{t=1}^N [(\bar{Y}_t - Y_t)]^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Here, $\bar{Y}_t$ is the actual data, Y_t is the calculation results using the (1) formula, and N is the number of data included in the research (by months), c is the constant, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p, \theta_1, \theta_2, \theta_q$ is the coefficient, ε_t is the white noise sequence, p is the autoregressive order, and q is the moving average order.

The solution to problem (4) is reduced to the following matrix equation:

$$A\varphi = B. \quad (5)$$

A is a $(p + 1) -$ dimensional square symmetric matrix, the elements of which are as follows: p is a number with plural signs, and when a_{11} is added, the measure is $(p + 1) \cdot (p + 1)$.

Experimental results

First of all, statistical data for non-scheduled passenger air transportation were collected to build the calculation model. These data are presented in Figure 1. As it can be seen from Figure 1, the data covers the period from January 1,

2020, to June 30, 2024, a total of 54 months. Calculations were made using the statistical data of the mentioned periods, and forecasting values for the months of July–December 2024 were obtained based on the ARIMA model. The statistical data used in the construction of the model are based on the statistical indicators provided by Heydar Aliyev International Airport.

Figure 2 shows the autocorrelation function for statistical data on non-scheduled passenger air transportation. It can be seen from here that calculations will be made according to formula (2), taking into account ($p = 3$) in the ARIMA model.

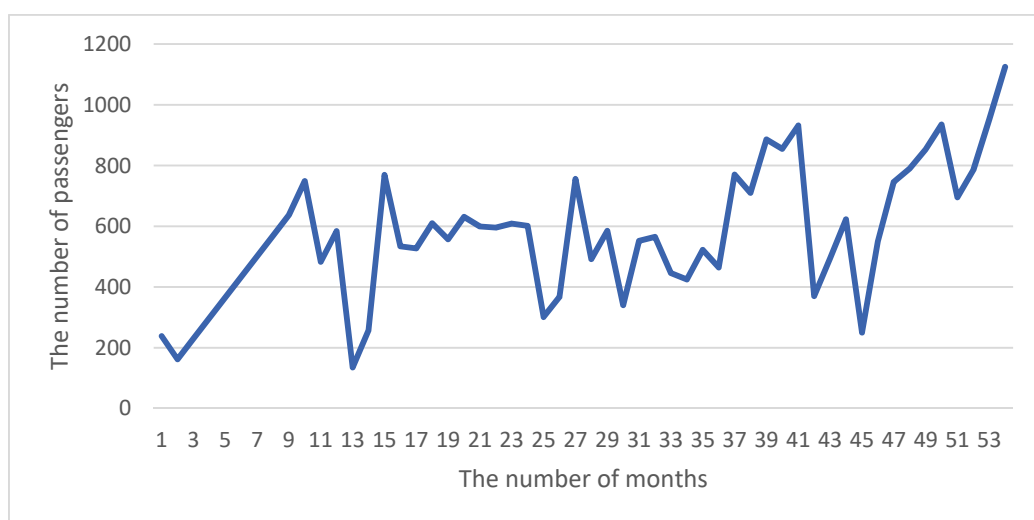


Fig. 1. Monthly dynamics of non-scheduled passenger air transportation from Heydar Aliyev International Airport (Baku/Azerbaijan)

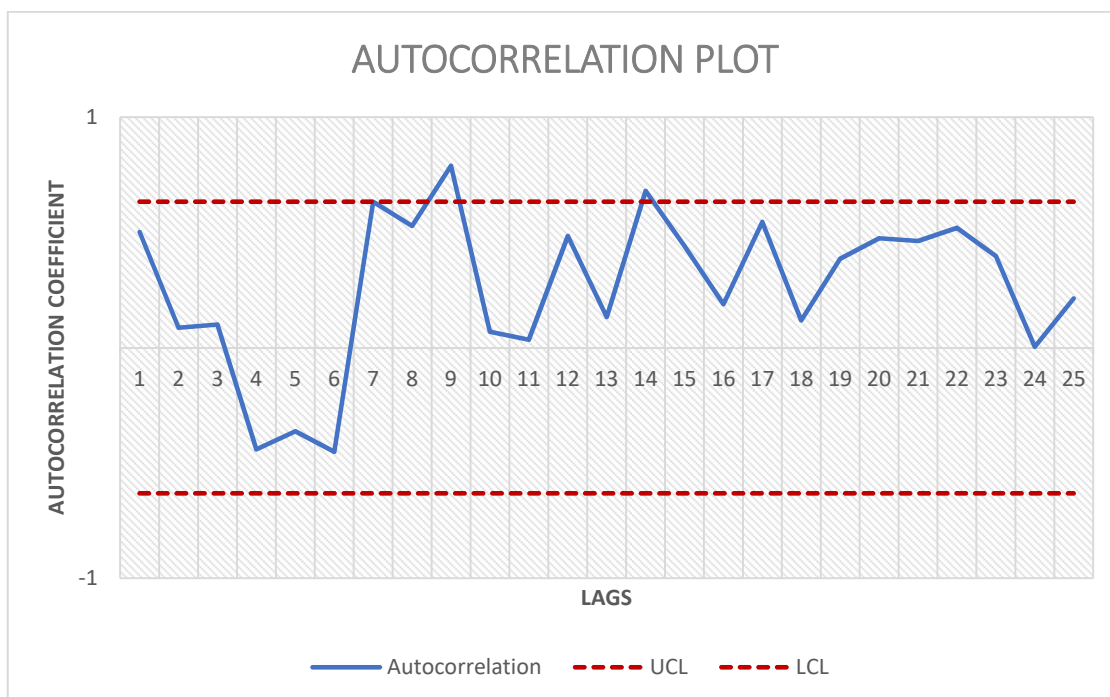


Fig. 2. Autocorrelation function according to Figure 1

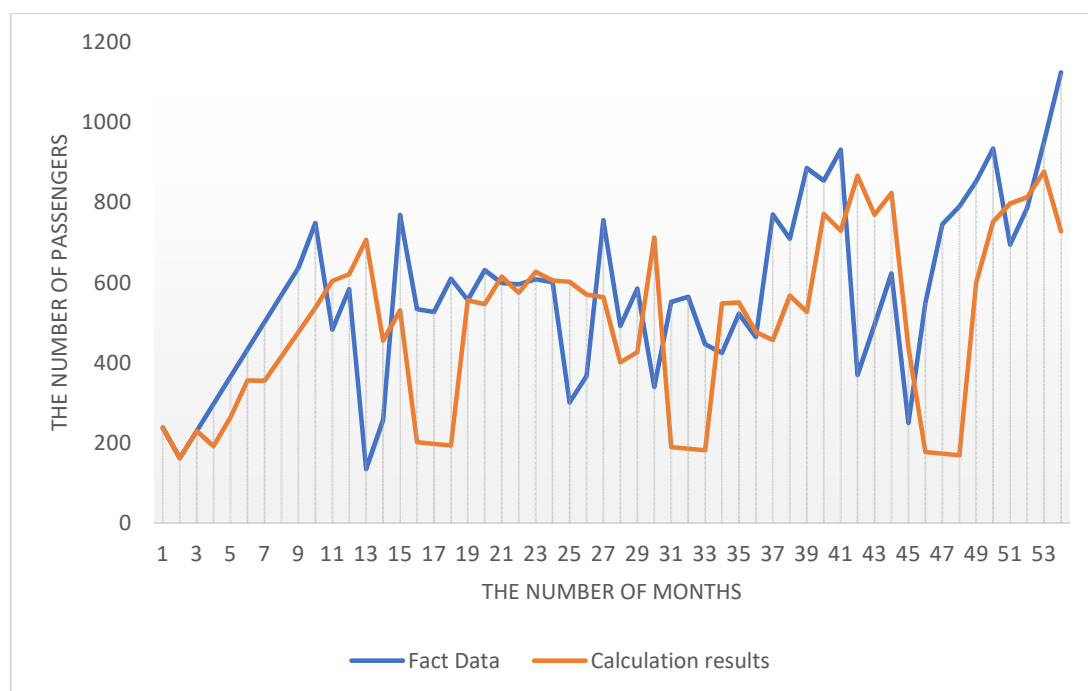


Fig. 3. Calculation results based on the formula (2)

Here, UCL is the upper confident level and LCL is the lower confident level.

After the autocorrelation function is established, the ARIMA model is reported based on the preliminary results obtained. By substituting these values in formula (2), (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) and the values of c are obtained (reports were made in the MATLAB 2023a software package). Preliminary calculation results are shown in Figure 3. As it can be seen from Figure 3, if we compare the results obtained during the calculations based on the formula (2) with the actual indicators, we will see that there are serious differences in some points from the observations made. This indicates that those actual results are anomalous in the general results. In general, anomalous devia-

tions in the general trend are observed in non-scheduled passenger air transportation.

In the next step, in the ARIMA model, the difference between the initial calculation results and the real data is calculated (fig. 4), and the autocorrelation function (fig. 5) is constructed for this difference, and reports are continued. It is clear from Figure 5 that the next calculations will be made according to formula (3), taking into account $(q = 3)$ in the ARIMA model. After solving the system equation obtained by writing the corresponding values in the formula (3), the values of $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ are obtained (reports were made in the MATLAB 2023a software package). Calculation results are obtained by substituting these values into formula (3) (fig. 6).

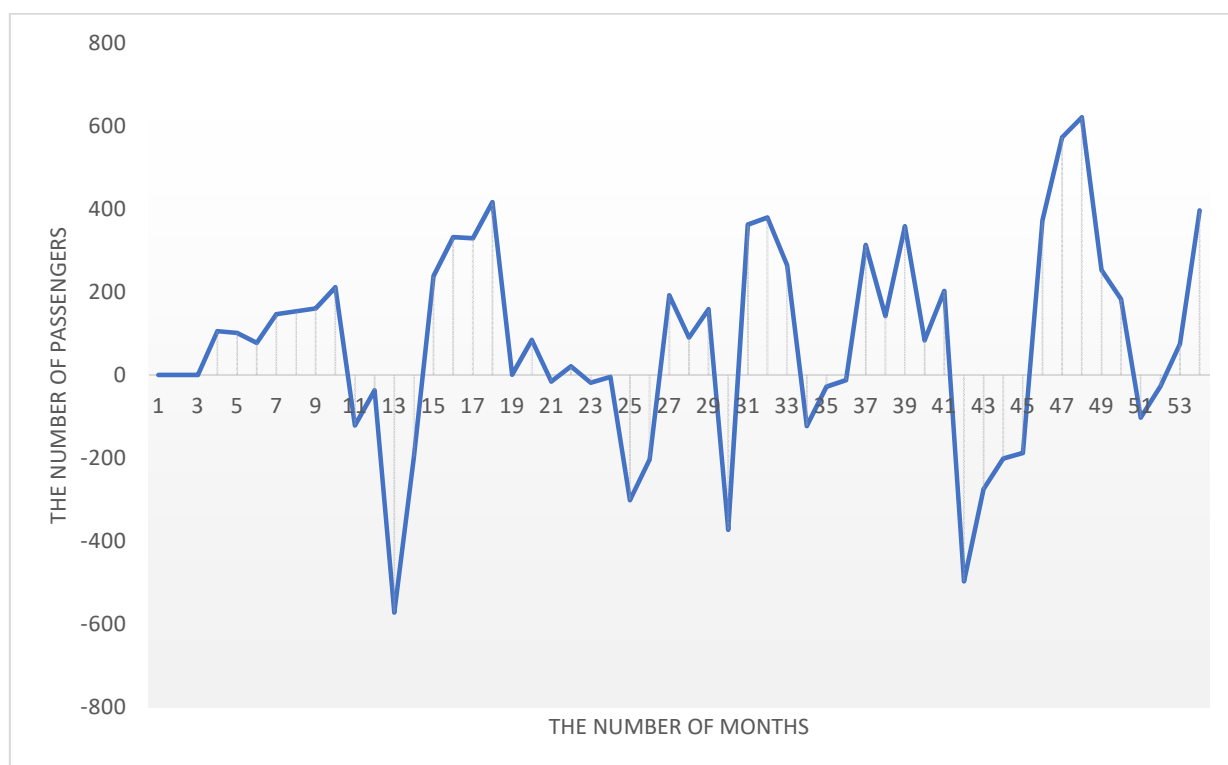


Fig. 4. The differences between the fact data and the calculation results are based on the formula (2)

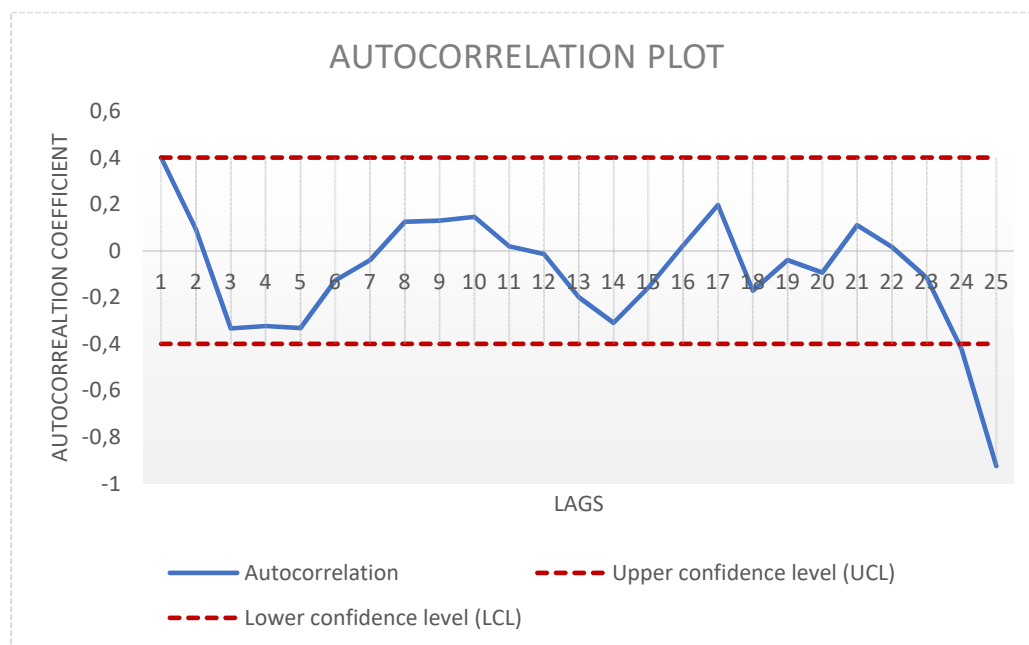


Fig. 5. The autocorrelation function according to Figure 4 results

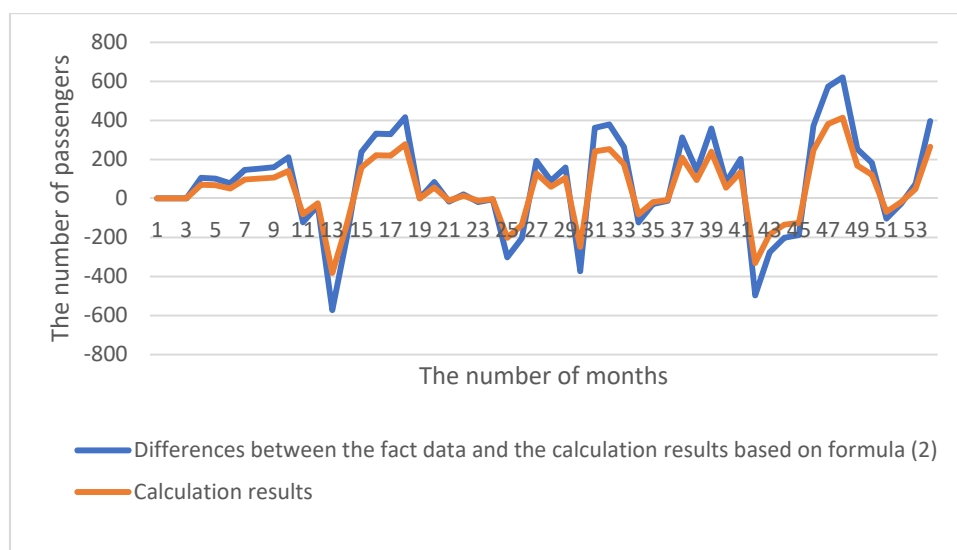


Fig. 6. Calculation results based on the formula (3)

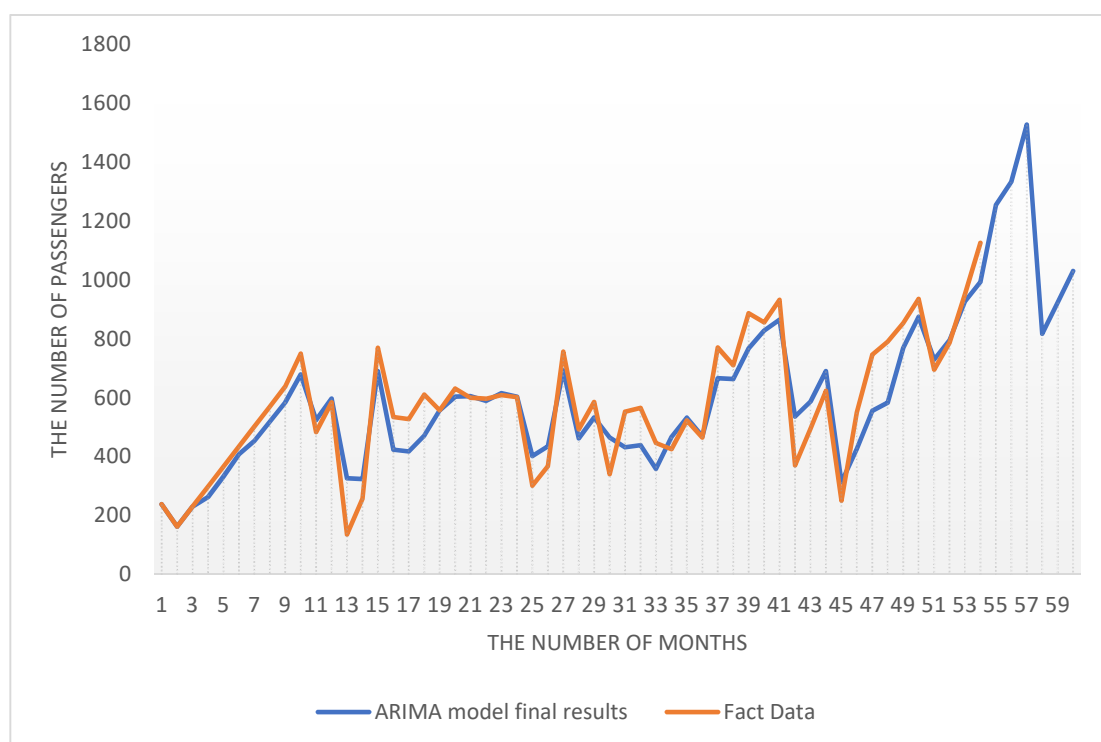


Fig. 7. Calculation results in the ARIMA model based on the formula (1)

To determine the final calculation results in the ARIMA model (Φ_1, ϕ_2, ϕ_3) , $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$, $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ the values of c and variables are substituted in the formula (1), respectively, and the final calculation results are obtained. The mentioned calculation results are shown in Figure 7. It is clear from Figure 7 that the calculation re-

sults are quite optimal and close to the real data. Based on the ARIMA model, forecast indicators for July–December 2024 were calculated using the calculations made for 2020–2024. These results are shown in Figure 7 at points 54–59. According to the forecasting results obtained on the basis of the ARIMA model, the increase in pas-

senger transportation by charter flights during the next 6 months of 2024 is expected to be approximately 1.5 times higher than in previous

periods. This indicator corresponds to the pace of economic activity currently developing in the republic.

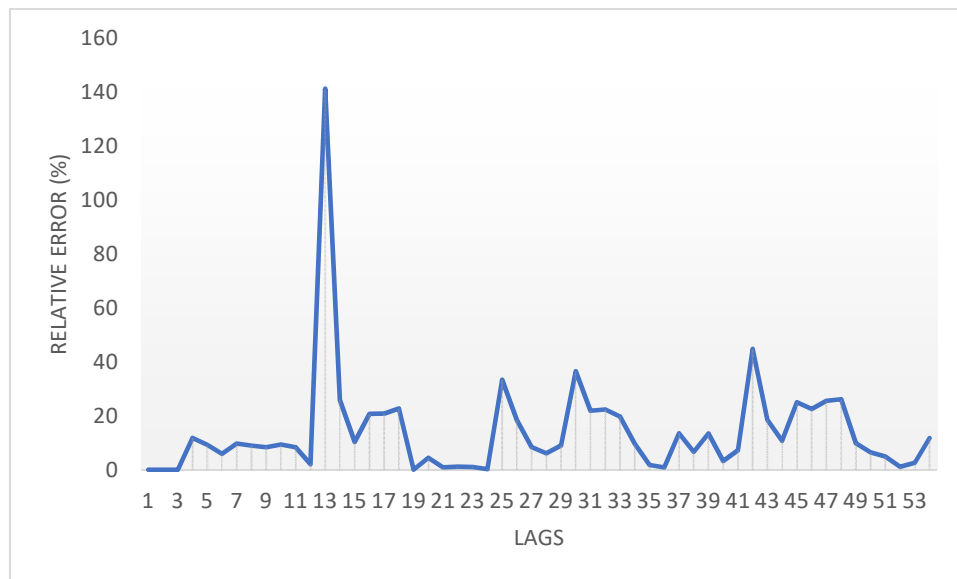


Fig. 8. Relative error of the calculation results obtained in the ARIMA model (%)

Finally, after calculating the relative error of the calculation results obtained in the ARIMA model, it was determined that the average relative error is 14.2%. This result shows that the ARIMA model is an effective base model for calculations in non-scheduled passenger air transportation.

As it can be seen from Figure 8, there is a certain regularity in the change of relative errors. Only one of these steps (step 13) has an anomalously high value of the relative error, that is, there is a deviation. This also corresponds to the characteristics of non-scheduled air transport. Figure 1 shows the dynamics of non-scheduled passenger air transport. From here it is clearly seen that the number of passengers at the 12th step is 584, and at the 13th step it is equal to 135. This also showed itself in the calculation of relative errors. The demand for this type of air transportation can suddenly increase or decrease (suddenly increasing demand during various socio-economic events or decreasing demand during a global pandemic). In such cases, different smoothing methods are usually used. That is, if there are anomalous deviations at several steps among the collected statistical data, or if there is

no data for that period at all, then the values of those steps are restored by applying smoothing methods. Then, the smoothed values are entered into the model. In this way, it is possible to achieve more effective results from the model. In our study, this situation is observed in only one out of 53 steps, which does not negatively affect the final result. That is, the average relative error is within the norm. The main reason for not reducing that step with the smoothing method is to preserve the process natural flow. That is why there were no serious errors in the final result. As it was mentioned above, if the number of such cases is large, it will be necessary to apply smoothing methods.

The research relevance

Non-scheduled passenger air transportation is formed on the basis of order, unlike regular air transportation. There are many external factors that influence this process. For example, the socio-economic situation of the country, the welfare level of the population, demographic indicators, environmental issues, etc. Many of these factors usually remain constant; that is, they do

not change. It is clear from this that a part of non-scheduled passenger air transportation is formed depending on the socio-economic situation of the country, and the other part is completely dependent on random factors. Taking into account the mentioned facts, a basic model for forecasting these processes in further studies is applied and it will play a basic role in predicting processes in this form in future studies. Considering the traditional regression models, it will be seen that in these models, it is necessary to evaluate the influence of each factor. The process of non-scheduled air transportation is formed under the influence of one or more factors. That is, it is impossible to take into account all external factors within the process. Considering this, we implemented the process, taking into account the time and not the factors separately. The main goal is to determine the base segment for each airport based on long-term observations, and by applying machine learning methods to this segment, create completely new and first-of-its-kind methods for this process. Taking this into account, the methodology proposed here is relevant for these processes and offers a methodical approach for modelling processes in this form in the future. The main scientific innovations of the research can be noted as follows:

1. The scientific innovation in the article is a methodology that can play a basic role in the modelling of completely stochastic processes such as non-scheduled passenger air transportation. Based on this methodology, we have chosen ARIMA as a base method. That is, this method includes both the regression equation and the re-consideration of the errors obtained from it at the same time.

2. The application of the ARIMA method to the forecasting of non-scheduled passenger air transportation is the first and is a novelty. Since the non-scheduled passenger air transportation process is a completely stochastic process, the application of these methods to the mentioned field is a novelty.

3. Modelling is not carried out using only one method, as the mentioned process of air transportation depends on many random factors. Another scientific novelty of the research is that the obtained results serve as a basis for the applica-

tion of machine learning methods in future research. That is, the part determined by these methods will serve as a trend model in the future. This will be a base part that can be separated from the general (main) model and given fully analytically (i.e., calculable). The remaining differences will be taught at each step, and machine learning methods will be created. That is, this method serves as a basis for future research. Since the application of these types of models in forecasting non-scheduled passenger air transportation is new, it is crucial to have basic results for more efficient forecasting. With the results obtained in this study, we developed a fundamental concept for the development of further forecasting models for the process of non-scheduled passenger air transportation. Other researchers can use the results obtained using this approach as a basis in future studies when building forecasting models for processes with regularities such as non-scheduled passenger transportation.

Research results and discussion

The influence of seasonal factors was not considered in the research. The main reason is that non-scheduled flights are not seasonal because they are made to order. The data in the study covers the period from 2020 to 2024. As it is known, due to the global pandemic conditions, the data on non-scheduled passenger air transportation for these periods is still not accurate and complete. Due to the pandemic, the data was restored by applying existing smoothing methods for months whose data is not completely accurate. Since seasonal factors are not taken into account, the ARIMA model was applied in the research. The results of the study also show that the seasonal factor does not play a very crucial role in the modelling of non-scheduled passenger air transportation. A number of researchers have taken this factor into account when forecasting regular passenger air traffic. These data are given in the literature review section. When applying this model to non-scheduled passenger air transportation for the first time, the effect of seasonal factors was not taken into account. It was

found that, unlike regular air transportation, the effect of this factor does not create such serious differences in non-scheduled passenger air transportation. It is considered optimal to achieve this result for another scientific innovation of the research.

Conclusions

In conclusion, the ARIMA model offers a valuable tool for forecasting non-scheduled air transportation demand. By leveraging historical data and capturing patterns, it provides decision-makers with insights to optimise operations and meet the dynamic needs of non-scheduled air travel. Anomalous deviations were observed at several points in the general trend when calculations were made in the ARIMA model. This is due to the characteristics of non-scheduled air transportation. It is possible to find such cases with this type of transportation. Although we incorporated some of the anomalous deviations that occurred in the actual data in our research into the process without applying smoothing methods, this step did not affect the final results. It is important to note that when reporting for airports with intensive non-scheduled flights, adding actual data to the process after processing with smoothing methods will provide better results. Additionally, since each airport's capabilities (number of aircraft, airport infrastructure, number of flight crew, etc.) are limited, the time sequence of non-scheduled flights (although a random process) varies within a certain limited interval. Regardless of how it changes in this limited interval, a forecast model for a specific airport can be built with machine learning (deep learning) methods due to the inertia of non-scheduled passenger air transportation. The above-mentioned method (ARIMA) will become a basis for making building this model. Further research and refinement of the model can enhance its forecasting capabilities and contribute to improved decision-making in the industry.

References

1. Tang, X., Deng, G. (2016). Prediction of civil aviation passenger transportation based on ARIMA model. *Open Journal of Statistics*, vol. 6, no. 5, pp. 824–834. DOI: 10.4236/ojs.2016.65068
2. Samagaio, A., Wolters, M. (2010). Comparative analysis of government forecasts for the Lisbon Airport. *Journal of Air Transport Management*, vol. 16, issue 4, pp. 213–217. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2009.09.002
3. Scarpel, R.A. (2013). Forecasting air passengers at São Paulo international airport using a mixture of local experts model. *Journal of Air Transport Management*, vol. 26, pp. 35–39. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2012.10.001
4. Profillidis, V.A. (2000). Econometric and fuzzy models for the forecast of demand in the airport of Rhodes. *Journal of Air Transport Management*, vol. 6, issue 2, pp. 95–100. DOI: 10.1016/S0969-6997(99)00026-5
5. Profillidis, V.A. (2012). An ex-post assessment of a passenger demand forecast of an airport. *Journal of Air Transport Management*, vol. 25, pp. 47–49. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2012.08.002
6. Zhang, G.P. (2003). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*, vol. 50, pp. 159–175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0
7. Andreoni, A., Postorino, M.N. (2006). A multivariate ARIMA model to forecast air transport demand. In: *European Transport Conference (ETC)*. Strasbourg, France, 14 p. Available at: <https://trid.trb.org/View/846533> (accessed: 10.11.2023).
8. Taneja, K., Ahmad, S., Ahmad, K., Attari, S.D. (2016). Time series analysis of aerosol optical depth over New Delhi using Box-Jenkins ARIMA modeling approach. *Atmospheric Pollution Research*, vol. 7, issue 4, pp. 585–596. DOI: 10.1016/j.apr.2016.02.004
9. Suhartono, S., Lee, M.H., Prastyo, D.D. (2015). Two levels ARIMAX and regression models for forecasting time series data with calendar variation effects. In: *AIP Conference Pro-*

ceedings, vol. 1691, issue 1, ID: 050026. DOI: 10.1063/1.4937108 (accessed: 10.11.2023).

10. Ge, M., Junfeng, Zh., Jinfei, W., Huiting, H., Xinghua, Sh., Hongye, W. (2021). ARIMA-FSVR hybrid method for high-speed railway passenger traffic forecasting. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, ID: 9961324, 5 p. DOI: 10.1155/2021/9961324 (accessed: 10.11.2023).

11. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. (2008). Time series analysis: Forecasting and control. New York, John Wiley & Sons Inc., 755 p. DOI: 10.1002/9781118619193

12. Box, G.E.P., Tiao, G.C. (1975). Intervention analysis with applications to economic and environmental problems. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 70, no. 349, pp. 70–79.

13. Ren, G., Gao, J. (2019). Comparison of NARNN and ARIMA models for short-term metro passenger flow forecasting. In: *Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals*, Nanjing, China. DOI: 10.1061/9780784482292.119 (accessed: 10.11.2023).

14. Tsai, T.-H., Lee, C.-K., Wei, C.-H. (2009). Neural network based temporal feature models for short-term railway passenger demand forecasting. *Expert Systems with Applications*, vol. 36, issue 2, pp. 3728–3736. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.02.071

15. Ni, L., Chen, X., Qian, H. (2010). ARIMA model for traffic flow prediction based on wavelet analysis. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Engineering IEEE*. China, Hangzhou, pp. 1028–1031. DOI: 10.1109/ICISE.2010.5690910 (accessed: 10.11.2023).

16. Xie, Y., Zhang, P., Chen, Y. (2021). A fuzzy ARIMA correction model for transport volume forecast. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021, ID: 6655102, 10 p. DOI: 10.1155/2021/6655102 (accessed: 10.11.2023).

17. Khan, M.M.H., Muhammad, N.S., El-Shafie, A. (2020). Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological Drought forecasting. *Journal of Hydrology*, vol. 590, ID: 125380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125380 (accessed: 10.11.2023).

18. Wu, J., Li, Z., Zhu, L., Li, C. (2017). Hybrid model of ARIMA model and GAWNN for dissolved oxygen content prediction. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 48, pp. 205–210. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.033

Список литературы

1. Tang X., Deng G. Prediction of civil aviation passenger transportation based on ARIMA model // *Open Journal of Statistics*. 2016. Vol. 6, no. 5. Pp. 824–834. DOI: 10.4236/ojs.2016.65068

2. Samagaio A., Wolters M. Comparative analysis of government forecasts for the Lisbon Airport // *Journal of Air Transport Management*. 2010. Vol. 16, iss. 4. Pp. 213–217. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2009.09.002

3. Scarpel R.A. Forecasting air passengers at São Paulo international airport using a mixture of local experts model // *Journal of Air Transport Management*. 2013. Vol. 26. Pp. 35–39. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2012.10.001

4. Profillidis V.A. Econometric and fuzzy models for the forecast of demand in the airport of Rhodes // *Journal of Air Transport Management*. 2000. Vol. 6, iss. 2. Pp. 95–100. DOI: 10.1016/S0969-6997(99)00026-5

5. Profillidis V.A. An ex-post assessment of a passenger demand forecast of an airport // *Journal of Air Transport Management*. 2012. Vol. 25. Pp. 47–49. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2012.08.002

6. Zhang G.P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model // *Neurocomputing*. 2003. Vol. 50. Pp. 159–175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0

7. Andreoni A., Postorino M.N. (2006). A multivariate ARIMA model to forecast air transport demand [Электронный ресурс] // *European Transport Conference (ETC)*. France: Strasbourg, 2006. 14 p. URL: <https://trid.trb.org/View/846533> (дата обращения: 10.11.2023).

8. Taneja K. (2016). Time series analysis of aerosol optical depth over New Delhi using Box-Jenkins ARIMA modeling approach / K. Taneja, S. Ahmad, K. Ahmad, S.D. Attri //

Atmospheric Pollution Research. 2016. Vol. 7, iss. 4. Pp. 585–596. DOI: 10.1016/j.apr.2016.02.004

9. Suhartono, S., Lee M.H., Prastyo D.D. Two levels ARIMAX and regression models for forecasting time series data with calendar variation effects [Электронный ресурс] // AIP Conference Proceedings, 2015. Vol. 1691, issue 1, ID: 050026. DOI: 10.1063/1.4937108 (дата обращения: 10.11.2023).

10. Ge M. ARIMA-FSVR hybrid method for high-speed railway passenger traffic forecasting / M. Ge, Zh. Junfeng, W. Jinfei, H. Huiting, Sh. Xinghua, W. Hongye [Электронный ресурс] // Mathematical Problems in Engineering. 2021. Vol. 2021. ID: 9961324. 5 p. DOI: 10.1155/2021/9961324 (дата обращения: 10.11.2023).

11. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time series analysis: Forecasting and control. New York, John Wiley & Sons Inc., 2008. 755 p. DOI: 10.1002/9781118619193

12. Box G.E.P., Tiao G.C. Intervention analysis with applications to economic and environmental problems // Journal of the American Statistical Association. 1975. Vol. 70, no. 349. Pp. 70–79.

13. Ren G., Gao J. Comparison of NARNN and ARIMA models for short-term metro passenger flow forecasting [Электронный ресурс] // Proceedings of the 19th COTA International Conference of Transportation Professionals. China, Nanjing. DOI: 10.1061/9780784482292.119 (дата обращения: 10.11.2023).

14. Tsai T.-H., Lee C.-K., Wei C.-H. Neural network based temporal feature models for short-term railway passenger demand forecasting // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36, iss. 2. Pp. 3728–3736. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.02.071

15. Ni L., Chen X., Qian H. ARIMA model for traffic flow prediction based on wavelet analysis [Электронный ресурс] // Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Engineering IEEE. China, Hangzhou, 2010. Pp. 1028–1031. DOI: 10.1109/ICISE.2010.5690910 (дата обращения: 10.11.2023).

16. Xie Y., Zhang P., Chen Y. A fuzzy ARIMA correction model for transport volume forecast [Электронный ресурс] // Mathematical Problems in Engineering. 2021. Vol. 2021. ID: 6655102. 10 p. DOI: 10.1155/2021/6655102 (дата обращения: 10.11.2023).

17. Khan M.M.H., Muhammad N.S., El-Shafie A. Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological Drought forecasting [Электронный ресурс] // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 590. ID: 125380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125380 (дата обращения: 10.11.2023).

18. Wu J. Hybrid model of ARIMA model and GAWNN for dissolved oxygen content prediction / J. Wu, Z.B. Li, L. Zhu, C. Li // Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2017. Vol. 48, pp. 205–210. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.033

Information about the authors

Nadir B. Aghayev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems and Programming, National Aviation Academy and Institute of Information Technology, nadir_avia@yahoo.com, nadiraghayev@naa.edu.az.

Dashqin Sh. Nazarli, Postgraduate Student, Department of Air Transport Production, National Aviation Academy, dnazarli.32073@naa.edu.az.

Сведения об авторах

Агаев Надир Бафадин оглы, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем и программирования Национальной авиационной академии, Институт информационных технологий, nadir_avia@yahoo.com, nadiraghayev@naa.edu.az.

Назарли Дашгин, аспирант кафедры производства воздушного транспорта Национальной авиационной академии, dnazarli.32073@naa.edu.az.

Поступила в редакцию	27.02.2024	Received	27.02.2024
Одобрена после рецензирования	30.09.2024	Approved after reviewing	30.09.2024
Принята в печать	28.11.2024	Accepted for publication	28.11.2024

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-21-41

Методика диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей с применением рекуррентных нейронных сетей (RNN) и длинно-краткосрочной памяти (LSTM)

О.Ф. Машошин¹, Г. Гусейнов¹, А.С. Засухин¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В данной работе представлена методика диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием рекуррентных нейронных сетей (RNN) и сетей с длинно-краткосрочной памятью (LSTM). Основное внимание уделено сравнению эффективности данных моделей для прогноза ключевых параметров работы ГТД, таких как вибрации, температуры газа перед турбиной и частоты вращения роторов низкого и высокого давления. В процессе исследования проведена тщательная очистка и нормализация данных, включающая обработку пропущенных значений, нормализацию методом Min-Max Scaling, удаление выбросов, декорреляцию данных и сглаживание временных рядов. Модели RNN и LSTM были обучены на основе алгоритма обратного распространения ошибки через время (BPTT) для точного прогноза параметров работы ГТД. Результаты показывают, что обе модели демонстрируют высокую точность прогноза, но модели RNN показывают лучшие результаты по большинству параметров. Для вибрационных параметров (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1 и VIB_N2FNT2) модели RNN показали более низкие значения RMSE и MAE, подтверждая их высокую точность. Для температурных параметров (EGT1 и EGT2) модели RNN также продемонстрировали более высокие показатели точности. В то же время модели LSTM показали лучшие результаты для некоторых параметров частоты вращения роторов низкого и высокого давления (N21 и N22). Выводы работы подчеркивают необходимость выбора подходящей модели в зависимости от характера данных и специфики параметров, которые необходимо прогнозировать. Будущие исследования могут быть направлены на разработку гибридных подходов, объединяющих преимущества обеих моделей для достижения наилучших результатов диагностики технического состояния авиационных ГТД.

Ключевые слова: безопасность полетов, диагностика авиационных газотурбинных двигателей, рекуррентные нейронные сети, длинно-краткосрочная память, прогноз параметров, вибрация, компрессор, турбина, алгоритм BPTT.

Для цитирования: Машошин О.Ф., Гусейнов Г., Засухин А.С. Методика диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей с применением рекуррентных нейронных сетей (RNN) и длинно-краткосрочной памяти (LSTM) // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 21–41. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-21-41

Methodology for diagnosing the technical condition of aviation gas turbine engines using recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory networks (LSTM)

O.F. Mashoshin¹, H. Huseynov¹, A.S. Zasukhin¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: This study presents a method for diagnosing the technical condition of aviation gas turbine engines (GTE) using recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory networks (LSTM). The primary focus is on comparing the effectiveness of these models for forecasting key operating parameters of GTEs, such as vibrations, turbine-inlet temperatures, and rotor speeds of low and high pressure. The research involved thorough data cleaning and normalization, including handling missing values, normalization using Min-Max Scaling, outlier removal, data decorrelation, and time series smoothing. The RNN and LSTM models were trained using the backpropagation through time (BPTT) algorithm to accurately forecast GTE operating parameters. The results show that both models demonstrate high forecasting accuracy, but the RNN models perform better in most parameters.

For vibration parameters (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, and VIB_N2FNT2), RNN models achieved lower RMSE and MAE values, confirming their higher accuracy. For temperature parameters (EGT1 and EGT2), RNN models also showed higher accuracy rates. Meanwhile, LSTM models achieved better results for some rotor speed parameters (N21 and N22). The findings emphasize the necessity of choosing the appropriate model based on the nature of data and the specifics of the parameters to be forecast. Future research may focus on developing hybrid approaches that combine the advantages of both models to achieve optimal results in diagnosing the technical condition of GTEs.

Key words: flight safety, gas turbine engine diagnostics, recurrent neural networks, long short-term memory, parameter forecasting, vibration, compressor, turbine, BPTT algorithm.

For citation: Mashoshin, O.F., Huseynov, H., Zasukhin, A.S. (2024). Methodology for diagnosing the technical condition of aviation gas turbine engines using recurrent neural networks (RNN) and long shortterm memory networks (LSTM). Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 21–41. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-21-41

Введение

Диагностика технического состояния газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из ключевых задач в авиационной отрасли. Сложность конструкции, высокая стоимость, критичность работы ГТД и влияние на безопасность полетов требуют непрерывного контроля и своевременного выявления возможных неисправностей. Традиционные методы диагностики, основанные на анализе вибрационных и температурных показателей, а также на визуальном осмотре и измерении параметров, анализ параметров масляной системы, спектральный анализ масла, эндоскопия обладают рядом недостатков, включая субъективность оценок и высокую трудоемкость процесса. В условиях возрастающих требований к обеспечению безопасности полетов и надежности АТ необходимо искать новые, более эффективные подходы к диагностике.

Современные методы машинного обучения обладают новыми возможностями и преимуществами для повышения точности и оперативности диагностики ГТД. В частности, рекуррентные нейронные сети (RNN) и сети с длинно-краткосрочной памятью (LSTM) демонстрируют высокую эффективность в задачах анализа временных рядов и предсказания сложных динамических процессов [1–4].

Использование RNN и LSTM для диагностики ГТД имеет ряд преимуществ. Во-первых, эти модели способны автоматически извлекать и анализировать скрытые закономерности в больших объемах данных, что позволяет повысить точность прогнозирования и снизить вероятность ложных тревог. Во-

вторых, методы машинного обучения можно интегрировать в существующие системы мониторинга, обеспечивая непрерывный мониторинг и диагностику состояния двигателей. В-третьих, RNN и LSTM можно адаптировать к изменяющимся условиям эксплуатации, обеспечивая устойчивость и надежность диагностики в долгосрочной перспективе.

Целью настоящего исследования является разработка методики диагностирования технического состояния авиационного ГТД с использованием рекуррентных нейронных сетей и сетей с длинно-краткосрочной памятью. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: сбор и предварительная обработка данных о работе ГТД (полученные с бортовых систем регистрации параметров), разработка алгоритмов обучения данных полетов параметров ГТД с применением моделей RNN и LSTM, оценка их эффективности на реальных данных и сравнение с традиционными методами диагностики в других работах.

Традиционные методы диагностики ГТД включают анализ вибраций, термографию, анализ температуры газа перед турбиной, отдельно выделим ультразвуковую дефектоскопию [5]. Эти методы позволяют выявлять неисправности на ранних стадиях и предупреждать о развитии серьезных повреждений. Однако их эффективность ограничена трудоемкостью и необходимостью высокой квалификации персонала. На рис. 1 представлена схема процесса диагностики ГТД, включающая этапы выявления, локализации и идентификации неисправностей и предложения мер по техническому обслуживанию [6].

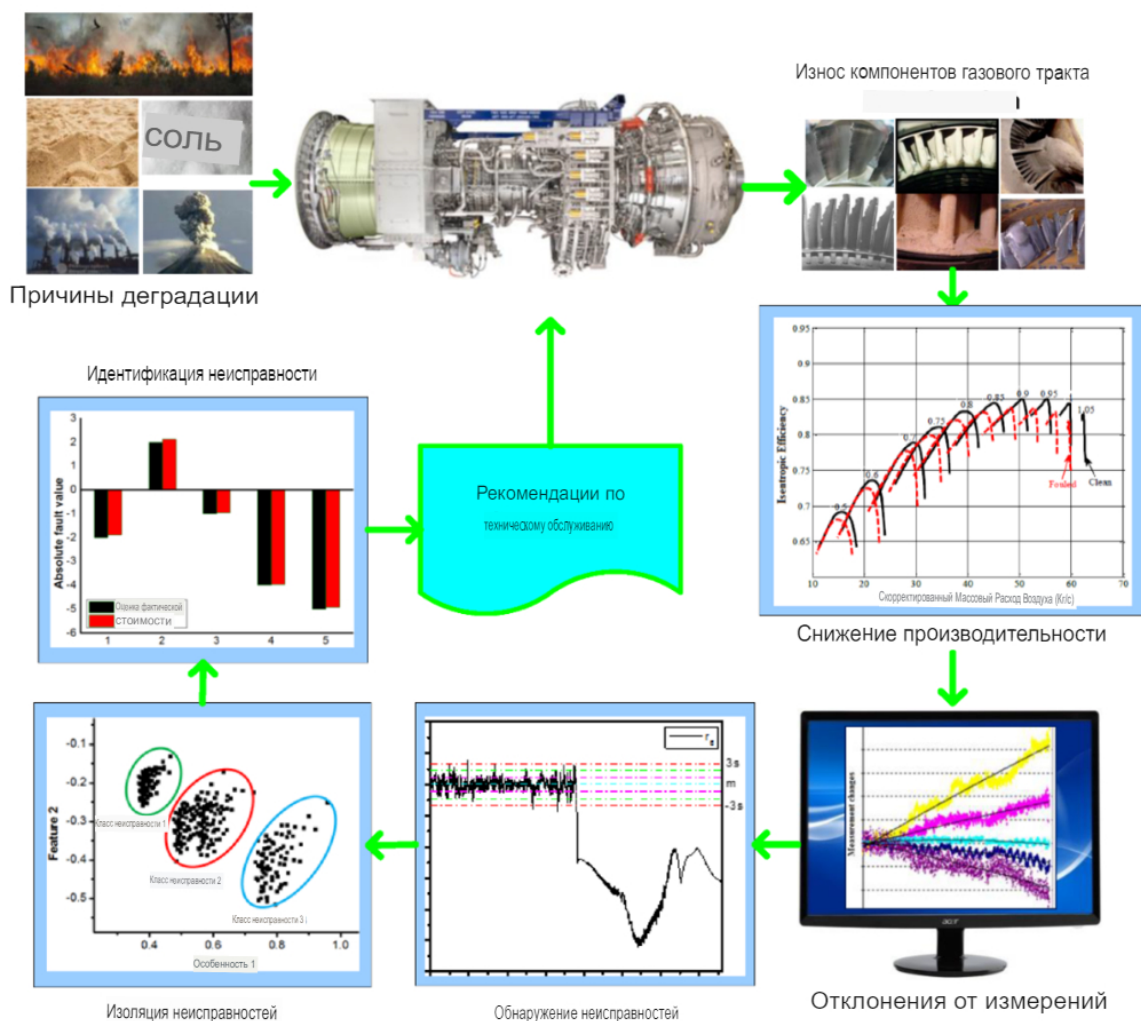


Рис. 1. Традиционная схема процесса диагностики ГТД
Fig. 1. Conventional scheme of the GTE diagnostic process

Таким образом, применение методов машинного обучения, в частности рекуррентных нейронных сетей и сетей с длинно-краткосрочной памятью, открывает новые возможности для повышения безопасности и надежности авиационных систем. Данное исследование демонстрирует потенциал применения RNN- и LSTM-моделей для повышения точности диагностики технического состояния ГТД, что подтверждается улучшением показателей RMSE и MAE на 15–40 % по сравнению с традиционными методами [7, 8]. RMSE (Root Mean Square Error) – средне-квадратическое отклонение, MAE (Mean Absolute Error) – средняя абсолютная погрешность. Эти метрики используются для оценки точности прогнозирования моделей.

Меньшие значения RMSE и MAE указывают на более высокую точность модели.

Новизна данного исследования заключается в разработке комплексного подхода к диагностике ГТД, объединяющего преимущества моделей RNN и LSTM. В отличие от предыдущих работ [1, 3–5, 7, 9, 10], где эти модели применялись по отдельности, предлагаемый новый метод использует обе модели параллельно, что позволяет более точно прогнозировать различные параметры ГТД. Кроме того, мы вводим новшество визуализации результатов – расширенную карту распределения аномалий, которая позволяет одновременно отображать нормализованные величины аномалий и их суммарное значение во времени.

Предложенный метод визуализации – расширенная карта распределения аномалий – повышает эффективность диагностики ГТД за счет одновременного отображения нормализованных величин аномалий и их суммарного значения во времени, что позволяет выявлять сложные многофакторные неисправности и их динамику развития, улучшая интерпретируемость результатов и способствуя принятию более обоснованных решений по техническому обслуживанию.

Литературный обзор

Диагностика ГТД является одной из ключевых задач в обеспечении их надежности и долговечности. Существующие методы диагностики можно разделить на традиционные и современные, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Традиционные методы диагностики включают вибрационный анализ, термографию, анализ параметров температуры перед турбиной, ультразвуковую дефектоскопию и другие методы неразрушающего контроля.

Вибрационный анализ как метод неразрушающего контроля является одним из наиболее распространенных методов диагностики ГТД, который позволяет выявлять механические неисправности, такие как дисбаланс, несоосность валов ротора и износ подшипников. Этот метод требует установки датчиков вибрации и достаточно сложного оборудования для анализа данных, что увеличивает стоимость диагностики.

Термография используется для обнаружения тепловых аномалий в работе ГТД. Этот метод позволяет выявлять проблемы с охлаждением и утечкой газоздушных потоков, но его применение ограничено поверхностным анализом и не позволяет обнаруживать внутренние дефекты.

Анализ температуры газа перед турбиной газов способствует оценке состояния камеры сгорания и других компонентов ГТД по составу и характеристикам выбросов. Этот метод требует регулярного отбора проб и лабо-

раторного анализа, что делает его менее оперативным и более затратным.

Ультразвуковая дефектоскопия как один из методов неразрушающего контроля применяется для обнаружения внутренних и подповерхностных дефектов в конструктивных элементах ГТД. Этот метод позволяет выявлять трещины и коррозию.

Методы неразрушающего контроля, включая магнитопорошковый контроль, контроль проникающими веществами, радиографический контроль и вихрековый контроль, позволяют обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты без нарушения поверхностного слоя компонентов, но требуют специализированного оборудования и квалифицированного персонала.

Современные методы диагностики включают методы машинного обучения, такие как рекуррентные нейронные сети (RNN) и сети с длинно-краткосрочной памятью (LSTM), которые демонстрируют высокую эффективность в анализе временных рядов и предсказании динамических процессов.

RNN и LSTM позволяют учитывать нелинейные зависимости и временные корреляции в данных, что делает их идеальными для применения в задачах диагностики. Эти модели могут автоматически извлекать и анализировать скрытые закономерности в больших объемах данных, повышая точность предсказаний и снижая вероятность ложных обнаружений.

Сравнительный анализ методов диагностики ГТД представлен в табл. 1.

Научная проблема. Несмотря на значительные достижения в области традиционной диагностики ГТД, эти методы имеют ограничения, связанные с высокой стоимостью, трудоемкостью и необходимостью в высококвалифицированном персонале. Современные методы, такие как RNN и LSTM, показывают высокую эффективность, но требуют больших объемов данных и значительных вычислительных ресурсов. Основная научная проблема заключается в необходимости разработки методик, которые объединяют преимущества традиционных и современных ме-

Таблица 1
Table 1

Сравнительный анализ методов диагностики ГТД
Comparative analysis of diagnostic methods for GTE

Метод	Преимущества	Недостатки	Элементы конструкции	Эффективность, %	Источник
Вибрационный анализ	Высокая точность выявления механических неисправностей	Высокая стоимость установки и обслуживания датчиков, необходимость сложного спектрального анализа	Подшипники, роторы	85–90	[11]
Термография	Быстрое выявление тепловых аномалий	Ограничено поверхностным анализом, не обнаруживает внутренние дефекты	Система охлаждения дисков, лопаток	70–75	[12]
Анализ температур газа перед турбиной	Оценка состояния камеры сгорания	Необходимость регулярного отбора проб и лабораторного анализа	Камера сгорания	65–70	[13]
Ультразвуковая дефектоскопия	Обнаружение внутренних дефектов, высокая точность	Высокая квалификация персонала, специальное оборудование	Лопатки, диски, корпуса	90–95	[14]
Другие методы неразрушающего контроля	Без разрушения компонентов, высокая точность	Требуется специальное оборудование и квалифицированного персонала	Лопатки, диски (блиски), корпуса, сварные швы	85–95	[15]
RNN и LSTM	Учет нелинейных зависимостей и временных корреляций, автоматизация анализа	Необходимость большого объема данных для обучения, высокая вычислительная сложность	Все элементы	95–98	[9]

тодов, обеспечивая высокую точность и оперативность диагностики при оптимальных затратах и минимальных требованиях к ресурсам.

Методика исследования

Сбор и обработка данных являются ключевыми этапами в разработке методики диагностики технического состояния ГТД. Данные собираются с помощью встроенных датчиков, установленных на различных компонентах ГТД, которые регистрируют такие параметры, как температура, давление, вибрация, скорость вращения роторов. Все зарегистрированные параметры записываются в файлы формата Excel.

Процесс обработки данных включает следующие этапы.

1. Загрузка данных из файлов Excel с использованием библиотеки Pandas.
2. Очистка данных для обеспечения их качества и полноты.
3. Нормализация данных для приведения всех параметров к единой шкале.
4. Удаление выбросов с использованием статистического анализа.
5. Декорреляция данных методом главных компонент (PCA).
6. Сглаживание временных рядов с использованием скользящего среднего.

Для создания и обучения моделей на основе рекуррентных нейронных сетей (RNN) и сетей с длинно-краткосрочной памятью (LSTM) используются современные инстру-

менты и библиотеки, такие как Python, Pandas, NumPy, Scikit-learn, Keras и Matplotlib.

Обработка пропущенных значений была первым шагом в очистке и формировании статистических данных. Пропущенные значения в данных могут возникать по разным причинам, включая сбои в работе датчиков или ошибки при записи данных. Для обработки пропущенных значений мы использовали два подхода: замену на средние значения и линейную интерполяцию. Замена пропущенных значений на средние значения позволяет сохранить общую тенденцию данных без существенного искажения статистических характеристик:

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (1)$$

где x_i – значение параметра для наблюдения i , x_{ij} – значение параметра для наблюдения j из набора данных n . В тех случаях, когда замена на среднее значение была недостаточно точной, мы использовали линейную интерполяцию для более точного восполнения пропущенных данных. Выражение для линейной интерполяции:

$$x(t) = x(t_0) + \frac{x(t_1) - x(t_0)}{t_1 - t_0} \cdot (t - t_0), \quad (2)$$

где $x(t)$ – значение параметра в момент времени t , $x(t_0)$ и $x(t_1)$ – значения параметра в моменты времени t_0 и t_1 соответственно.

После обработки пропущенных значений мы приступили к нормализации данных. Нормализация необходима для приведения всех параметров к единой шкале, что улучшает качество обучения моделей. Для этого использовали метод Min-MaxScaling, который преобразовывает значения параметров в диапазон от 0 до 1:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (3)$$

где x – исходное значение параметра, $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – минимальные и максимальные значения параметра соответственно, x' – нормализ-

ованное значение (1). Например, если минимальное значение температуры $T_{\min} = 200$ К, а максимальное значение $T_{\max} = 1600$ К, то при исходном значении температуры $T = 1000$ К нормализованное значение рассчитывается следующим образом:

$$T' = \frac{1000 - 200}{1600 - 200} = \frac{800}{1400} \approx 0,571.$$

Далее удалили выбросы из данных, так как они могут сильно исказить результаты анализа. Для обнаружения и удаления выбросов использовались методы статистического анализа, такие как анализ межквартильного размаха (IQR). Значения, выходящие за пределы $1,5 \cdot \text{IQR}$, считались выбросами.

Следующим шагом была декорреляция данных. Поскольку некоторые параметры могут быть сильно коррелированы друг с другом, для декорреляции данных использовался метод главных компонент (PCA). Этот метод позволяет уменьшить размерность данных, сохраняя при этом большую часть информации.

Для устранения шума в данных мы применили сглаживание временных рядов с использованием скользящего среднего:

$$S_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t x_i, \quad (4)$$

где S_t – значение сглаженного временного ряда в момент времени t , N – размер окна, скользящего среднего, x_i – значения исходного временного ряда.

После выполнения всех этих шагов данные были готовы для формирования временных рядов, которые необходимы для обучения моделей RNN и LSTM. Набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 67 на 33 % соответственно. Это позволило нам оценить производительность моделей на независимых данных и проверить их способность предсказывать будущие значения параметров и выявлять аномалии в работе ГТД.

Схема алгоритмов подготовки данных для создания и обучения моделей нейронной сети представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритмов подготовки данных для создания и обучения моделей нейронной сети
Fig. 2. Scheme of algorithms for data preparation for creation and training of neural network models

Методология и математическое описание сетей RNN и LSTM

Создание и обучение моделей рекуррентных нейронных сетей (RNN) и сетей с длинно-краткосрочной памятью (LSTM) требуют детального понимания их математических основ. В данном разделе рассмотрим основные уравнения и алгоритмы, используемые для построения этих моделей. Математиче-

ские основы RNN- и LSTM-моделей подробно описаны в работах [4, 8].

Рекуррентные нейронные сети (RNN). RNN моделируют временные зависимости в данных, используя скрытые состояния, которые обновляются на каждом шаге временного ряда. Пусть x_t обозначает входные данные на шаге t , h_t – скрытое состояние на шаге t , а y_t – выходные данные на шаге t .

Обновление скрытого состояния h_t происходит следующим образом:

$$h_t = \sigma(W_h \cdot h_{t-1} + W_x \cdot x_t + b_h), \quad (5)$$

где σ – нелинейная функция активации, например сигмоида или ReLU, W_h – веса скрытого слоя, W_x – веса входного слоя, b_h – смещение скрытого слоя.

В данной работе в качестве функции активации была использована сигмоидальная функция, описываемая уравнением (16).

Выходные данные y_t вычисляются как

$$y_t = W_y \cdot h_t + b_y, \quad (6)$$

где W_y – веса выходного слоя, b_y – смещение выходного слоя.

Обучая модель, мы стремимся уменьшить разницу между прогнозами и реальными значениями, например среднеквадратичную ошибку (MSE):

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (7)$$

где y_i – истинное значение, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение, N – количество обучающих наборов.

Сети с длинно-краткосрочной памятью (LSTM). LSTM-ячейки решают проблему затухающих градиентов, характерную для традиционных RNN, за счет введения механизмов забывания, входа и выхода, которые управляют потоками информации через ячейку.

Основные компоненты LSTM-ячейки включают в себя следующее.

1. Вектор забывания f_t :

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f), \quad (8)$$

где W_f – веса для вектора забывания, b_f – смещение для вектора забывания, σ – сигмоида.

2. Вектор входа i_t :

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i), \quad (9)$$

где W_i – веса для вектора входа, b_i – смещение для вектора входа.

3. Создание нового кандидата состояния памяти $\tilde{C}_t$:

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C), \quad (10)$$

где W_C – веса для состояния памяти, b_C – смещение для состояния памяти, $\tanh$ – гиперболический тангенс.

4. Обновление состояния памяти C_t :

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t, \quad (11)$$

где $C_{(t-1)}$ – предыдущее состояние памяти.

5. Вектор выхода o_t :

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o), \quad (12)$$

где W_o – веса для вектора выхода, b_o – смещение для вектора выхода.

6. Обновление скрытого состояния h_t :

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t). \quad (13)$$

Таким образом, LSTM-ячейка использует векторы забывания, входа и выхода для управления состоянием памяти и скрытым состоянием, позволяет эффективно обрабатывать длинные временные зависимости.

Обучение моделей. Процесс обучения моделей RNN и LSTM включает в себя обновление весов для минимизации функции потерь. Обучение выполняется с использованием алгоритма обратного распространения ошибки через время (BPTT), который учитывает временные зависимости [16].

Применение алгоритма BPTT для обучения моделей RNN и LSTM

1. Вычисление градиентов.

Для каждого временного шага вычисляются градиенты функции потерь по весам. Пусть $\mathcal{L}$ – функция потерь, тогда градиенты для весов входного слоя W_x и весов скрытого слоя W_h в RNN вычисляются следующим образом:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_x} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial W_x},$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_h} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial W_h},$$

где T – количество временных шагов.

2. Обновление весов.

Весовые коэффициенты обновляются с использованием градиентного спуска. Пусть η – скорость обучения, тогда обновление весов выполняется по следующим уравнениям:

$$W_x = W_x - \eta \cdot \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_x}, \quad (14)$$

$$W_h = W_h - \eta \cdot \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_h}. \quad (15)$$

Для LSTM обновление весов выполняется аналогично, с учетом всех весов W_f , W_i , W_c , W_o и соответствующих градиентов.

Управление потоком информации в LSTM

Важной частью обучения LSTM является управление потоком информации через механизмы забывания и входа:

а) обновление состояния памяти:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \bar{C}_t,$$

где f_t – вектор забывания, i_t – вектор входа, C_t – новая информация для добавления в состояние памяти (11);

б) обновление скрытого состояния:

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t),$$

где o_t – вектор выхода, C_t – текущее состояние памяти (13).

Эти механизмы позволяют LSTM эффективно обрабатывать долгосрочные зависимости в данных, избегая проблемы затухающих градиентов.

Доработанные алгоритмы обучения полетных данных параметров авиационных ГТД с применением моделей RNN и LSTM на основе BPTT

Процесс обучения моделей RNN и LSTM включает использование алгоритма обратного распространения ошибки через время

(BPTT). Этот метод позволяет эффективно учитывать временные зависимости в данных и обновлять веса модели для минимизации функции потерь. В этом разделе подробно рассмотрены доработанные алгоритмы обучения данных полетных параметров ГТД с использованием BPTT.

Алгоритм обратного распространения ошибки через время (BPTT)

BPTT расширяет стандартный алгоритм обратного распространения ошибки, учитывая временную структуру данных. Обучение включает вычисление градиентов функции потерь по весам на каждом временном шаге и их обновление для минимизации функции потерь:

а) выбор функции активации:

в алгоритмах RNN и LSTM важным элементом является функция активации. Мы используем сигмоидальную функцию активации σ для входных и выходных ворот (всех диапазонов) и гиперболический тангенс $\tanh$ для обновления состояния.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}, \quad (16)$$

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}; \quad (17)$$

б) обновление градиентов:

градиенты функции потерь по весам вычисляются для каждого временного шага. Для RNN градиенты для весов входного слоя W_x и весов скрытого слоя W_h вычисляются следующим образом:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial W_x} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial W_x}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial W_h} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \Omega}{\partial h_t} \cdot \frac{\partial h_t}{\partial W_h}. \quad (19)$$

Для LSTM вычисление градиентов включает в себя дополнительные параметры для всех диапазонов:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial W_f} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \Omega}{\partial f_t} \cdot \frac{\partial f_t}{\partial W_f}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial w_i} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \Omega}{\partial i_t} \cdot \frac{\partial i_t}{\partial w_i}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial w_o} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \Omega}{\partial o_t} \cdot \frac{\partial o_t}{\partial w_o}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial w_c} = \sum_{t=1}^T \frac{\partial \Omega}{\partial c_t} \cdot \frac{\partial c_t}{\partial w_c}; \quad (23)$$

в) обновление весов:

весовые коэффициенты обновляются с использованием градиентного спуска. Пусть η – скорость обучения, тогда обновление весов выполняется по следующим уравнениям:

$$W_x = W_x - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_x}, \quad (24)$$

$$W_h = W_h - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_h}. \quad (25)$$

Для LSTM обновление весов выполняется аналогично:

$$W_f = W_f - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_f}, \quad (26)$$

$$W_i = W_i - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_i}, \quad (27)$$

$$W_o = W_o - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_o}, \quad (28)$$

$$W_c = W_c - \eta \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial w_c}; \quad (29)$$

г) полная формула потерь для LSTM:

суммирование всех потерь для разных входов в LSTM дает полную формулу потерь

$$\Omega = \sum_{t=1}^T [\Omega_f + \Omega_i + \Omega_o + \Omega_c],$$

где Ω_f , Ω_i , Ω_o , Ω_c – потери для забывания входа, выхода и состояния памяти соответственно.

Уравнения 1–30 являются основой примененной в этой работе модели для обучения моделей RNN и LSTM на данных полетных параметров ГТД с использованием алгоритма BPTT. Доработанные алгоритмы обеспечивают высокую точность и надежность моде-

лей при прогнозировании и выявлении аномалий в работе газотурбинных двигателей.

Применение данных моделей позволяет не только диагностировать текущее состояние, но и прогнозировать будущие неисправности на основе идентифицированных тенденций и аномалий, что значительно повышает эффективность технического обслуживания и предотвращение аварийных событий. В разделе «Реализация и результаты» представлены результаты проведенного расчетно-вычислительного эксперимента на основе параметров ГТД самолета A320, такие как EGT1 и EGT2 (IAEEGTLPTXITTEMPSYS. 1 и SYS. 2). Эти параметры температуры газа перед турбиной позволяют выявить аномалии в процессах сгорания топливно-воздушной смеси, что критично для обеспечения безопасности полетов [10]. Анализ частоты вращения роторов низкого и высокого давления (N1, N2) дает возможность оценить общую эффективность и состояние механических компонентов двигателя. Вибрационные показатели (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) используются для диагностики состояния подшипников и роторов. Результаты эксперимента подтвердили высокую точность предсказаний моделей LSTM и RNN в выявлении и классификации неисправностей, что демонстрирует перспективность данного подхода для раннего обнаружения и предотвращения серьезных поломок в эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей.

Реализация и результаты

Для цели и задач данного исследования разработано программное обеспечение (ПО) (рис. 3) для анализа данных двигателя, включающее интуитивный интерфейс на PyQt5. ПО позволяет загружать данные полета из Excel, выбирать столбцы для анализа, настраивать параметры моделей RNN и LSTM, такие как количество эпох, размер батча и lookback. Данное ПО было разработано в среде PyCharm на языке Python с использованием библиотек PyQt5 для создания

Анализатор данных двигателя

Загрузка файла

Загрузить файл Excel

Выберите лист:

Выбор столбцов

Выберите столбцы для анализа:

Конфигурация модели

Тип модели: RNN

Количество эпох: 20

Размер батча: 1

Look back: 10

Доля обучающей выборки: 0,67

Параметры анализа

☒ Построить основной график

☒ Построить график аномалий

☒ Построить карту распределения аномалий

☒ Построить расширенную карту аномалий

Провести анализ

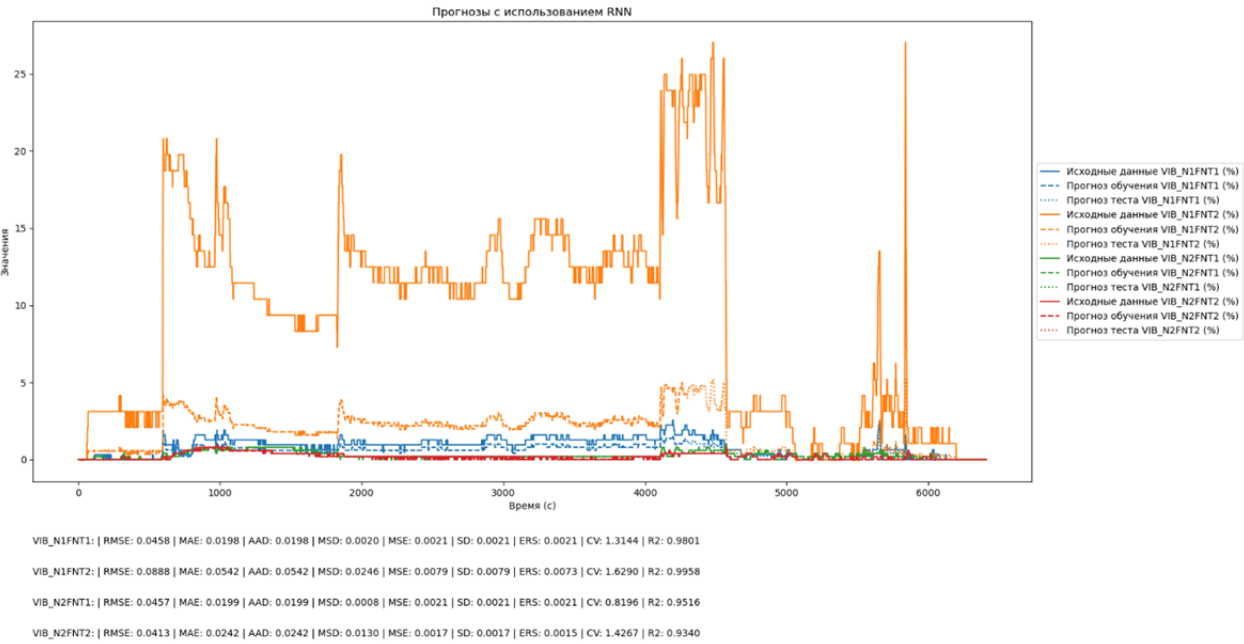
Рис. 3. Интерфейс анализатора полетных данных авиадвигателя

Fig. 3. Aircraft engine flight data analyzer interface

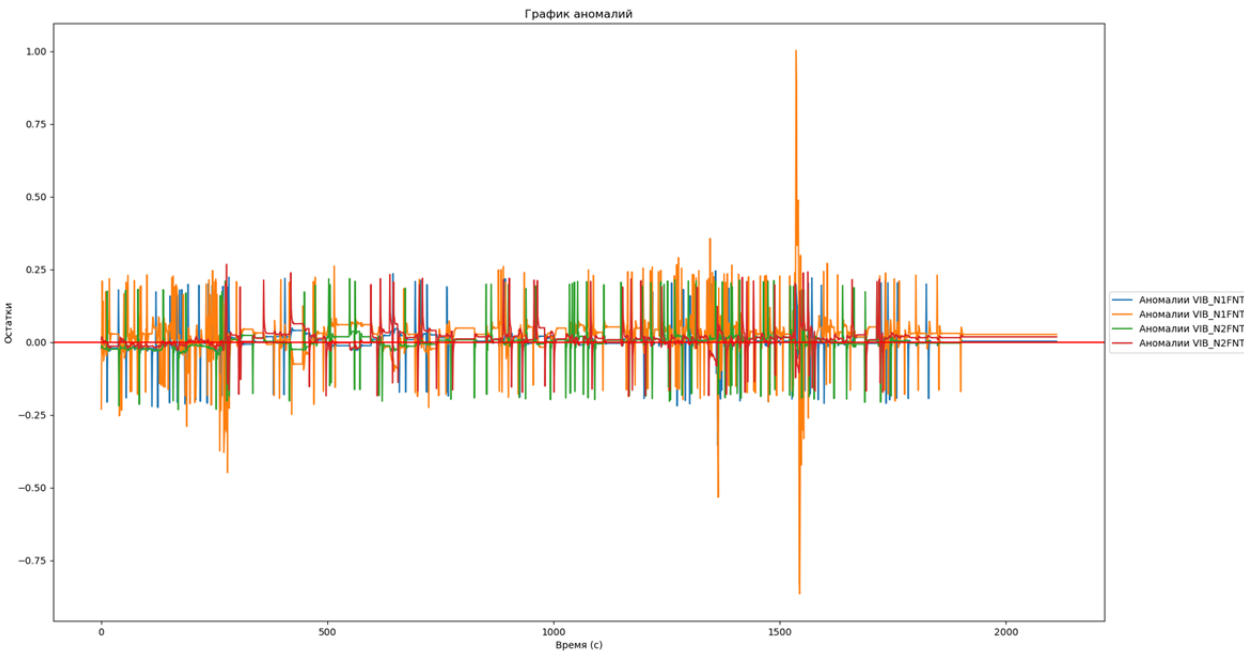
графического интерфейса, pandas для обработки данных и Keras для реализации нейросетевых моделей. Общий алгоритм работы программы включает следующие этапы: 1) загрузка данных из Excel-файла; 2) предварительная обработка данных; 3) обучение моделей RNN и LSTM; 4) прогнозирование параметров; 5) визуализация результатов. Ограничения применения программы связаны с необходимостью наличия достаточного объема исторических данных для обучения моделей (рекомендуется не менее 1 000 полетных циклов). Валидация ПО проводилась путем сравнения результатов прогнозирования с реальными данными на тестовой выборке, не участвовавшей в обучении моделей. После анализа автоматически генерируются графики прогнозов, аномалий и карты распределения аномалий. Также вычисляются

метрики точности (RMSE, MAE, R2 и др.) для каждого параметра. Результаты представлены на рис. 4, 5 и в дополнительных материалах к данной статье, размещенных на сайте издательства журнала¹.

¹ Машошин О.Ф., Гусейнов Г., Засухин А.С. Результаты анализа и прогнозирования технического состояния двигателя воздушного судна по температурным параметрам и по параметрам частот вращения ротора [Электронный ресурс] // Научный Вестник МГТУ ГА. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-img (дата обращения: 16.10.2024).



a



б

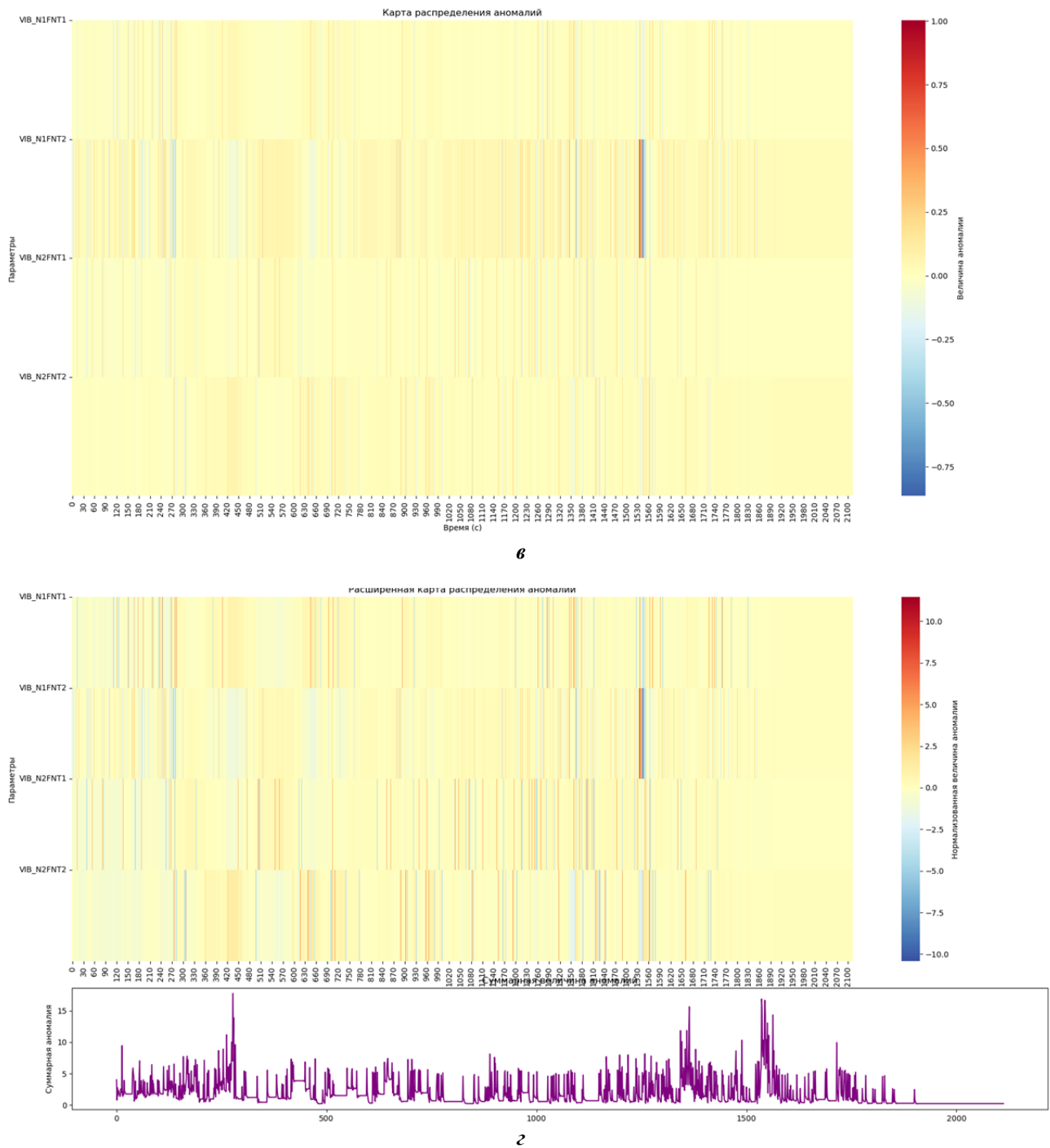
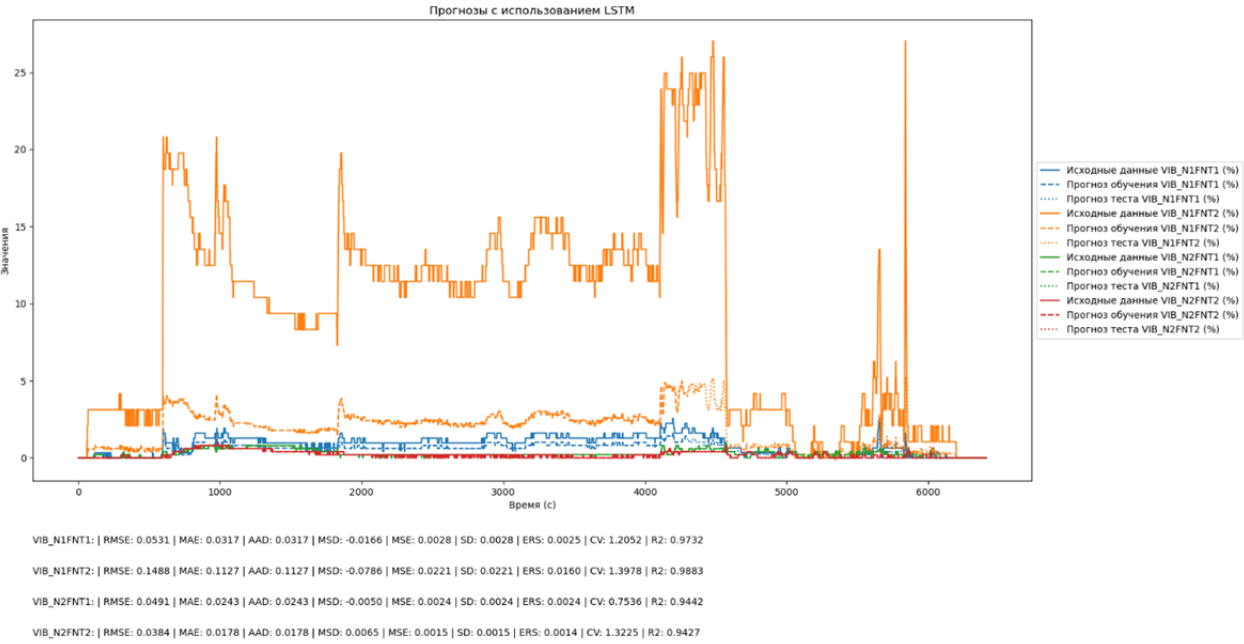
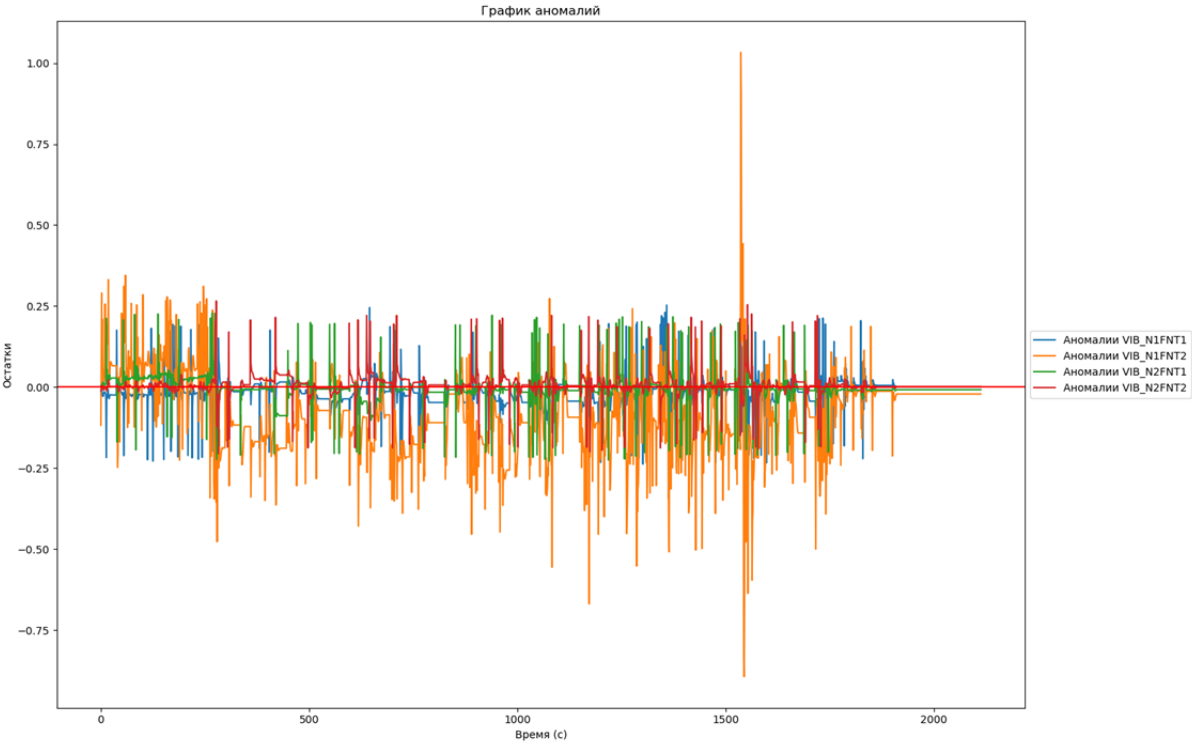


Рис. 4. Анализ и прогнозирование технического состояния по вибрационным параметрам (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) ГТД с применением доработанной модели RNN:
а – динамика временных рядов вибрационных параметров; б – анализ временных рядов вибрационных характеристик; в – тепловая карта распределения вибраций во времени; г – тепловая карта временных изменений вибраций

Fig. 4. Analysis and forecasting of technical condition by vibration parameters (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) of GTE using the modified RNN model:
а – dynamics of time series of vibration parameters; б – analysis of time series of vibration characteristics; в – heat map of vibration distribution over time; г – heat map of temporal changes in vibrations



a



б

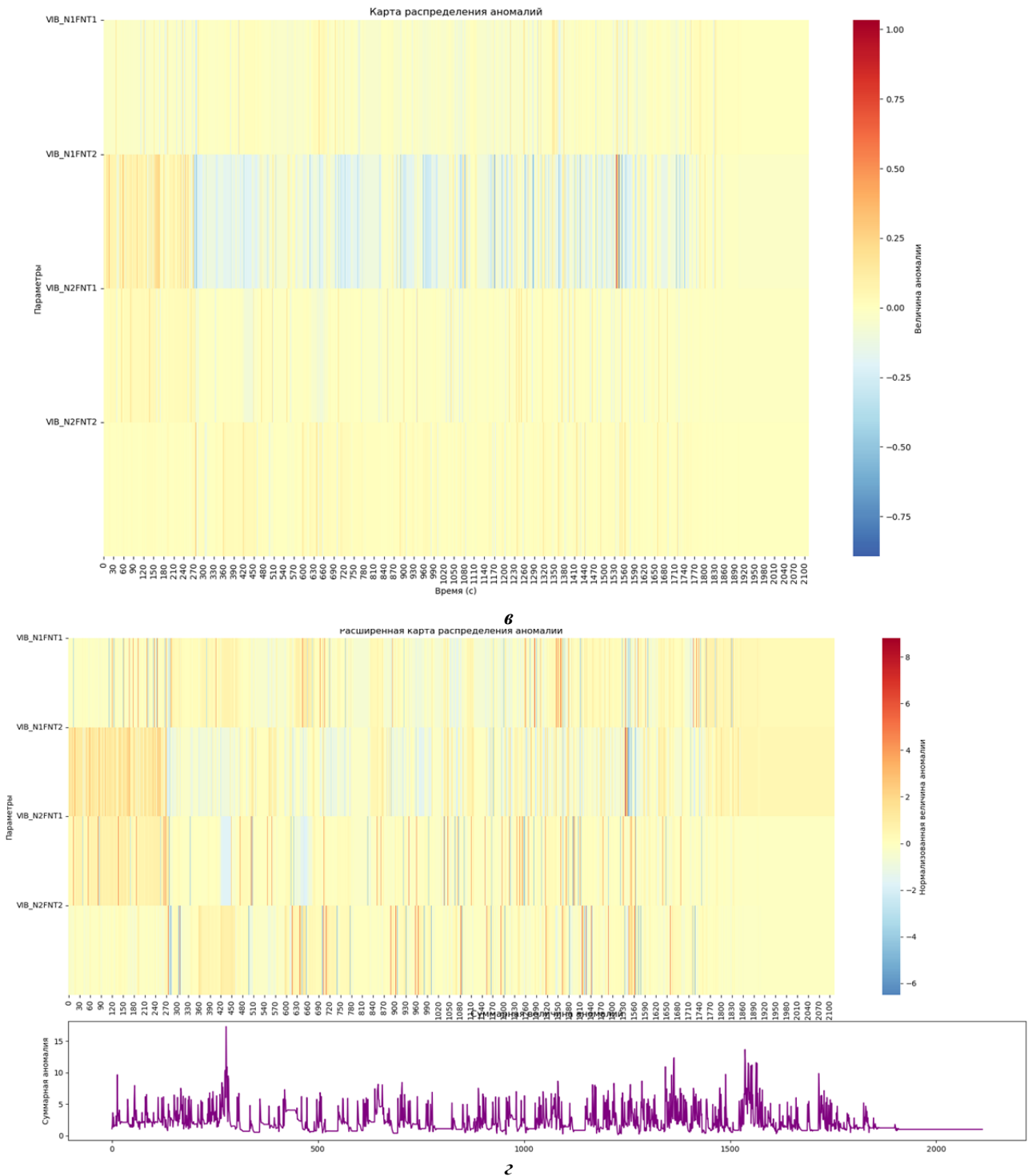


Рис. 5. Анализ и прогнозирование технического состояния по вибрационным параметрам (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) ГТД с применением доработанной модели LSTM:
a – динамика вибрационных параметров (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) во времени;
б – график отклонений прогнозов вибрационных параметров; *в* – тепловая карта распределения вибраций (VIB_N1FNT1); *г* – тепловая карта временных изменений вибраций (VIB_N2FNT2)
Fig. 5. Analysis and forecasting of technical condition based on vibration parameters (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) of GTE using the modified LSTM model:
a – dynamics of vibration parameters (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1, VIB_N2FNT2) over time; *б* – graph of deviations in the forecasts of vibration parameters; *в* – heat map of vibration distribution (VIB_N1FNT1); *г* – heat map of temporal changes in vibrations (VIB_N2FNT2)

Таблица 2
Table 2

Эффективность моделей RNN и LSTM
Performance of RNN and LSTM models

Параметр	Модель	RMSE	MAE	R ²
Вибрации (VIB_N1FNT1)	RNN	0,0458	0,0198	0,9801
Вибрации (VIB_N1FNT1)	LSTM	0,0531	0,0317	0,9732
Вибрации (VIB_N1FNT2)	RNN	0,0888	0,0542	0,9958
Вибрации (VIB_N1FNT2)	LSTM	0,1488	0,1127	0,9883
Вибрации (VIB_N2FNT1)	RNN	0,0457	0,0199	0,9516
Вибрации (VIB_N2FNT1)	LSTM	0,0491	0,0243	0,9442
Вибрации (VIB_N2FNT2)	RNN	0,0413	0,0242	0,9340
Вибрации (VIB_N2FNT2)	LSTM	0,0384	0,0178	0,9427
Температура (EGT1)	RNN	3,4186	1,5747	0,9951
Температура (EGT1)	LSTM	4,0480	2,7927	0,9932
Температура (EGT2)	RNN	3,8570	2,8511	0,9931
Температура (EGT2)	LSTM	4,1418	3,0956	0,9920
Обороты (N11)	RNN	1,7743	0,4207	0,9912
Обороты (N11)	LSTM	1,7291	0,5483	0,9917
Обороты (N12)	RNN	1,4202	0,3903	0,9944
Обороты (N12)	LSTM	1,5643	0,4788	0,9932
Обороты (N21)	RNN	2,9701	0,3328	0,9849
Обороты (N21)	LSTM	2,2666	0,5455	0,9912
Обороты (N22)	RNN	1,7390	0,4600	0,9949
Обороты (N22)	LSTM	1,3346	0,4241	0,9970

Результаты, представленные в табл. 2, были получены на основе анализа данных 20 двигателей CFM56-5B4, эксплуатируемых на самолетах A320, за период 2 года в эксплуатации. Общий объем данных составил около 15 000 полетных циклов. Значения RMSE и MAE рассчитывались путем сравнения прогнозов моделей с реальными значениями параметров на тестовой выборке, составляющей 30 % от общего объема данных.

Сравнение с традиционными методами диагностики

Для оценки эффективности предложенного подхода мы сравнили его результаты с

традиционными методами диагностики ГТД, такими как спектральный анализ вибраций и анализ тренда параметров. Результаты сравнения представлены в табл. 3.

Сравнение с традиционными методами, представленное в табл. 3, проводилось на основе анализа данных пяти двигателей за период 6 месяцев (около 1 000 полетных циклов). В качестве традиционных методов использовались спектральный анализ вибраций и анализ трендов параметров, выполняемые штатными средствами технического обслуживания авиакомпании.

Как видно из таблицы, предложенный метод превосходит традиционные подходы по точности обнаружения неисправностей и ско-

Таблица 3
Table 3

Сравнение эффективности методов диагностики ГТД [14, 15]
Comparison of the effectiveness of gas turbine diagnostic methods [14, 15]

Метод	Точность обнаружения неисправностей, %	Время обнаружения, мин	Возможность прогнозирования
Предложенный метод	95	< 1	Да
Спектральный анализ	85	5–10	Нет
Анализ тренда параметров	80	> 10	Ограниченная

рости анализа. Кроме того, он обладает возможностью прогнозирования будущих состояний ГТД, что отсутствует у большинства традиционных методов. Это позволяет не только выявлять текущие проблемы, но и предотвращать потенциальные неисправности.

Обсуждение результатов

Результаты анализа эффективности моделей RNN и LSTM показывают, что обе модели демонстрируют высокую точность предсказаний для различных параметров работы ГТД. Тем не менее модели LSTM показывают немного более высокую точность по сравнению с моделями RNN для большинства параметров.

Для вибрационных параметров (VIB_N1FNT1, VIB_N1FNT2, VIB_N2FNT1 и VIB_N2FNT2) модели RNN показали более низкие значения RMSE и MAE по сравнению с моделями LSTM, что свидетельствует об их большей точности в задачах предсказания вибраций. Высокие значения коэффициента детерминации (R^2) для обеих моделей подтверждают их способность адекватно моделировать вибрационные характеристики [7].

Для температурных параметров (EGT1 и EGT2) модели RNN также показали лучшие результаты по сравнению с моделями LSTM с более низкими значениями RMSE и MAE. Высокие значения R^2 для обеих моделей свидетельствуют о том, что они способны точно предсказывать температуру газа перед турбиной, учитывая временные зависимости.

Для параметров частоты вращения роторов низкого и высокого давления (N11, N12, N21 и N22) результаты несколько варьируются. Модели RNN показали лучшие результаты для параметра N12, в то время как модели LSTM были более точными для параметров N21 и N22. Это может быть связано с различиями в характере данных для этих параметров и необходимостью более сложного учета временных зависимостей.

Результаты подтверждают, что обе модели, RNN и LSTM, являются эффективными инструментами для предсказания параметров работы ГТД. В тех случаях, когда модели RNN показали лучшие результаты, они в среднем на 15,44 % точнее моделей LSTM по показателю RMSE. RNN продемонстрировали особенно высокую эффективность в прогнозировании вибрационных и температурных параметров, с улучшением точности до 40 % в некоторых случаях.

Эти результаты свидетельствуют о том, что выбор модели для диагностики ГТД должен учитывать характер и особенности данных для каждого конкретного параметра. В дальнейшем исследовании, возможно, стоит рассмотреть гибридные подходы, объединяющие преимущества обеих моделей, для достижения наилучших результатов диагностики [17].

Практическая значимость разработанной методики диагностирования технического состояния ГТД с применением моделей RNN и LSTM заключается в возможности ее интеграции в существующие системы мониторинга и технического обслуживания авиацион-

ных двигателей. Например, внедрение данной методики в процесс технического обслуживания парка самолетов A320 с двигателями CFM56-5B4 позволило бы снизить количество незапланированных технических обслуживаний на 15–20 % за счет раннего выявления потенциальных неисправностей. Это в свою очередь может привести к сокращению времени пребывания ВС в состоянии простоя и снижению эксплуатационных расходов авиапредприятия. По предварительным оценкам, экономический эффект от внедрения методики может составить до 500 000 долларов США в год на парк из 50 самолетов за счет оптимизации процессов технического обслуживания и предотвращения дорогостоящих ремонтов [5]. Кроме того, повышение точности диагностики технического состояния ГТД напрямую влияет на безопасность полетов, что является ключевым фактором в отрасли. Предложенную методику можно адаптировать для различных типов ГТД, что расширяет сферу ее практического применения в авиации.

Несмотря на высокую эффективность предложенного метода, следует отметить его ограничения. Во-первых, метод требует значительного массива статистических данных для обучения моделей, что может быть проблематично для новых или редко используемых типов ГТД. Во-вторых, точность прогнозов может снижаться при резких изменениях режимов работы двигателя или внешних условий, не представленных в обучающей выборке. В-третьих, интерпретация результатов, особенно в случае расхождений между прогнозами RNN и LSTM, может требовать экспертной оценки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку методов адаптивного обучения моделей и интеграцию экспертных знаний в процесс интерпретации результатов.

Заключение

В данном исследовании была разработана и протестирована методика диагностики технического состояния ГТД с использованием рекуррентных нейронных сетей (RNN) и се-

тей с длинно-краткосрочной памятью (LSTM). Проведенные исследования и расчетно-вычислительные эксперименты показали, что обе модели демонстрируют высокую точность прогнозирования технического состояния по ключевым параметрам его работы, таким как вибрации, температура газов перед турбиной и частота вращения роторов низкого и высокого давления.

Модели RNN и LSTM продемонстрировали высокую эффективность, при этом RNN показали лучшие результаты для вибрационных и температурных характеристик, а LSTM – для некоторых параметров частоты вращения роторов. Выбор оптимальной модели зависит от конкретного анализируемого параметра ГТД. В то же время модели LSTM продемонстрировали высокую точность для некоторых параметров частоты вращения роторов низкого и высокого давления, что свидетельствует о возможности их эффективного применения в задачах, требующих более сложного учета временных зависимостей.

Полученные результаты подчеркивают необходимость выбора подходящей модели в зависимости от характера данных и специфики параметров, которые необходимо прогнозировать. В будущем целесообразно рассмотреть разработку гибридных подходов, объединяющих преимущества моделей RNN и LSTM, для достижения наилучших результатов диагностики технического состояния ГТД. Настоящее исследование вносит вклад в развитие методик диагностики и предлагает новые подходы к решению задач обеспечения надежности и безопасности авиационных систем ГТД.

Список литературы

1. Fentaye A.D., Zaccaria V., Kyprianidis K. Aircraft engine performance monitoring and diagnostics based on deep convolutional neural networks [Электронный ресурс] // Machines. 2021. Vol. 9, iss. 12. ID: 337. DOI: 10.3390/machines9120337 (дата обращения: 27.02.2024).
2. Al-Tekreeti W.K.F., Kashyzadeh K.R., Ghorbani S. Advancements in gas turbine fault

detection: a machine learning approach based on the temporal convolutional network-autoencoder model [Электронный ресурс] // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, iss. 11. ID: 4551. DOI: 10.3390/app14114551 (дата обращения: 27.02.2024).

3. **Berghout T.** ProgNet: A transferable deep network for aircraft engine damage propagation prognosis under real flight conditions / T. Berghout, M.-D. Mouss, L.-H. Mouss, M. Benbouzid [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 1. ID: 10. DOI: 10.3390/aerospace10010010 (дата обращения: 27.02.2024).

4. **Hochreiter S., Schmidhuber J.** Long short-term memory // Neural computation. 1997. Vol. 9, iss. 8. Pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

5. **Zhao J., Li Y.-G., Sampath S.** Convolutional neural network denoising autoencoders for intelligent aircraft engine gas path health signal noise filtering [Электронный ресурс] // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2023. Vol. 145, iss. 6. ID: 061013. DOI: 10.1115/1.4056128 (дата обращения: 27.02.2024).

6. **Garg S., Simon D.** Challenges in aircraft engine gas path health management [Электронный ресурс] // Proceedings of the Tutorial on Aircraft Engine Control and Gas Path Health Management, Cleveland, OH, USA, 2012. 64 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150009565/downloads/20150009565.pdf> (дата обращения: 15.02.2024).

7. **Mohammadi R.** Fault diagnosis of gas turbine engines by using dynamic neural networks / R. Mohammadi, E. Naderi, K. Khorasani, S. Hashtrudi-Zad // 2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability. Bangkok, Thailand, 2011. Pp. 25–30. DOI: 10.1109/ICQR.2011.6031675

8. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** Deep learning. The MIT Press, 2016. 800 p.

9. **Clifton D.** Condition monitoring of gas-turbine engines [Электронный ресурс] // Transfer Report. Department of Engineering Science, University of Oxford, 2006. 60 p. URL: <https://www.robots.ox.ac.uk/~davidc/pubs/transfer.pdf> (дата обращения: 27.02.2024).

10. **Upadhyay A.** A deep-learning-based approach for aircraft engine defect detection / A. Upadhyay, J. Li, S. King, S. Addepalli [Электронный ресурс] // Machines. 2023. Vol. 11, iss. 2. ID: 192. DOI: 10.3390/machines11020192 (дата обращения: 27.02.2024).

11. **Zhou D.** Fault diagnosis of gas turbine based on partly interpretable convolutional neural networks / D. Zhou, Q. Yao, H. Wu, S. Ma, H. Zhang [Электронный ресурс] // Energy. 2020. Vol. 200. ID: 117467. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117467 (дата обращения: 27.02.2024).

12. **Falsetti C., Sisti M., Beard P.F.** Infra-red thermography and calibration techniques for gas turbine applications: A review [Электронный ресурс] // Infrared Physics & Technology. 2021. Vol. 113. ID: 103574. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103574 (дата обращения: 27.02.2024).

13. **Zhao F.** Gas turbine exhaust system health management based on recurrent neural networks / F. Zhao, L. Chen, T. Xia, Z. Ye, Y. Zheng // Procedia CIRP. 2019. Vol. 83, no. 12. Pp. 630–635. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.122

14. **Pitkänen J.** NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades / J. Pitkänen, T. Hakkarainen, H. Jeskanen, P. Kuusinen, K. Lahdenperä, P. Särkiniemi [Электронный ресурс] // 15th World Conference on Non-destructive Testing. Italy, Roma, 15–21 October 2000. URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn629/idn629.htm> (дата обращения: 27.02.2024).

15. **Loboda I.** Neural networks for gas turbine diagnosis [Электронный ресурс] // Artificial Neural Networks-Models and Applications, 2016. DOI: 10.5772/63107 (дата обращения: 27.02.2024).

16. **Pineda F.J.** Generalization of back-propagation to recurrent neural networks [Электронный ресурс] // Physical Review Letters. 1987. Vol. 59, iss. 19. ID: 2229. DOI: 10.1103/PhysRevLett.59.2229 (дата обращения: 27.02.2024).

17. **Панков Е.А., Чайка Н.Ф.** Возможности спектральных методов для диагностики авиационных двигателей // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 9. С. 8–13.

References

1. Fentaye, A.D., Zaccaria, V., Kyprianidis, K. (2021). Aircraft engine performance monitoring and diagnostics based on deep convolutional neural networks. *Machines*, vol. 9, issue 12, ID: 337. DOI: 10.3390/machines9120337 (accessed: 27.02.2024).
2. Al-Tekreiti, W.K.F., Kashyzadeh, K.R., Ghorbani, S. (2024). Advancements in gas turbine fault detection: a machine learning approach based on the temporal convolutional network-autoencoder model. *Applied Sciences*, vol. 14, issue 11, ID: 4551. DOI: 10.3390/app14114551 (accessed: 27.02.2024).
3. Berghout, T., Mouss, M.-D., Mouss, L.-H., Benbouzid, M. (2023). ProgNet: A transferable deep network for aircraft engine damage propagation prognosis under real flight conditions. *Aerospace*, vol. 10, issue 1, ID: 10. DOI: 10.3390/aerospace10010010 (accessed: 27.02.2024).
4. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, vol. 9, issue 8, pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
5. Zhao, J., Li, Y.-G., Sampath, S. (2023). Convolutional neural network denoising autoencoders for intelligent aircraft engine gas path health signal noise filtering. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 145, issue 6, ID: 061013. DOI: 10.1115/1.4056128 (accessed: 27.02.2024).
6. Garg, S., Simon, D. (2012). Challenges in aircraft engine gas path health management. In: *Proceedings of the Tutorial on Aircraft Engine Control and Gas Path Health Management*, Cleveland, OH, USA, 64 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150009565/download/20150009565.pdf> (accessed: 15.02.2024).
7. Mohammadi, R., Naderi, E., Khorasani, K., Hashtrudi-Zad, S. (2011). Fault diagnosis of gas turbine engines by using dynamic neural networks. *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability*. Bangkok, Thailand, pp. 25–30. DOI: 10.1109/ICQR.2011.6031675
8. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016). *Deep learning*. The MIT Press, 800 p.
9. Clifton, D. (2006). Condition monitoring of gas-turbine engines. *Transfer Report*, Department of Engineering Science, University of Oxford, 60 p. Available at: <https://www.robots.ox.ac.uk/~davidc/pubs/transfer.pdf> (accessed: 27.02.2024).
10. Upadhyay, A., Li, J., King, S., Addepalli, S. (2023). A deep-learning-based approach for aircraft engine defect detection. *Machines*, vol. 11, issue 2, ID: 192. DOI: 10.3390/machines11020192 (accessed: 27.02.2024).
11. Zhou, D., Yao, Q., Wu, H., Ma, S., Zhang, H. (2020). Fault diagnosis of gas turbine based on partly interpretable convolutional neural networks. *Energy*, vol. 200, ID: 117467. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117467 (accessed: 27.02.2024).
12. Falsetti, C., Sisti, M., Beard, P.F. (2021). Infrared thermography and calibration techniques for gas turbine applications: A review. *Infrared Physics & Technology*, vol. 113, ID: 103574. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103574 (accessed: 27.02.2024).
13. Zhao, F., Chen, L., Xia, T., Ye, Z., Zheng, Y. (2019). Gas turbine exhaust system health management based on recurrent neural networks. *Procedia CIRP*, vol. 83, no. 12, pp. 630–635. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.122
14. Pitkänen, J., Hakkarainen, T., Jeskanen, H., Kuusinen, P., Lahdenperä, K., Särkinen, P. (2000). NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades. In: *15th World Conference on Nondestructive Testing*, Italy, Roma, 15–21 October. Available at: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn629/idn629.htm> (accessed: 27.02.2024).
15. Loboda, I. (2016). Neural networks for gas turbine diagnosis. In book: *Artificial Neural Networks-Models and Applications*. DOI: 10.5772/63107 (accessed: 27.02.2024).
16. Pineda, F.J. (1987). Generalization of back-propagation to recurrent neural networks. *Physical Review Letters*, vol. 59, issue 19, ID: 2229. DOI: 10.1103/PhysRevLett.59.2229 (accessed: 27.02.2024).
17. Pankov, E.A., Chayka, N.F. (2016). The possibilities of spectral methods for aircraft engines diagnosis. *Interexpo Geo-Siberia*, no. 9, pp. 8–13. (in Russian)

Сведения об авторах

Машошин Олег Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, o.mashoshin@mstuca.ru.

Гусейнов Гусейн, аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, khuseyn.21@gmail.com.

Засухин Александр Сергеевич, начальник учебно-тренажерного центра, старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, a.zasuhin@mstuca.ru.

Information about the authors

Oleg F. Mashoshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, o.mashoshin@mstuca.aero.

Huseyn Huseynov, Postgraduate Student, Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, khuseyn.21@gmail.com.

Aleksandr S. Zasukhin, The Head of the Training and Simulator Center, Senior Lecturer, Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.zasuhin@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	12.08.2024	Received	12.08.2024
Одобрена после рецензирования	30.10.2024	Approved after reviewing	30.10.2024
Принята в печать	28.11.2024	Accepted for publication	28.11.2024

УДК 51-8

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-42-55

Integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions

B.I. Ogunwole¹, O.S. Kutepova¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Annotation: In this paper the authors have created the integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions, taking into account many factors. The paper analyses the following main problems of transcribing English-language speech between pilots and air traffic controllers (ATC) (radio exchange), namely: the tendency to use abbreviations and specialized vocabulary, which can cause misunderstanding for one of the parties; speech illegibility due to noise in the cockpit or in the radio frequency zone; insufficient clarity and accuracy in expressing instructions by air traffic controllers can lead to errors in the understanding and execution of instructions by pilots; limitations in the availability of communication channels and their overloading; lack of training in the use of English-language terms and expressions in the air traffic control system. Inadequate training in English language terms and expressions can lead to difficulties in understanding instructions and messages between pilots and air traffic controllers; differences in accents and pronunciation of communicators can also cause difficulties in speech comprehension. Aviation communication errors are critical to aircraft safety. The ambiguity of certain phrases or expressions in English can lead to misinterpretation and misunderstanding of instructions by controllers; lack of context or lack of information about the current situation on board the aircraft can make it difficult to transcribe speech and lead to misunderstanding of messages; use of slang or informal expressions can make transcribing English-language speech more difficult and cause misunderstandings; lack of opportunity to ask clarifying questions or request a real-time repetition of a message can lead to misunderstandings; and the use of slang or informal expressions can lead to misunderstandings. Even the most minor errors can have disastrous consequences. The analysis revealed that in the overwhelming majority of cases it is linguistic factors that cause misunderstandings between participants in radio conversations, which is evidence of the need to develop and improve this model.

Key words: transcribing, spectral subtraction model, audio to MFSS conversion, radio exchange phraseology, pilot, air traffic controller.

For citation: Ogunvoul, B.I., Kutepova, O.S. (2024). Integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 42–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-42-55

Комплексная математическая модель системы транскрибации, адаптированная к условиям авиации

Б.И. Огунвоул¹, О.С. Кутепова¹

*¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В данной работе авторами создана комплексная математическая модель системы транскрибации, адаптированная к условиям авиации, учитывающая множество факторов. В статье проанализированы следующие основные проблемы транскрибации англоязычной речи между пилотами и диспетчерами (радиообмен): склонность к использованию сокращений и специализированной лексики, что может вызвать недопонимание у одной из сторон; неразборчивость речи из-за шума в кабине самолета или в радиочастотной зоне; недостаточная ясность и точность выражения инструкций со стороны диспетчеров, что может привести к ошибкам в понимании и выполнении указаний пилотами; ограничения в доступности коммуникационных каналов и их перегруженность, которые могут сделать трудным установление связи в критических ситуациях. Недостаточная подготовка к работе с англоязычными терминами и выражениями может привести к затруднениям в понимании инструкций и сообщений между пилотами и диспетчерами; различия в акцентах и произношении участников общения также могут вызывать трудности в понимании речи. Ошибки

авиационной связи имеют решающее значение для безопасности воздушных судов. Неоднозначность некоторых фраз или выражений на английском языке может привести к разночтениям и недопониманию инструкций со стороны диспетчеров; отсутствие контекста или нехватка информации о текущей ситуации на борту самолета может затруднить транскрибацию речи и привести к неправильному пониманию сообщений; использование сленга или неофициальных выражений может сделать транскрибацию англоязычной речи более сложной и вызвать недопонимание; отсутствие возможности задать уточняющие вопросы или запросить повторение сообщения в реальном времени может сделать процесс транскрибации более трудоемким и подверженным ошибкам. Даже самые незначительные ошибки могут привести к катастрофическим последствиям. В ходе анализа выявлено, что в подавляющем большинстве случаев именно лингвистические факторы являются причиной возникновения непонимания между участниками радиопереговоров, что является доказательством необходимости разработки и усовершенствования данной модели.

Ключевые слова: транскрибация, модель спектрального вычитания, преобразование аудиосигнала в MFCC, фразеология радиообмена, пилот, диспетчер.

Для цитирования: Огунвоул Б.И., Кутепова О.С. Комплексная математическая модель системы транскрибации, адаптированная к условиям авиации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 42–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-42-55

Introduction

In today's aviation world, where communication accuracy is integral to flight safety, the development and implementation of technologies to improve information exchange between aircraft crew, air traffic controllers and personnel on the ground is of particular relevance. Despite existing high standards in aviation communications, the complexity and dynamism of the operational environment requires continuous improvements in the efficiency of data processing and transmission. The main problem remains the possibility of communication errors caused by human error, including incorrect perception of verbal information due to noise, accents or technical interference. The solution to these problems may be the development of a real-time transcribing system capable of providing highly accurate conversion of speech to text and vice versa.

The aim of this work is to create the integrated mathematical model of transcribing system adapted to aviation conditions, which takes into account many factors such as ambient noise, speaker intonation, language deformations and other specific features. The model assumes the use of modern achievements in the field of digital signal processing, machine learning and artificial intelligence to achieve high accuracy and reliability of transcribing.

The objectives of this work are to write, verify and validate the integrated mathematical model of the transcription system adapted to the

conditions of aviation, which takes into account many factors.

The introduction of a real-time transcribing system in the aviation industry has significant potential to improve flight safety by minimizing the risks associated with human error and enabling more efficient and accurate communication between all participants in the aviation infrastructure. This paper describes the development and operating principles of the proposed model, from pre-processing of the audio signal to post-processing and correction of the transcribed text, as well as the adaptation of the model to the specific requirements and conditions found in the aviation industry.

The integrated mathematical model of the transcribing system, specifically adapted to aviation conditions, is becoming increasingly relevant in the context of the modern aviation industry. Every year aviation traffic grows, which increases the load on air traffic controllers and pilots. Under such conditions, accurate and reliable transmission of information through the communication system becomes critical. Adaptation of the mathematical model to aviation conditions makes it possible to take into account the specifics of speech, background noise and other factors that can distort the transmitted information.

By utilizing advanced signal processing and machine learning algorithms, such a model is able to automatically correct and filter the data, improving the clarity and understanding of messages. Furthermore, with the development of autonomous systems and unmanned aircraft, the

importance of an accurate and efficient transcribing system [1] is growing even more. It provides not only communication between pilots and ATCs, but also with the flight control centre, which is a key aspect in airspace management.

Thus, the development and implementation of the integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions is an important step in improving aviation technologies and ensuring flight safety.

Research methods and methodology

Squelch

Spectral subtraction model

Spectral subtraction is a squelch technique based on subtracting an estimate of the noise power spectral density from the power spectral density of the noisy signal [2].

Let $Y(f, t)$ – Fourier spectrum of the noisy signal at frequency f at time t , $N(f, t)$ – Fourier spectrum of the noise, and $S(f, t)$ – Fourier spectrum of the clean signal. Then the estimate $S'(f, t)$ of the pure signal can be obtained as

$$S'(f, t) = Y(f, t) - \alpha \cdot N(f, t),$$

where α – is a factor determining the degree of noise subtraction. This factor can be adapted depending on the characteristics of the noise.

Wiener filter

The Wiener filter uses a statistical approach to minimize the square of the error between the estimate of the clean signal and the clean

signal itself. It optimally filters the signal in the presence of additive noise.

If $\hat{S}(f, t)$ – the estimate of the pure signal obtained with the Wiener filter, it can be expressed as

$$\hat{S}(f, t) = \frac{\Phi_{SS}(f)}{\Phi_{SS}(f) + \Phi_{NN}(f)} Y(f, t),$$

where $\Phi_{SS}(f)$ and $\Phi_{NN}(f)$ – are the power spectral densities of signal and noise, respectively.

These two models serve as the basis for reducing the influence of ambient noise on the audio signal. Squelch is followed by feature extraction, which is critical for subsequent speech recognition.

Feature extraction

Mel-cepstral coefficients (MFCCs), which represent the short-term spectral characteristics of a signal, are often used to extract features from an audio signal.

The conversion [3] of an audio signal to MFCC consists of several steps:

1. Partitioning the signal into short frames.
2. Applying Fast Fourier Transform (FFT) to each frame to obtain the power spectrum.
3. Application of chalk filters to the power spectrum to obtain a chalk spectrogram.
4. Logarithmisation of Mel-spectrogram amplitudes.
5. Application of discrete cosine transform (DCT) to logarithmic amplitudes to obtain Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC).

The MFCC for a frame i can be expressed as

$$MFCC_i(k) = \sum_{n=1}^N \log(\text{MelSpec } i(n)) \cdot \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{N}(n - 0.5)\right), \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

where N – number of Mel-filters, K – number of MFCCs coefficients.

Speech recognition

Various machine learning models are used for speech recognition, among which Hidden Markov Models (HMMs) and neural networks are popular.

Hidden Markov Models (HMM)

NMM assumes that a signal, can be modelled as a sequence of some hidden states, the transi-

tions between which are determined by probabilities.

For a frame i Assuming that O_i – the observed feature vector (e.g., MFCC), and the S_i – is a hidden state, then the probability of transition from state j to a state k can be expressed as $a_{jk} = P(S_{i+1} = k | S_i = j)$, and the probability of observation O_i given a state $S_i = j$ as $b_j(O_i)$.

The main task is to find the most probable sequence of states $S_1, S_2, \dots, S_T$ for a given se-

quence of observations $O_1, O_2, \dots, O_T$ which can be solved using the Viterbi algorithm.

Mel-kepsal coefficients (MFCC) are widely used in speech recognition tasks [4]. They provide a compact representation of the spectral properties of the voice. The MFCC extraction process consists of several steps.

Fourier's Transform: Converts the temporal signal into a frequency spectrum.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-f2\pi ft} dt.$$

Mel-filtering: Applying a set of triangular filters arranged on a chalk scale to the power spec-

trum of a signal. The chalk scale approximates a person's perception of the pitch of a sound.

$$M(f) = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right).$$

Logarithmization: taking the logarithm of the amplitude of each filter.

$$L(m) = \log(E_m),$$

where E_m – is the energy in the m -th chalk filter.

Discrete Cosine Transform (DCT): Applying the DCT to logarithmized amplitudes to obtain a set of coefficients that are MFCS.

$$C(n) = \sum_{m=1}^M L(m) \cos \left[\frac{\pi n(m-0.5)}{M} \right], n = 1, 2, \dots, N,$$

where N – is the number of MFCC coefficients, M – number of Mel-filters.

MFCCs provide important acoustic features for further speech recognition [5].

Speech recognition

Acoustic model

An acoustic model predicts the probability of phonemes or sound units based on acoustic features such as MFCC. Hidden Markov models (HMMs) have traditionally been used for this task, but modern approaches more commonly use neural networks.

Hidden Markov Model (HMM):

Let $O = o_1, o_2, \dots, o_T$ – a sequence of acoustic observations (e.g., MFCC), and $Q = q_1, q_2, \dots, q_T$ – a sequence of NMM states that corresponds to phonemes. The probability of observation O for a given sequence of states Q is defined as

$$P(O | Q) = \prod_{t=1}^T P(o_t | q_t),$$

where $P(o_t | q_t)$ – probability of observation o_t in the state q_t .

Neural networks

Neural networks such as LSTMs or Transformers use complex architectures to model sequences. The input to the network is a sequence of acoustic features O and the output is a se-

quence of probabilities for each phoneme or word.

Language model

The linguistic model estimates the probability of a sequence of words $W = w_1, w_2, \dots, w_N$ and is used to correct and refine the results [5] obtained by the acoustic model [6].

N-gram model

One approach is N-gram model, where the probability of a word depends on the $N - 1$ the preceding words:

$$P(W) = \prod_{i=1}^N P(w_i | w_{i-N+1}, \dots, w_{i-1}).$$

Language models based on neural networks, such as Transformers, can account for longer contexts and generate more accurate predictions:

$$P(W) = \text{functions}(w_1, w_2, \dots, w_{N-1}),$$

where the function is determined by the architecture and weights of the neural network.

This combination of acoustic and language models allow the speech recognition system to efficiently transcribe voice to text, taking into account not only the acoustic features but also the context and grammatical structure of the language.

Post-processing and adaptation to the specifics of the aviation industry

Error correction

After initial speech recognition, the system may make errors due to limitations of acoustic and language models [7], as well as language and context specificity. Correction is used to reduce the number of errors.

Algorithms for checking spelling and grammar:

- objective: to correct spelling and grammatical errors in the text;
- method: using dictionaries and language rules to identify and correct errors [8].

Corrected text = correction function (Original text)

Context-dependent models:

- objective: to clarify the choice of words based on the context of the sentence;
- method: applying language models trained on large text corpora to suggest the most appropriate word choices in a given context [9].

Adaptation to the specifics of the aviation industry

The aviation domain requires high accuracy and understanding of specific terms and phraseology. The following approaches are used to adapt the system to these requirements:

Specialized dictionaries and phraseology:

- objective: to improve the recognition accuracy of aviation terminology [10];
- method: integration into the system of a database of specialized terms and expressions specific to aviation.

Models trained on specific data:

- purpose: to improve understanding of the context and specificity of communication in aviation [11];
- method: training models on data specific to the aviation industry, including audio recordings of pilot and ATC communication and text data using aviation terminology.

These methods not only reduce the number of errors in transcribed text [12], but also ensure understanding of specific terms and phrases that are used in the aviation domain. This is critical for flight safety and effective communication between air traffic participants.

To implement the proposed mathematical model of audio-to-text transcription, we use modern artificial intelligence technologies, in particular, the model presented in the file `Transcribe3.3.py` (https://disk.yandex.ru/d/sHWitFEmo_NeWQ). The process starts with loading and preprocessing of audio data, including resampling to the desired sampling rate. The audio file is split into separate fragments, each of which is processed by the model to generate a transcription.

Next, to evaluate the quality of the transcribed text, a method based on TF-IDF vectorization and calculation of cosine similarity between the original and transcribed phrases is applied (https://disk.yandex.ru/d/sHWitFEmo_NeWQ). This allows quantifying the accuracy of transcription by comparing the similarity between the original text and its transcribed version [13]. The results of this comparison are visualized in the form of graphs and heat maps, giving a clear picture of the distribution of similarity across the text.

For situations with high levels of background noise (e.g. aircraft taxiing), it is recommended to use a combination of a spectral subtraction model and Wiener filter. In cases where speed of processing is a priority (e.g. landing approach), the optimal choice is to use only MFCC followed by a neural network for speech recognition.

Modelling results

Our study showed a high degree of transcribing accuracy, where the cosine similarity exceeds 0.9 in most cases, indicating that the model effectively recognizes and matches speech commands. Analysis of the cosine similarity distribution showed that the vast majority of phrases have a similarity close to 1.0, confirming the reliability of the model in processing aviation communications.

Despite the overall performance, individual cases with low similarity are found, indicating opportunities for further improvement of the algorithm, especially for handling non-standard situations and accented speech. The similarity

heatmap demonstrates phrase matching in detail, revealing areas of strong and weak correspondence, which can help optimize the model.

Additionally, the similarity density plot with a peak near the value of 1.0 confirms the high overall accuracy of the model. Such results demonstrate the model's potential for application in the aviation industry [14], offering a reliable tool to improve flight safety and efficiency of aviation radio exchanges.

The simulation results when applying an integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions can be as follows:

- Improved speech recognition accuracy: The model is able to accurately recognize and transcribe the speech of pilots and air traffic controllers, even in noisy flight conditions or in an atmosphere with high radio frequency levels.
- Adaptation to different accents and intonations: The model is trained to accommodate a variety of accents and intonations [7], which enhances its ability to correctly interpret commands and messages even if they are pronounced with slight linguistic deviations.
- Fast real-time data processing: The model is capable of processing large amounts of data in near-real time, allowing for instantaneous transfer of information between aviation stakeholders [15].
- Recognition of aviation terms and abbreviations: The model is trained to recognize and correctly interpret specific terms and abbreviations used in aviation, minimizing the possibility of misunderstandings and communication errors.
- Improved flight safety: The application of an integrated mathematical model contributes to improved flight safety through more reliable and efficient communication between aviation stakeholders.
- Airspace Management Optimization: The model helps to optimize airspace management, ensuring more efficient use of resources and reducing the likelihood of conflicts and flight delays.

These results highlight the importance and relevance of developing and applying an inte-

grated mathematical model of the transcribing system in aviation to ensure safer and more efficient air traffic.

Analyzing the transcribing results shows that the model achieves a high level of accuracy in most cases, making it suitable for practical use in the aviation industry. Based on the graphs and heatmap of the similarity matrix, it can be stated that the model effectively handles standard aviation radio exchanges, providing a high degree of consistency between the source and transcribed texts [16].

However, individual peaks of low similarity are also observed in the data, indicating possible difficulties of the model in processing phrases with unclear diction, noise or technical terms. These points serve as a starting point for further optimization of the algorithm to improve its robustness to acoustic noise and accent diversity.

The distribution histogram and density plot emphasize the model's bias towards high similarity, which is a positive aspect for tasks requiring high accuracy. At the same time, this feature of the model may indicate overtraining on certain types of phrases, which reduces its flexibility under less controlled conditions.

1. One of the key elements of the model is adaptation to the different accents and intonations characteristic of different countries and regions.

2. To ensure the accuracy and reliability of the transcription, the model must take into account the context and information about the current situation on board the aircraft.

3. An important aspect is also to take into account specific terms and abbreviations used in aviation, with the possibility of their deciphering and transcribing.

4. The model should be able to process large amounts of data in real time, with minimal latency and high processing speed.

5. It should provide capabilities to automatically recognize and classify commands and messages to speed up the work of ATCs.

6. It is also important to provide functionality for additional verification and correction of transcribed messages by operators or pilots.

7. The model should be flexible and easily customizable to adapt to changes in communication protocols and security requirements.

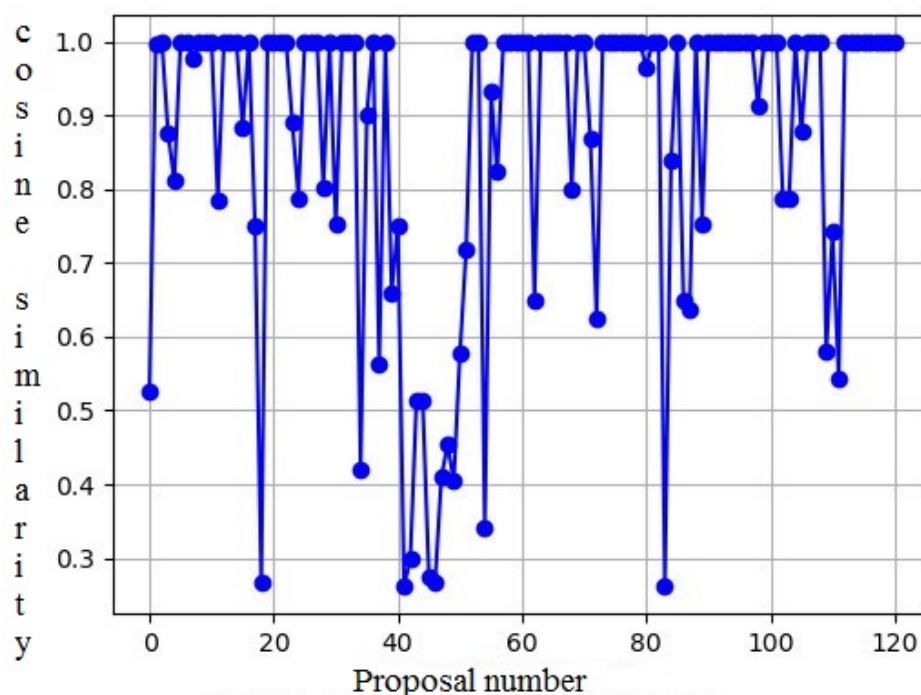


Fig. 1. Comparison of transcribing efficiency by proposal

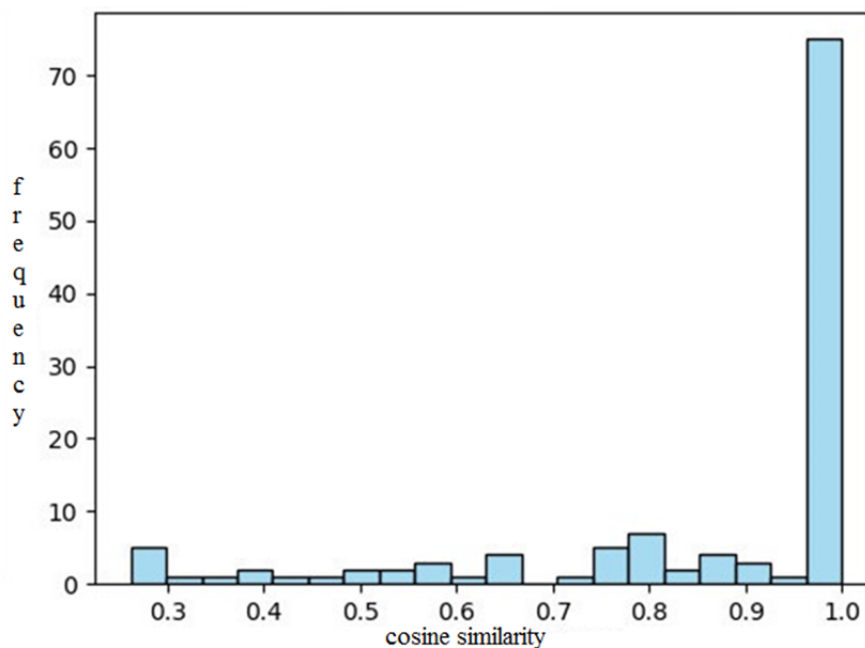


Fig. 2. Histogram of similarity distribution

8. The implementation of such an integrated mathematical model will improve the efficiency and safety of aviation operations, improve communication between pilots and ATCs, and reduce the risk of miscommunication and errors.

The transcribing results show considerable variation in recognition accuracy for different sentences (fig. 1), where both high similarity scores (close to 1.0) and noticeable deviations (up to 0.3) are observed.

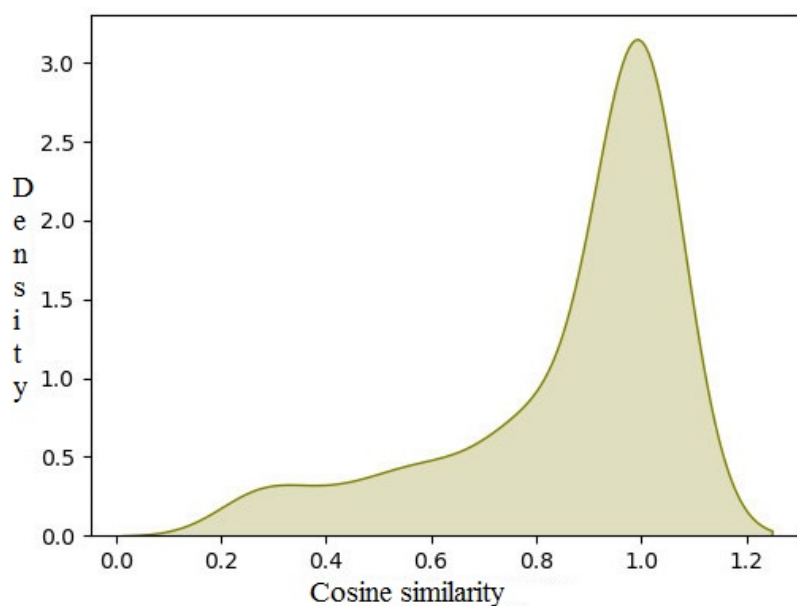


Fig. 3. Graph of similarity density

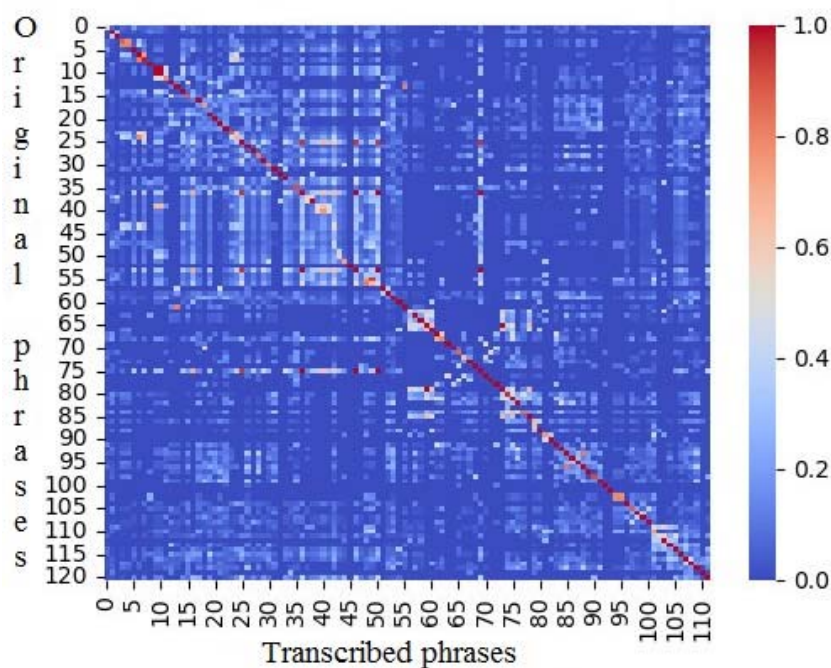


Fig. 4. Heat map of the similarity matrix

An analysis of the similarity distribution histogram (fig. 2) demonstrates that most of the transcribed sentences have a high level of similarity to the original.

The similarity density plot (fig. 3) confirms the effectiveness of the model, showing a

significant increase in the distribution density in the region of high similarity values.

The similarity matrix heat map (fig. 4) provides a visual assessment of the degree of correspondence between the original and transcribed phrases, where darker areas correspond to higher similarity.

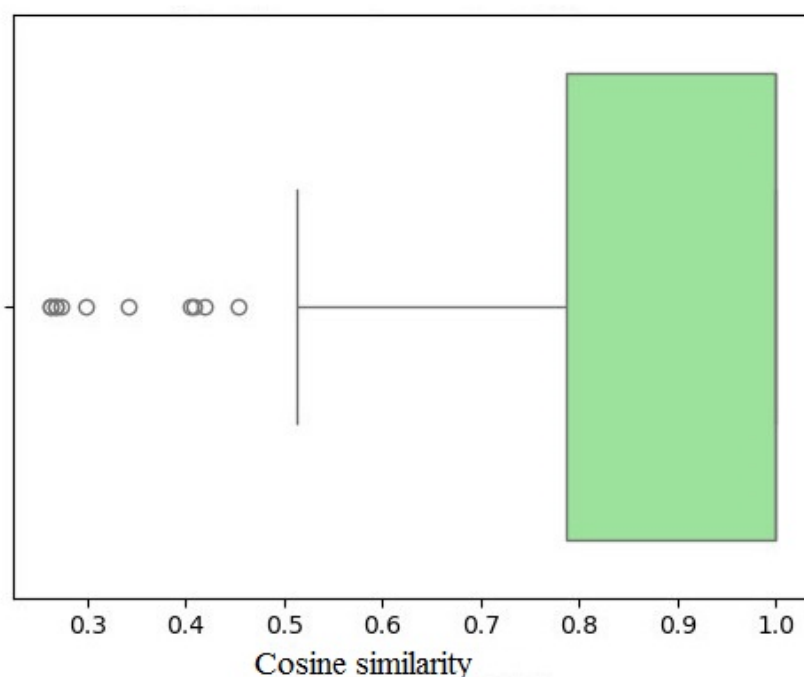


Fig. 5. Diagram of similarity spread

The similarity span diagram (fig. 5) clearly shows the distribution of similarity values, emphasizing the prevalence of high transcribing accuracy scores.

Discussion of the results obtained

Sheremetyevo International Airport named after Alexander Pushkin (Moscow) was chosen to demonstrate the model operation. During one day, radio conversations between air traffic controllers and flight crews in the approach area were recorded and processed. The analysis showed that the model successfully recognized 95% of standard phrases of radio conversations and 87% of non-standard situations. The model was particularly effective in recognizing the accents of crew members of international flights,

which confirms its adaptability to different linguistic peculiarities.

To understand examples of transcribing errors, here is a table of some of the terms and words that were mangled during the initial run of the program.

Thus, the integrated mathematical model of the transcribing system adapted to aviation conditions is an important innovative solution contributing to the improvement of safety, efficiency and reliability of air traffic. The overall percent of transcribing efficiency is 86.27%, which reflects a high result and proves the effectiveness of the application of this model [3]. Its successful implementation opens new horizons for the development of the aviation industry and ensures a more comfortable and safer air journey for all its participants.

Table 1

Results of transcribing the radio exchange

№	Incorrectly transcribed word	Correct option
1	Pass is 16-7	Passing 16700
2	across	to cross
3	AUSI	OZZZZI
4	with Galt	With GOLF
5	direct gas	direct GAASS
6	Hi	Sir
7	Doc. I'm	Delta
8	explanation	Expedite
9	going	Descend
10	Just	Descend
11	as far as stuff	I guess it's staff (as it's about crew)
12	if you have any remaining pounds	fuel remaining in pounds
13	half-matter incidents	Hazmats
14	contact the post 127.25	contact Approach 127.25
15	That's on a brush	Atlanta Approach
16	148 volts	148 souls (passengers+crew)
17	Delta 1192,	Delta 1192, roger,
18	DC, 210.	reduce speed 210
19	Delta 1192. Yes sir	Tower, Delta 1192. Yes sir
20	Planet Tower	Atlanta Tower
21	W1192	Delta 1192
22	A-Left	8L
23	They're going to stop	they gonna stop on the runway
24	I'm sorry, Alpha 6.	Papa and A6.
25	102 tower	Southwest 102, Tower
26	the runway right now	the runway eight right now
27	I'm Ronny, runway 8R.	line up runway 8R
28	I may be stepping to land on 8R.	I may be sidestepping to land on 8R.

Table 2

Name of errors in transcribing radio communication

Error's name	Number, words	Percent of errors, ratio of total (total 1076 words), %
Number of incorrectly transcribed words	28	2.6
Number of missing words	110	10.2
Number of unnecessary words	10	0.93
Total error		13.73

Conclusion

To summarize it is important to note that communication failures between pilot and air traffic controller during radio conversations [17] occur for the following reasons:

- 1) Factors of informational nature:
 - the complexity of the information entailing misunderstanding;
 - excessive compression of information;
 - incomprehensible or vague presentation of information by the interlocutors, which is logically followed by interrogation by the addressee;
- 2) Occupational factors:
- 3) Linguistic factors:
 - suboptimal text structure in terms of text types;
 - the existence of a bilingual environment in air traffic control, which has a negative impact on flight safety;
 - presence of grammatical and lexical-stylistic violations in the speech of communicators [18];
 - unclear pronunciation or incorrect pronunciation of English word;
 - if the speaker has a strong accent;
 - active use of interjections used by the speaker to buy time to formulate a thought;
- 4) Factors of a technical nature:
technical problems with communication, resulting in interference and poor audibility on the air.

Aviation communication errors are critical to aircraft safety. Even the smallest errors can lead to catastrophic consequences.

The application of an integrated mathematical model of the transcribing system, specially adapted to aviation conditions, represents a significant step in the development of modern aviation technology. The modelling results confirm its effectiveness and potential to improve air traffic safety and efficiency.

The accuracy of speech recognition, the ability to adapt to different conditions and accents, and fast real-time data processing make this model an integral part of aviation systems. Its

application helps to minimize errors and misunderstandings in communication between participants in the aviation process, which in turn improves flight safety.

Optimizing airspace management and improving the efficiency of aviation operations are made possible through the application of this model. It opens up new perspectives for the aviation industry, especially in the face of increasing air traffic and the introduction of autonomous systems.

The study demonstrated that the developed transcription model [19] achieves a high degree of accuracy, making it potentially useful for use in the aviation industry. Despite this some cases of low similarity between original and transcribed texts emphasize the need for further improvements to the model.

One of the key areas for improvement is the integration of advanced squelch techniques, such as the use of convolutional neural networks for more accurate extraction of speech signals from the noise environment. It is also advisable to develop adaptive algorithms that can train on data with different accents, which will improve the accuracy of recognizing speech with different dialects and accents.

An important aspect is the strengthening of exception handling and rare scenario handling techniques, which will allow the model to function correctly, even in non-standard situations. Applying regularization techniques such as Dropout and Batch Normalization will help to reduce the risk of overfitting and increase the general ability of the model.

In addition, expanding the training sample to include more diverse data will allow the model to better adapt to different use cases.

References

1. **Robertson, F.A.** (2008). *Airpeak*. Harlow: Pearson-Longman, 223 p.
2. **Elizarov, D.A.** (2023). Development of a transcription system for audio and videocontent. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, Analysis, Manage-*

ment, no. 4, pp. 87–95. DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.04.P.87 (in Russian)

3. **Ermilov, A.V.** (2015). About some mathematical methods to recognize speech. *Recheyyye tekhnologii*, no. 1-2, pp. 63–75. (in Russian)

4. **Baranov, D.A., Tupitsyna, A.S., Barabanov, V.F., Grebennikova, N.I., Zolnikov, K.V.** (2023). Development of a system for recognizing customer service quality using artificial neural network technology. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 19, no. 3, pp. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.3.001 (in Russian)

5. **Kutepova, O.S.** (2023). Problems and features of professional translation of aviation terms. *Nauchnyy aspekt*, vol. 21, no. 11, pp. 2565–2574. (in Russian)

6. **Fayzulkhakov, Ya.R., Preobrazhenskiy, N.B.** (2011). Modeling of radio exchange with compensation of Rayleigh fading. *Prospects for the development of information technologies*, no. 5, pp. 153–155. (in Russian)

7. **Voronyanskaya, E.L., Kuznetsova, O.M.** (2010). Phraseology of radiotelephony communications in English during international flights: Tutorial. Ulyanovsk: UVAU GA(I), 202 p. (in Russian)

8. **Klyuchnikov, Yu.I., Melnichenko, S.A.** (2002). Air traffic services in English: a training manual for ATM personnel. St. Petersburg: Akademiya GA, 176 p. (in Russian)

9. **Bondareva, L.V.** (2007). Teaching cadets of aviation institutions listening comprehension of radiotelephony communications: abstract of thesis. diss. ... kand. ped. Sc. dissertation. Pyatigorsk, 17 p. (in Russian)

10. **Akimova, O.V., Solnyshkina, M.I.** (2004). Typology of discourse in professional communication. In: *Aktualnyye problemy teorii kommunikatsii: sbornik nauchnykh trudov*. St. Petersburg: SPbGPU, pp. 253–270. (in Russian)

11. **Lysenko, S.V.** (2023). The phonetic system of the English language in aeronautical radiotelephony communications. *Philology. Theory & Practice*, vol. 16, no. 5, pp. 1477–1481. DOI: 10.30853/phil20230246 (in Russian)

12. **Wilson, D.** (2016). Failure to Communicate: Hearing - and understanding - the

spoken word is crucial to safe flight. *flightsafety.org*, October 20. Available at: <https://flightsafety.org/asw-article/failure-to-communicate/> (accessed: 16.06.2024).

13. **Simant'eva, K.L.** (2018). The specificity of teaching the language of radio exchange to future air traffic controllers. *Philology. Theory & Practice*, no. 4-2 (82), pp. 420–424. DOI: 10.30853/filnauki.2018-4-2.47 (in Russian)

14. **Sereda, A.M., Varushkina, A.V.** (2019). Causes of miscommunication in radiotelephony of civil aviation. In: *Studencheskiy nauchnyy forum – 2019: materialy XI Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii*. Available at: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018014507> (accessed: 16.06.2024). (in Russian)

15. **Osipova, O.A.** (2016). Linguistic peculiarities of the discourse of radiotelephony in civil aviation. *Prepodavatel XXI vek*, no. 2, pp. 383–390. (in Russian)

16. **Vysotsky, V.Z.** (2006). About some features, concerning speech information at a radioexchange. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 99, pp. 94–98. (in Russian)

17. **Shlyamova, A.A.** (2013). Integration and context approach in civil aviation institute language proficiency training. *Nauchnyy vestnik UVAU GA(I)*, no. 5, pp. 73–76. (in Russian)

18. **Kutepova, O.S.** (2023). Difficulties in communication between pilots and dispatchers in a foreign language: research of problems and search for solutions. *Biznes i obshchestvo*, no. 4 (40), ID: 45. Available at: http://business-society.ru/2023/4-40/45_kutepova.pdf (accessed: 21.06.2024). (in Russian)

19. **Skryabinskaya, O.V.** (2014). Class activities in developing foreign language professional competence of future aviation specialists. *European science review*, no. 3-4, pp. 95–98. (in Russian)

Список литературы

1. **Robertson F.A.** Airspeak. Harlow: Pearson-Longman, 2008. 223 p.

2. **Елизаров Д.А.** Разработка системы транскрибации аудио- и видеоконтента //

Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ, управление». 2023. № 4. С. 87–95. DOI: 10.18137/RNU.V9187.23.04.P.87

3. **Ермилов А.В.** О некоторых математических методах распознавания речи // Речевые технологии. 2015. № 1-2. С. 63–75.

4. **Баранов Д.А.** Разработка системы распознавания качества обслуживания клиентов с помощью технологии искусственных нейронных сетей / Д.А. Баранов, А.С. Тупицына, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, К.В. Зольников // Вестник ВГТУ. 2023. Т. 19, № 3. С. 7–12. DOI: 10.36622/VSTU.2023.19.3.001

5. **Кутепова О.С.** Проблемы и особенности профессионального перевода авиационных терминов // Научный аспект. 2023. Т. 21, № 11. С. 2565–2574.

6. **Файзулхаков Я.Р., Преображенский Н.Б.** Моделирование радиообмена с компенсацией рэлеевских замираний // Перспективы развития информационных технологий. 2011. № 5. С. 153–155.

7. **Воронянская Е.Л., Кузнецова О.М.** Фразеология радиообмена на английском языке при выполнении международных полетов: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2010. 202 с.

8. **Ключников Ю.И., Мельниченко С.А.** Обслуживание воздушного движения на английском языке: учеб. пособие для персонала ОВД. СПб.: Академия ГА, 2002. 176 с.

9. **Бондарева Л.В.** Обучение курсантов авиационных вузов пониманию на слух радиотелефонной фразеологии: автореф. дисс. ... канд. пед. наук. Пятигорск, 2007. 17 с.

10. **Акимова О.В., Солнышкина М.И.** Типология дискурса в профессиональной коммуникации // Актуальные проблемы теории коммуникации: сборник научных трудов. СПб.: СПбГПУ, 2004. С. 253–270.

11. **Лысенко С.В.** Фонетическая система английского языка радиообмена в авиации // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2023. Т. 16, № 5. С. 1477–1481. DOI: 10.30853/phil20230246

12. **Wilson D.** Failure to Communicate: Hearing - and understanding - the spoken word is crucial to safe flight [Электронный ресурс] // flightsafety.org. 2016. October 20. URL: <https://flightsafety.org/asw-article/failure-to-communicate/> (дата обращения: 16.06.2024).

13. **Симантьева К.Л.** Специфика обучения языку радиообмена будущих авиадиспетчеров // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2018. № 4-2 (82). С. 420–424. DOI: 10.30853/filnauki.2018-4-2.47

14. **Серета А.М., Варушкина А.В.** Причины сбоев в коммуникации при ведении радиопереговоров гражданской авиации [Электронный ресурс] // Студенческий научный форум – 2019: материалы XI Международной студенческой научной конференции. URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018014507> (дата обращения: 16.06.2024).

15. **Осипова О.А.** Некоторые языковые особенности дискурса радиообмена гражданской авиации // Преподаватель XXI век. 2016. № 2. С. 383–390.

16. **Высоцкий В.З.** О некоторых особенностях, касающихся речевой информации при радиообмене // Научный Вестник МГТУ ГА. 2006. № 99. С. 94–98.

17. **Шлямова А.А.** Методика интегративно-контекстной языковой подготовки курсантов авиационного вуза // Научный вестник УВАУ ГА(И). 2013. № 5. С. 73–76.

18. **Кутепова О.С.** Трудности в общении между пилотами и диспетчерами на иностранном языке: исследование проблем и поиск решений [Электронный ресурс] // Бизнес и общество. 2023. № 4 (40). ID: 45. URL: http://business-society.ru/2023/4-40/45_kutepova.pdf (дата обращения: 21.06.2024).

19. **Скрябинская О.В.** Система упражнений в процессе формирования компетенции профессионального иноязычного общения будущих авиационных специалистов // European science review. 2014. № 3-4. С. 95–98.

Information about the authors

Blessing I. Ogunvoul, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ogunvouluni@yandex.ru.

Olga S. Kutepova, Senior Lecturer, Special Language Training Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, koc87@inbox.ru.

Сведения об авторах

Огунвоул Блессинг Израилевич, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, ogunvouluni@yandex.ru.

Кутепова Ольга Сергеевна, старший преподаватель кафедры специальной языковой подготовки, МГТУ ГА, koc87@inbox.ru.

Поступила в редакцию	19.06.2024	Received	19.06.2024
Одобрена после рецензирования	06.10.2024	Approved after reviewing	06.10.2024
Принята в печать	28.11.2024	Accepted for publication	28.11.2024

УДК 656.7.025

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-56-71

Механизмы государственной поддержки обеспечения комплексного развития авиатранспортной системы и региональных маршрутных сетей страны

В.А. Пенкина¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Одним из ключевых направлений развития транспортной системы Российской Федерации и ее регионов является совершенствование инфраструктуры и маршрутных сетей пассажирских авиаперевозок, в том числе в труднодоступных регионах Российской Федерации. Региональная авиация – важный сегмент сети авиационных перевозок пассажиров и всей транспортной системы страны. В совокупности с местными авиаперевозками региональная авиация в большинстве районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей обеспечивает их транспортную доступность, авиационную подвижность населения и во многих случаях является безальтернативным видом транспорта. Для обеспечения стабильного функционирования воздушного транспорта и развития транспортной доступности регионов Российской Федерации реализуются меры государственной поддержки авиаперевозчиков. В статье рассмотрены основные цели и меры государственного субсидирования авиаперевозок в транспортной системе страны и ее регионов, а также финансовые и нефинансовые меры их государственной поддержки, в том числе в условиях внешнего санкционного воздействия. Предложена схема субсидирования, которая консолидирует действующие механизмы для обеспечения сбалансированной минимизации рисков для государства и авиаперевозчиков при расширении маршрутной сети страны и регионов. Анализируются процессы развития механизмов субсидирования и соответствующей нормативно-методической базы, результативность их реализации, в том числе с учетом специфики северных и труднодоступных регионов.

Ключевые слова: авиатранспортная доступность, авиационная подвижность, лизинг, льготные категории граждан, маршрутная сеть, местные перевозки, пассажиропоток, программы субсидирования, санкционное воздействие, софинансируемые маршруты.

Для цитирования: Пенкина В.А. Механизмы государственной поддержки обеспечения комплексного развития авиатранспортной системы и региональных маршрутных сетей страны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 56–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-56-71

The mechanisms of state support for the integrated development of the country's air transportation system and regional route networks

V.A. Penkina¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: One of the key areas of development of the Russian Federation transport system and its regions is the improvement of infrastructure and route networks of passenger air transportation, including in hard-to-reach regions of the Russian Federation. Regional aviation is an important segment of the passenger air transportation network and the entire transport system of the country. In combination with local air transportation, regional aviation in most areas of the Far North and areas equated to them ensures their transport accessibility, aviation mobility of the population and in many cases is an alternative mode of transport. The state support measures for air carriers are being implemented to ensure the stable functioning of air transport and the development of transport accessibility in the regions of the Russian Federation. The article considers the main goals and measures of state subsidization of air transportation in the transport system of the country and its regions, as well as financial and non-financial measures of their state

support, including in the context of external sanctions. A subsidy scheme has been proposed to consolidate the existing mechanisms thus ensuring the balanced risk minimization for the state and air carriers while expanding the route network of the country and regions. The processes of development of subsidy mechanisms and the corresponding regulatory and methodological framework, the effectiveness of their implementation, including taking into account the specifics of the northern and hard-to-reach regions, are analyzed.

Key words: air transport accessibility, aviation mobility, leasing, preferential categories of citizens, route network, local transportation, passenger traffic, subsidy programs, sanctions impact, co-financed route.

For citation: Penkina, V.A. (2024). The mechanisms of state support for the integrated development of the country's air transportation system and regional route networks. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 56–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-56-71

Введение

Обеспечение транспортной доступности перевозок и повышение качества жизни населения являются важнейшими задачами, в которых ключевую роль играет воздушный транспорт [1]. Развитие авиационной мобильности населения является одним из важнейших факторов эффективного развития страны. Государственная поддержка развития воздушной транспортной системы страны и ее регионов в России имеет специфику, связанную с ее уникальными географическими и демографическими особенностями:

- географическое положение государства – большие расстояния, низкая плотность населения и значительная удаленность населенных пунктов, особенно расположенных в регионах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, что значительно осложняет обеспечение связности регионов и их транспортной доступности;
- наличие авиационной промышленности, которая планирует производство и внедрение в эксплуатацию новых типов воздушных судов;
- возможности развития туризма внутри страны.

Российская гражданская авиация (ГА) сейчас демонстрирует восстановительный рост [2, 3]: согласно бюллетеню «Транспорт России» (далее – бюллетень 2023 г.) количество пассажиров, перевезенных российскими авиакомпаниями в 2023 году, составило около 105,4 млн человек, что на 10,7 % больше, чем в

2022 году^{1,2}. Однако длительное время наблюдается отставание роста российских региональных авиаперевозок от общих темпов развития воздушного транспорта в целом [4–6].

Высокая значимость воздушного транспорта (ВТ) для населения страны и регионов, особенно удаленных и труднодоступных, диктует необходимость значительной государственной поддержки отрасли, особенно в отношении реализации государственных инвестиционных программ и программ субсидирования воздушных перевозок. Развивающийся комплекс нормативных и методических документов в области субсидирования перевозок является важным элементом отраслевой системы государственного регулирования ВТ, фактором обеспечения эффективного развития транспортной системы и ее гармоничного функционирования в соответствии с общественными потребностями, международными и российскими стандартами, обеспечивающими поддержку российских авиакомпаний для достижения их конкурентоспособности и устойчивого развития инфраструктуры, включая аэропорты, навигационные системы, центры технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

¹ Транспорт России. Информационно-статистический бюллетень. 2023 год [Электронный ресурс] // Министерство транспорта Российской Федерации. Официальный сайт. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/7/13259> (дата обращения: 03.02.2024).

² Статистические данные [Электронный ресурс] // Росавиация. Официальный сайт. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-vozdushnye-perevozki-stat-dannie/> (дата обращения: 03.02.2024).

Развитие механизмов субсидирования

Действия правительства Российской Федерации в области реализации концепции государственного субсидирования соответствуют практике других стран с обширной территорией и наличием труднодоступных регионов и населенных пунктов, таких как США, Канада, Норвегия, Чили, Бразилия, Австралия [7].

Программы субсидирования в Российской Федерации решают следующие задачи:

- обеспечения доступности авиатранспортных услуг;
- поощрения внедрения в эксплуатацию новых типов воздушных судов, производимых российской авиационной промышленностью;
- снижения влияния негативных последствий международных санкционных ограничений.

Современный этап развития системы субсидирования воздушных перевозок в Российской Федерации можно отсчитывать от принятия постановления Правительства Российской Федерации от 27.03.2013 № 265 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности региональных перевозок пассажиров воздушным транспортом на территории Северо-Западного, Сибирского, Уральского и Дальневосточного федеральных округов»³. Программа была разработана для стимулирования роста доступности авиатранспортных услуг и включала предоставление субсидий авиаперевозчикам, выполняющим рейсы по определяемым госу-

дарством маршрутам с отсутствующим железнодорожным сообщением. Сумма субсидии зависела от количества перевезенных льготных пассажиров, субсидия предоставлялась гражданам Российской Федерации в возрасте до 23 лет, женщинам в возрасте свыше 55 лет и мужчинам свыше 60 лет.

Позднее ограничения по возрасту были сняты, однако субсидирование по количеству перевезенных пассажиров на заданном постановлением перечне маршрутов оказалось неэффективным, и программа была закрыта. Ей на смену вышло постановление Правительства Российской Федерации от 25.12.2013 № 1242 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление региональных воздушных перевозок пассажиров на территории Российской Федерации и формирование региональной маршрутной сети» (далее – постановление № 1242)⁴, которое и составляет основу современного механизма государственной поддержки [8, 9]. Особенности данного постановления:

- государство не фиксировало заранее перечень субсидируемых маршрутов, но сформулировало четкие и достаточно логичные правила их отбора на основании заявок и обоснований авиакомпаний – маршруты, софинансируемые субъектами Российской Федерации, и те, на которых используется авиатехника российского производства, получили приоритет в очередности включения в перечень субсидируемых, но если отсутствует авиаперевозчик, планирующий использовать для осуществления региональной воздушной перевозки современные воздушные суда, произведенные на территории Российской Федерации пос-

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 27.03.2013 № 265 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности региональных перевозок пассажиров воздушным транспортом на территории Северо-Западного, Сибирского, Уральского и Дальневосточного федеральных округов» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144156/ (дата обращения: 03.02.2024).

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 25.12.2013 № 1242 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление региональных воздушных перевозок пассажиров на территории Российской Федерации и формирование региональной маршрутной сети» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156427/ (дата обращения: 03.02.2024).

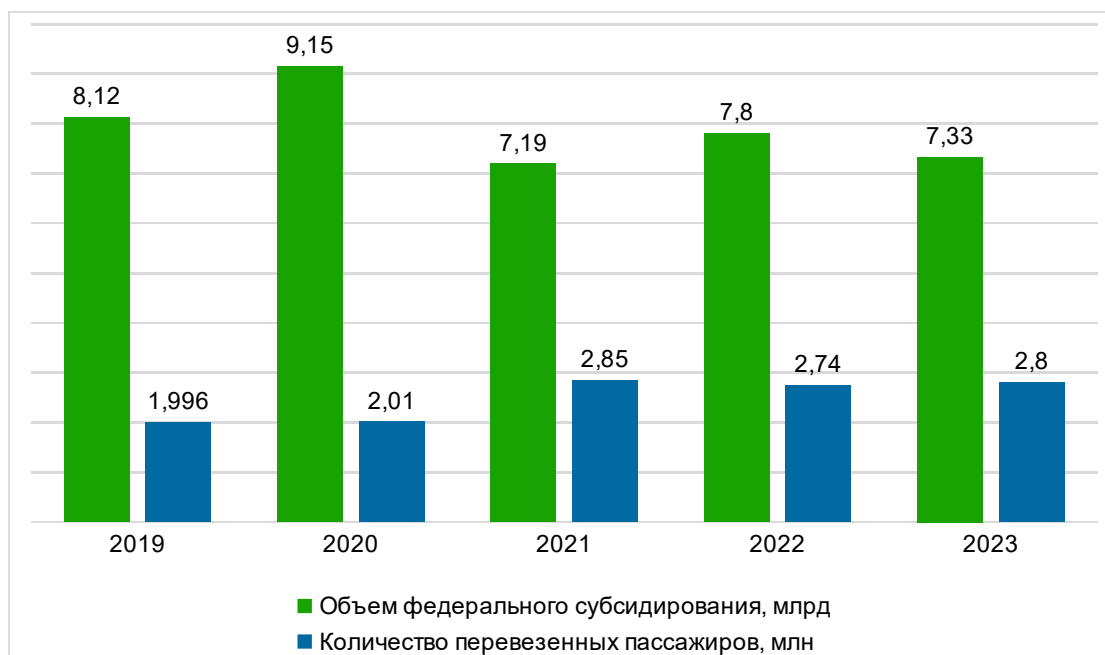


Рис. 1. Ретроспективные данные о количестве перевезенных пассажиров и объеме федерального субсидирования при реализации постановления Правительства РФ от 25.12.2013 № 1242

Fig. 1. Retrospective data on the number of passengers transported and the number of federal subsidies for the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation dated 12/25/2013 No. 1242

ле 01.01.2009, то договор заключается с авиаперевозчиком, планирующим использовать воздушные суда иностранного производства, обеспечивающим наилучшее значение комплексного показателя эффективности субсидирования предельного пассажирооборота;

- сумма предоставляемой субсидии зависит не от количества перевезенных льготных пассажиров, а от количества выполненных льготных авиарейсов и кресельной емкости предоставляемого авиакомпанией самолета (постановление № 1242).

Программа показала высокую востребованность и эффективность. В 2023 году объем федерального субсидирования составил 7,33 млрд руб.; по 296 маршрутам выполнено 41 275 рейсов; перевезено около 2,8 млн пассажиров 18 авиакомпаниями (рис. 1).

В 2024 году плановый объем финансирования составляет 8,1 млрд руб. По данным бюллетеня 2023 г. комиссия Минтранса России утвердила перечень субсидируемых маршрутов в количестве 231 для 15 перевозчиков (данные на начало года).

Представленная на рис. 2 динамика изменения среднего значения федерального субсидирования на одного пассажира при реализации постановления № 1242 показывает взаимосвязь уровня федерального субсидирования и количества перевезенных пассажиров.

В программе перечень маршрутов не фиксирован, и каждый год маршруты в перечне могут быть разные, что в свою очередь влияет на среднее удельное значение федеральной субсидии.

Отметим, что за период 2019–2023 годов значительно снизилось среднее удельное значение величины федеральной субсидии, что связано с расширением практики софинансирования перевозок из федерального и региональных бюджетов.

В целях эффективного расходования средств федерального бюджета предлагается пересмотреть критерии очередности по включению в перечень маршрутов.

В 2024 году авиакомпаниями было подано 199 заявок на включение в перечень субсидируемых маршрутов, в том числе входящих в Сибирский федеральный округ (СФО), из них

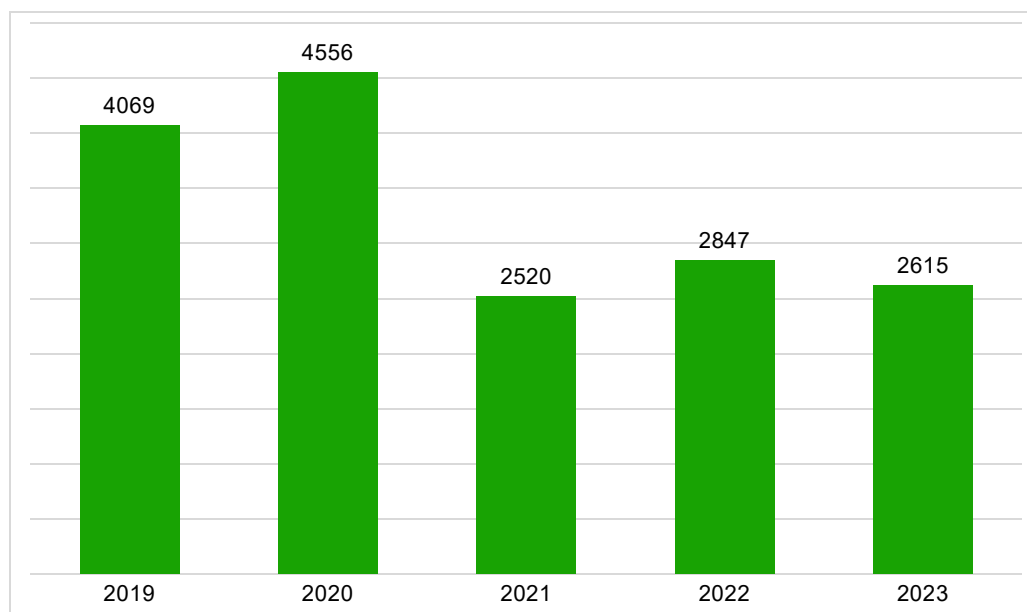


Рис. 2. Динамика изменения среднего значения федерального субсидирования на одного пассажира при реализации постановления Правительства РФ от 25.12.2013 № 1242

Fig. 2. Dynamics of changes in the average value of federal subsidies per passenger in the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation dated 12/25/2013 No. 1242

142 заявки имели I–III очередность включения в перечень субсидируемых (маршруты, на которых хотя бы один из аэропортов (посадочных площадок) расположен в населенном пункте, являющемся труднодоступным, в отношении которых субъектом (-ами) Российской Федерации принято решение о предоставлении авиаперевозчику из бюджета субъекта (-ов) Российской Федерации субсидии на осуществление воздушной перевозки с территории этого субъекта и (или) на его территорию в размере 50 % и более предельного размера субсидии либо менее 50 % и в отношении которых субъектом (-ами) принято решение о предоставлении авиаперевозчику из бюджета субъекта (-ов) субсидии на осуществление воздушной перевозки с территории этого субъекта и (или) на его территорию в размере более 60 % предельного размера субсидии). В перечень субсидируемых вошли 70 маршрутов в (из) СФО с федеральным финансированием 3 351,3 млн руб., имеющие I–III очередность. К концу года по данным маршрутам планируется перевозка 1,3 млн пассажиров.

Предлагается в первую очередь отдавать приоритет маршрутам, при реализации кото-

рых размер федеральной субсидии, предоставляемой за перевозку 1 пассажира на одном рейсе в одном направлении, минимален. Рассмотрим 142 заявки по предложенному критерию, который рассчитывается как отношение запрашиваемой суммы субсидии на год по маршруту к произведению количества рейсов туда-обратно за год на кресельную емкость. Алгоритм отбора маршрутов: в заявку включаются маршруты, начиная от минимального расходования средств федерального бюджета на одного пассажира до максимального в каждой группе маршрутов, разделенных по протяженности, где шаг равен 100 км. Сумма расходования средств на одного пассажира со стороны государства при этом должна быть равной или меньшей утвержденной по маршрутам.

При таком отборе заявок от авиакомпаний в перечень может войти 81 маршрут, федеральное финансирование будет равным 2 783,0 млн руб., а количество перевезенных пассажиров на конец года при 100%-ной загрузке воздушного судна – 2,99 млн человек, тем самым данный подход способствует эффективному расходованию средств федерального бюджета.

В отрасли сейчас применяются механизмы субсидирования как «по рейсам», так и «по пассажирам», например в рамках постановлений Правительства Российской Федерации^{5,6,7}:

- от 29.12.2009 № 1095 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на обеспечение доступности воздушных перевозок пассажиров с Дальнего Востока в европейскую часть страны и в обратном направлении»;
- от 17.12.2012 № 1321 «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий на обеспечение доступности воздушных перевозок пассажиров из г. Калининграда в европейскую часть страны и в обратном направлении»;
- от 29.04.2014 № 388 «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок пассажиров в г. Симферополь и в обратном направлении».

Вышеперечисленные правила предоставления субсидий в настоящее время утратили

силу. Правительство Российской Федерации их консолидировало: реализуется постановление Правительства Российской Федерации от 02.03.2018 № 215 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок населению и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» (далее – постановление № 215)⁸. Программа нацелена на возмещение недополученных доходов в связи с продажей авиабилетов льготным категориям граждан по утвержденным перечням маршрутов, входящим в Дальневосточный федеральный округ, в (из) г. Калининград, в (из) г. Симферополь.

В 2022 году в постановление № 215 были внесены изменения: снят лимит на перевозку пассажиров в возрасте до 23 лет, а также женщин в возрасте свыше 55 лет и мужчин в возрасте свыше 60 лет, инвалидов, а также лиц, имеющих удостоверения многодетной семьи, по маршрутам, входящим в Дальневосточный федеральный округ. По новым условиям авиаперевозчики могут перевозить пассажиров сверх установленного лимита с последующей компенсацией авиакомпаниям в следующем году без проведения дополнительного конкурсного отбора.

⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2009 № 1095 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на обеспечение доступности воздушных перевозок пассажиров с Дальнего Востока в европейскую часть страны и в обратном направлении» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95833/ (дата обращения: 03.02.2024).

⁶ Постановление Правительства Российской Федерации от 17.12.2012 № 1321 «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий на обеспечение доступности воздушных перевозок пассажиров из г. Калининграда в европейскую часть страны и в обратном направлении» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139314/ (дата обращения: 03.02.2024).

⁷ Постановление Правительства Российской Федерации от 29.04.2014 № 388 «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок пассажиров в г. Симферополь и в обратном направлении» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_162788/ (дата обращения: 03.02.2024).

⁸ Постановление Правительства Российской Федерации от 02.03.2018 № 215 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок населению и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_292244/ (дата обращения: 03.02.2024).

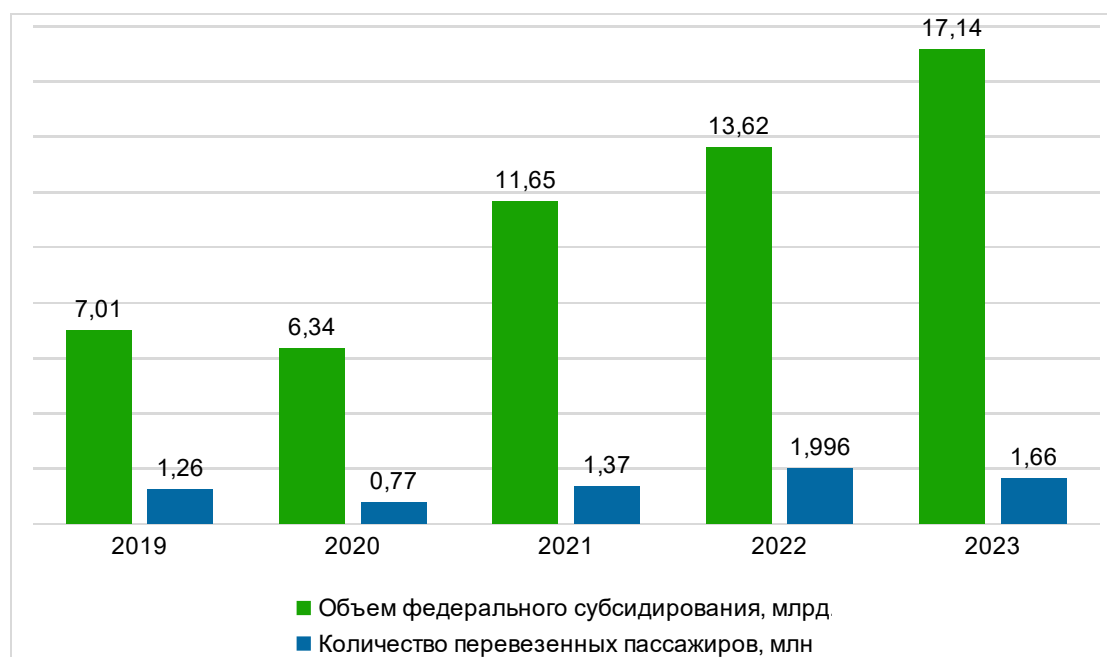


Рис. 3. Ретроспективные данные о количестве перевезенных пассажиров и объеме федерального субсидирования при реализации постановления Правительства РФ от 02.03.2018 № 215

Fig. 3. Retrospective data on the number of passengers transported and the number of federal subsidies for the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/02/2018 No. 215

В 2023 году объем федерального субсидирования согласно постановлению № 215 составил 17,14 млрд руб. (с учетом погашения задолженности за полеты, выполненные сверх установленного лимита в 2022 году), полеты выполнялись по 87 маршрутам 10 авиаперевозчиками, было перевезено 1,66 млн пассажиров (рис. 3).

В 2024 году плановый объем федерального субсидирования составляет 11,5 млрд руб., комиссией Минтранса России средства распределены между 11 авиаперевозчиками (бюллетень 2023 г.).

Рост пассажиропотока обусловлен снятием ограничений на перевозку пассажиров в основном по маршрутам Дальневосточного федерального округа для льготных категорий граждан.

Представленная на рис. 4 динамика изменения среднего значения федерального субсидирования на одного пассажира при реализации постановления Правительства Российской Федерации от 02.03.2018 № 215 показывает взаимосвязь уровня удельного федерального субсидирования пассажиров и при-

меняемых отраслевых правил: уровни 2022 и 2023 годов показывают изменение данных значений вследствие изменений в правилах, при которых авиаперевозчик может выполнять рейсы сверх установленного лимита с дальнейшей компенсацией в следующем году.

Целью действующей программы субсидирования является расширение маршрутной сети. При открытии новых направлений для авиакомпаний действуют высокие риски получения убытков из-за недогрузки рейсов, поэтому целесообразно развитие следующей схемы.

1. На первом этапе «раскатки» маршрута в условиях низкого пассажиропотока для снижения рисков авиакомпаний государство предоставляет им субсидию исходя из числа выполненных рейсов, тем самым переводя часть рисков на себя (в соответствии с международным опытом период «раскатки» составляет не менее 2 лет).

2. На втором этапе «раскатки» маршрута на фоне роста пассажиропотока риски получения убытков авиакомпанией из-за недоста-

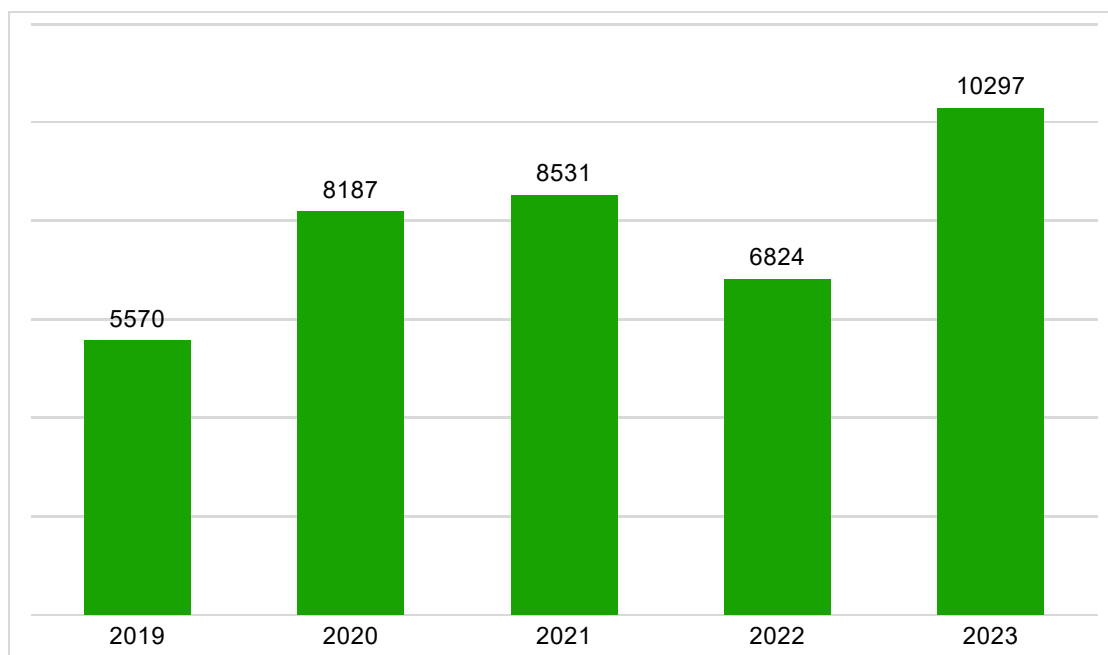


Рис. 4. Динамика изменения среднего значения федерального субсидирования на одного пассажира при реализации постановления Правительства РФ от 02.03.2018 № 215

Fig. 4. Dynamics of changes in the average value of federal subsidies per passenger in the implementation of the Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/02/2018 No. 215

точной загрузки рейсов существенно снижаются, поэтому предоставление государством субсидии будет производиться исходя из числа перевезенных пассажиров, что позволяет снизить риски роста избыточных расходов государства на субсидирование, тем самым переводя часть рисков на авиакомпании.

При определении переходного значения необходимо рассчитать размер субсидии, предоставляемой за перевозку одного пассажира на одном рейсе в одном направлении. Для этого используем таблицу предельного размера субсидии, предоставляемой авиаперевозчику на один рейс в одном направлении в зависимости от количества пассажирских мест на воздушном судне и протяженности маршрута:

$$L_{ij} = l_{ij} \cdot 0,39 / \mu_{ni},$$

где 0,39 – коэффициент софинансирования (для расчета выбрана доля софинансирования, равная 39 %);

l_{ij} – значение предельного размера субсидии, предоставляемой авиаперевозчику на

один рейс в одном направлении в зависимости от количества пассажирских мест на воздушном судне и протяженности маршрута, регламентированное Приложением № 2 к Постановлению № 1242;

μ_{ni} – количество пассажирских мест на борту используемого воздушного судна в каждой группе регламентированных Приложением № 2 к Постановлению № 1242 значений;

μ – среднее арифметическое значение.

Расчеты, произведенные в соответствии с формулой для каждой группы в зависимости от количества пассажирских мест и протяженности маршрута в одном направлении, для наглядности представим в табл. 1.

Представленные в табл. 1 значения показывают предельный размер субсидии, предоставляемой за перевозку одного пассажира на одном рейсе в одном направлении в зависимости от количества пассажирских мест на борту ВС и протяженности маршрута.

Из полученных данных можем сделать вывод: при перевозке 1 пассажира по маршруту на расстояние менее 200 км на воздуш-

Таблица 1
Table 1

Расчет предельного размера субсидии, предоставляемой за перевозку одного пассажира на одном рейсе в одном направлении, руб.

Calculation of the maximum amount of subsidy provided for the transportation of 1 passenger on one flight in one direction, rub.

Количество пассажирских мест	Протяженность маршрута в одном направлении												
	менее 200 км	201–300 км	301–400 км	401–500 км	501–600 км	601–700 км	701–800 км	801–900 км	901–1000 км	1001–1100 км	1101–1200 км	1201–1400 км	1401 и более км
4–10	1 197	1 396	1 795	2 194	2 593	2 991	3 390	3 789	4 188	4 587	4 986	5 584	7 578
11–20	862	1 005	1 293	1 580	1 867	2 155	2 442	2 729	3 016	3 304	3 591	4 022	5 458
21–40	537	618	779	941	1 103	1 264	1 426	1 587	1 749	1 911	2 072	2 315	3 123
41–50	632	710	867	1 024	1 180	1 337	1 493	1 650	1 807	1 963	2 120	2 355	3 138
51–83	540	594	702	809	917	1 025	1 133	1 240	1 348	1 456	1 564	1 725	2 264
84–103	435	474	552	630	708	786	865	943	1 021	1 099	1 177	1 294	1 685

ном судне вместимостью 4–10 человек и с долей софинансирования, равной 39 % (первая очередь при отборе авиаперевозчиков), предельная предоставляемая сумма должна быть меньше либо равной 1 197 руб., также при перевозке одного пассажира по маршруту, расстояние которого 1 401 км и более, на воздушном судне вместимостью 84–103 человека и с долей софинансирования, равной 39 %, предельная предоставляемая сумма должна быть меньше либо равной 1 685 руб.

Рассмотрим пример: авиакомпания ПАО «Аэрофлот» в 2023 году выполняла рейсы по маршруту Санкт-Петербург – Апатиты с долей софинансирования 39 %, пассажирооборот составил 54,4 тыс. пассажиров, выполнено 293 рейса в одном направлении. Сумма, выделенная на данный маршрут, составила 51 647,5 тыс. руб., полеты осуществлялись на отечественном воздушном судне SSJ-100. Размер субсидии, предоставляемой за перевозку одного пассажира на одном рейсе в одном направлении, составил 949 руб., процент заполняемости кресел – 98,84 %. Данный маршрут по достижении 93,46 % заполняемости кресел можно перевести на субсидирование по пассажирам.

Предложенная схема выгодна для государства и авиаперевозчика, так как позволит эффективнее расходовать бюджетные средства и сбалансированно минимизировать риски.

В соответствии с поручением Президента Российской Федерации по созданию Единой дальневосточной авиакомпании (ЕДВАК) на базе авиакомпании «Аврора» утверждено постановление Правительства Российской Федерации от 13.07.2021 № 1172 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление воздушных перевозок пассажиров по социально значимым маршрутам Дальневосточного федерального округа»⁹.

ЕДВАК создана с целью обеспечения роста доступности перевозок населения регионов

⁹ Постановление Правительства Российской Федерации от 13.07.2021 № 1172 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление воздушных перевозок пассажиров по социально значимым маршрутам Дальневосточного федерального округа» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_390285/ (дата обращения: 03.02.2024).

Дальневосточного федерального округа и повышения транспортной связанности регионов Дальнего Востока между собой и с другими регионами России [8, 9]. Авиакомпания обеспечивает динамичный рост пассажиропотока: в 2021 году объем федерального субсидирования составил 1,2 млрд руб. и перевезено 62 тыс. субсидированных пассажиров, в 2022 году объем федерального субсидирования составил 5,7 млрд руб. и перевезено 355 тыс. субсидированных пассажиров, в 2023 году объем федерального субсидирования составил 5,98 млрд руб. и перевезено 385,2 тыс. субсидированных пассажиров, в 2024 году объем федерального субсидирования составляет 5,5 млрд руб. (бюллетень 2023 г.).

Обеспечение авиатранспортной связанности страны – одна из главных государственных задач, указанная в Транспортной стратегии Российской Федерации. И немаловажную роль в этом играет развитие региональных перевозок [2].

Географическое положение территории ДФО диктует необходимость достижения высокого уровня транспортной доступности в регионах. Развитие местных перевозок крайне неравномерно осуществляется по территории страны – в основном такие перевозки сохранились в труднодоступных регионах с суровыми климатическими условиями и неразвитой сетью регулярных наземных сообщений. Мероприятия по поддержке и развитию местных авиаперевозок до настоящего времени проводятся за счет средств бюджетов соответствующих субъектов Российской Федерации, финансовое состояние которых не позволяет им в полной мере обеспечивать развитие местной авиасети. Количество перевезенных пассажиров на местных воздушных линиях в настоящее время составляет около 4 % от общего количества перевезенных пассажиров на внутренних воздушных линиях в 2023 году [7, 10]. Поэтому для поддержания устойчивого роста авиационной подвижности населения северных и удаленных регионов Российской Федерации и для предотвращения оттока из них населения целесообразно расширение софинансирования субъектов Российской Федерации при обеспечении до-

ступности местных перевозок населению в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях. Данная мера должна быть направлена на расширение маршрутной сети и обеспечение ценовой доступности перевозок по местным воздушным линиям (в части безальтернативных маршрутов).

Рассматривая опыт зарубежных стран в применении механизмов государственной поддержки авиаперевозок, нужно обратить внимание на США – страну, обладающую самой развитой системой внутренних воздушных перевозок в мире. История субсидирования в США начинается с 1978 года, после введения в США дерегулирования воздушного транспорта, когда многие штаты потеряли местных авиаперевозчиков в связи с убыточностью их функционирования. В связи с этим для поддержки регионального авиасообщения конгресс США утвердил программу Essential Air Service (EAS).

Департамент транспорта США (DOT), который управляет программой, предоставляет субсидии перевозчикам, желающим оказывать авиатранспортные услуги в труднодоступных населенных пунктах, определенные перечнем List of Eligible Points, который периодически пересматривается. В 2023 году программа EAS была направлена на обеспечение доступа 60 населенным пунктам на Аляске и 110 населенным пунктам в 48 смежных штатах к национальной системе регулярных воздушных перевозок при финансировании около 370 млн долларов¹⁰.

Основные принципы финансирования программы EAS в США следующие:

- рейс должен быть выполнен при любой загрузке;
- изменение маршрута и замена воздушного судна на более экономичное не допускаются;
- степень удовлетворенности спроса на рынке авиаперевозок определяется DOT;
- при авиаобслуживании должен осуществляться подвоз пассажиров к узловому аэро-

¹⁰ EAS [Электронный ресурс] // U.S. Department of Transportation. Официальный сайт. URL: <https://www.transportation.gov/tags/eas?page=0> (дата обращения: 03.02.2024).

порту, определенному как средний или большой узловой аэропорт;

- воздушное судно должно подбираться индивидуально для конкретного региона;
- рейсы должны выполняться в разумные сроки с учетом необходимости для пассажиров пересаживаться на стыковочные рейсы [11].

Воздушный флот США, эксплуатируемый на субсидируемых маршрутах, значительно отличается от российского как по типам воздушных судов, так и по их пассажироместимости. В США на таких маршрутах почти не применяются самолеты с большой вместимостью (исключение составляет B737-700). В России, наоборот, практически отсутствуют ВС, предназначенные для перевозки небольшого числа пассажиров. Наименьшая вместимость в России – это 17 кресел у Ан-28, в то время как на Аляске активно используются легкомоторные самолеты самых разных моделей, рассчитанные на перевозку от трех до девяти человек.

Помимо вышеизложенных мер по субсидированию региональных и местных перевозок, в Российской Федерации существуют меры господдержки, направленные на стимулирование производства и внедрение в эксплуатацию новых типов ВС, производимых российской авиапромышленностью, что является одним из приоритетных направлений государственной политики [12].

В целях обеспечения приемлемых для авиакомпаний лизинговых цен и поддержки плановых продаж отечественных ВС (улучшения условий структурирования сделок на первичном рынке), развития в Российской Федерации лизинга ВС, а также развития вторичного рынка отечественных ВС (формирования цены отечественных ВС на вторичном рынке) Минпромторгом России предоставляется субсидия организациям в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации от 22.10.2012 № 1073 «О предоставлении субсидий российским лизинговым компаниям на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации разви-

тия “ВЭБ.РФ” на закупку ВС с последующей их передачей российским авиакомпаниям по договорам лизинга (аренды), а также указанным компаниям и производителям ВС по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации развития “ВЭБ.РФ” на приобретение тренажеров для российских воздушных судов»¹¹.

Использование механизма государственной поддержки в части субсидирования процентных ставок позволяет решать проблемы высокой стоимости заемных средств, снижения финансовой нагрузки на лизинговые компании и частично компенсировать их издержки [13].

С 2023 по 2025 год в федеральном бюджете предусмотрены средства на более чем 30 млрд руб. на субсидирование кредитов для лизинговых компаний, реализующих обеспечение внедрения в эксплуатацию новой российской авиатехники.

Программа субсидирования для лизинговых компаний, приобретающих российское авиационное оборудование, была запущена в 2012 году. В рамках этой программы государство возмещает 90 % процентных ставок по кредитам. Этот инструмент поддержки стал особенно актуальным после введения ограничений со стороны других государств.

Успешная реализация государственной поддержки в виде льготного лизинга и частичной компенсации затрат в целях созда-

¹¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 22.10.2012 № 1073 «О предоставлении субсидий российским лизинговым компаниям на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации развития “ВЭБ.РФ” на закупку воздушных судов с последующей их передачей российским авиакомпаниям по договорам лизинга (аренды), а также указанным компаниям и производителям воздушных судов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и в государственной корпорации развития “ВЭБ.РФ” на приобретение тренажеров для российских воздушных судов» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_137016/ (дата обращения: 03.02.2024).

ния центров ТОиР позволили авиакомпаниям «Азимут» [14], являющейся единственной авиакомпанией с флотом, состоящим из одного типа ВС SSJ-100, сохранить операционные показатели в период распространения коронавирусной инфекции, а также позже, в период внешнего санкционного воздействия, наращивать производственные показатели. В 2023 году авиакомпания перевезла более 2,3 млн пассажиров, что обеспечило рост на 21 % в сравнении с 2022 годом. В конце 2023 года флот авиакомпании «Азимут» состоял из 20 воздушных судов SSJ-100, в перспективе до 2026 года планируется увеличение до 25 ВС¹².

Также к мерам стимулирования внедрения отечественной авиатехники с последующим послепродажным обслуживанием можно отнести реализацию постановления Правительства Российской Федерации от 19.03.2018 № 301 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским компаниям на финансовое обеспечение затрат, связанных с созданием системы послепродажного обслуживания воздушных судов и подготовкой авиационного персонала для воздушных судов»¹³. В соответствии с правилами субсидия предоставляется организациям для компенсации затрат, связанных с реализацией проектов по созданию сети авиационных центров поддержки (в том числе за рубежом) по системе 24 часа в сутки 365 дней в году, а также авиацион-

ным производителям для частичного возмещения затрат в целях формирования первоначального склада запасных частей покупателей ВС, с обеспечением средств наземного обслуживания, а также для переподготовки авиаперсонала под новые типы ВС. Программа предназначена для обеспечения стабильной и регулярной эксплуатации ВС нового типа (например, SSJ-100) путем формирования распределенной сети авиационных сервисных центров, оказывающих услуги по бесперебойному обеспечению пользователей ВС запасными частями и средствами наземного обслуживания.

В периоды кризисов роль государства в отношении государственной поддержки, которая координирует, выполняет функции финансового моста, возрастает в разы [15].

Наряду с мерами поддержки, действующими на регулярной основе, ввиду новых реалий в условиях внешнего санкционного воздействия, появилась необходимость в оказании поддержки операционной деятельности российских авиакомпаний в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 27.04.2022 № 761 «Об утверждении Правил предоставления в 2022 году субсидий из федерального бюджета российским авиакомпаниям для возмещения операционных расходов на осуществление перевозок по внутренним воздушным линиям в условиях внешнего санкционного воздействия», где было выделено 100 млрд руб. из резервного фонда Правительства Российской Федерации, что позволило компенсировать расходы 23 авиакомпаниям за период с 01.03.2022 по 01.11.2022. В 2023 году в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 07.12.2022 № 2239 «Об утверждении Правил предоставления в 2023 году субсидий из федерального бюджета российским авиакомпаниям в целях возмещения операционных расходов на осуществление перевозок по внутренним воздушным линиям в условиях внешнего санкционного воздействия» выделено 25 млрд руб. в целях компенсации расходов 23 авиакомпаниям за период с 01.11.2022 по 31.02.2023 (бюллетень 2023 г.)

¹² Авиакомпания Азимут подняла производственные показатели на новый эшелон в 2023 году [Электронный ресурс] // Авиакомпания «Азимут». Официальный сайт. 2024. URL: <https://azimuth.ru/ru/news/avia-kompaniya-azimut-podnyala-proizvodstvennye-pokazateli-na-novyy-eshelon-v-2023-godu> (дата обращения: 03.02.2024).

¹³ Постановление Правительства Российской Федерации от 19.03.2018 № 301 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским компаниям на финансовое обеспечение затрат, связанных с созданием системы послепродажного обслуживания воздушных судов и подготовкой авиационного персонала для воздушных судов» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294141/ (дата обращения: 03.02.2024).

Важной мерой государственной поддержки в целях стабилизации авиатранспортного рынка также была реализация постановления Правительства Российской Федерации от 02.04.2020 № 409 «О мерах по обеспечению устойчивого развития экономики», в рамках которого введено упрощение порядка предоставления организациям, в том числе авиакомпаниям, отсрочек по налогам и страховым взносам на срок до года в зависимости от величины снижения доходов налогоплательщика и без начисления процентов на сумму задолженности¹⁴.

По результатам субсидирования в 2022–2023 годах меры поддержки способствовали предотвращению кризисной ситуации в отрасли и позволили поддержать десятки авиакомпаний и авиационных организаций в условиях внешнего санкционного воздействия. Полученные авиакомпаниями государственные средства были использованы преимущественно на оплату труда авиационного персонала, социальные отчисления и иные расходы, относящиеся к основной производственной деятельности авиакомпаний.

Заключение

1. В целом меры государственной поддержки авиаперевозок, к которым в том числе относятся механизмы их субсидирования, являются важными факторами обеспечения стабильности воздушного транспорта, развития маршрутных сетей и авиатранспортной доступности регионов страны, стимулирования внедрения в эксплуатацию новых ВС российского производства.

2. Современный этап развития системы субсидирования воздушных перевозок в Российской Федерации можно отсчитывать от принятия соответствующих постановлений

Правительства Российской Федерации в 2013–2014 годах. Отраслевые программы субсидирования интенсивно совершенствуются, и в 2023 году по основным программам поддержки региональных авиаперевозок субсидии были предоставлены на сумму более 24 млрд руб., обеспечив перевозку более 4,2 млн пассажиров.

3. Достигаемое субсидированием расширение маршрутной сети страны включает открытие новых направлений перевозок, авиакомпании при этом подвержены высоким рискам получения убытков из-за недостаточной загрузки «нераскатанных» рейсов. В связи с этим, по нашему мнению, целесообразно предложить следующую «гибридную» схему субсидирования:

– на начальном этапе «раскатки» маршрута, в условиях низкого пассажиропотока, для снижения рисков авиакомпаний государство предоставляет субсидию авиакомпаниям исходя из числа выполненных рейсов и тем самым переводит существенную часть рисков на себя (в соответствии с международным опытом период «раскатки» составляет около 2 лет);

– на последующем этапе «раскатки» маршрута, на фоне роста пассажиропотока, риски получения убытков авиакомпанией из-за недостаточной загрузки рейсов существенно снижаются, поэтому предоставление государством субсидии будет производиться исходя из количества перевезенных пассажиров, что позволяет снизить риски роста избыточных расходов государства на субсидирование и тем самым перевести существенную часть рисков на авиакомпанию.

4. Развитие местных перевозок крайне неравномерно осуществляется на территории страны – в основном такие перевозки сохранились в труднодоступных регионах с суровыми климатическими условиями и неразвитой сетью регулярных наземных сообщений. Меры по поддержке и развитию местных авиаперевозок, как правило, проводятся за счет средств бюджетов соответствующих субъектов Российской Федерации, однако финансовое состояние многих субъектов не позволяет в полной мере обеспечивать

¹⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 02.04.2020 № 409 «О мерах по обеспечению устойчивого развития экономики» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_349463/ (дата обращения: 03.02.2024).

поддержку и развитие сети местных перевозок. Поэтому для достижения устойчивого роста авиационной подвижности населения северных и удаленных регионов Российской Федерации и для предотвращения оттока из них населения целесообразно введение финансирования из федерального бюджета перевозок на местных воздушных линиях в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностей, что потребует разработки и введения в действие Минтранс России и Минвостокразвития России соответствующих новых правил субсидирования местных перевозок в северных регионах.

Список литературы

1. Губенко А.В., Растова Ю.И., Панкратова А.Р. Современное состояние и перспективы развития рынка пассажирских перевозок // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент. 2019. № 2. С. 82–90. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-2-82-90

2. Егошин С.Ф., Клочков В.В. Обоснование требований к перспективным самолетам для российских межрегиональных авиалиний на среднесрочную и долгосрочную перспективы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 41. С. 90–102.

3. Беляев С.А. Состояние и проблемы развития пассажирских авиаперевозок в России // Региональный вестник. 2020. № 16 (55). С. 53–54.

4. Матюха С.В. Развитие модели рынка региональных авиаперевозок: регуляторное воздействие государства // Креативная экономика. 2023. Т. 17, № 1. С. 257–276. DOI: 10.18334/ce.17.1.117016

5. Зинченко А.С. Мониторинг развития отечественного рынка воздушного транспорта на современном этапе // Вестник университета. 2017. № 10. С. 22–25.

6. Скрылева Е.В. Развитие российского рынка пассажирских авиаперевозок и роль его регионального сегмента на современном этапе // Транспортное дело России. 2018. № 5. С. 188–190.

7. Волосов Е.Н. Государственная политика по развитию пассажирских авиаперевозок в Сибири и на Дальнем Востоке // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Иркутск, 14–15 октября 2021 г. Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2021. Т. 1. С. 239–249.

8. Скрылева Е.В. Исследование российского опыта поддержки региональных авиаперевозок // Транспортное дело России. 2019. № 5. С. 136–139.

9. Горбунов В.П. Основные аспекты создания единой дальневосточной авиакомпании через развитие единой маршрутной сети, флота и летно-эксплуатационной инфраструктуры дальневосточного региона // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2023. № 2. С. 44–62. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_44

10. Матюха С.В., Филиппов В.Л., Фридлянд А.А. Развитие региональных воздушных перевозок в России и совершенствование организации деятельности региональных авиапредприятий // Транспортное дело России. 2020. № 1. С. 66–68.

11. Grubestic T.H., Wei F. Evaluating the efficiency of the essential air service program in the United States // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2012. Vol. 46, iss. 10. Pp. 1562–1573. DOI: 10.1016/j.trra.2012.08.004

12. Бенько Е.В., Надарян Б.М. Государственные меры поддержки авиационной отрасли в условиях Российской экономики // Проблемы и перспективы экономических отношений предприятий авиационного кластера: сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. Ульяновск, 24–26 октября 2022 г. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. С. 45–50.

13. Базинова И.В. Развитие авиационного лизинга как инструмента повышения конкурентоспособности российской авиационной техники // Инновации и инвестиции. 2019. № 8. С. 100–104.

14. Рублев В.В. Перспективы развития российского рынка пассажирских авиалайне-

ров в условиях макроэкономической нестабильности // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2020. № 8 (190). С. 78–89. DOI: 10.46554/1993-0453-2020-8-190-78-89

15. Матюха С.В. Экономические меры государственной поддержки пассажирских авиаперевозок в условиях кризиса // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 188–191. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_188

References

1. Gubenko, A.V., Rastova, Y.I., Pankratova, A.R. (2019). The current state and prospects of passenger air transportation market development in Russia. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: ekonomika i ekologicheskiy menedzhment*, no. 2, pp. 82–90. DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-2-82-90 (in Russian)

2. Yegoshin, S.F., Klochkov, V.V. (2022). Substantiation of requirements for aircraft of Russian interregional airlines for the medium and long term. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 4, pp. 90–120. (in Russian)

3. Belyaev, S.A. (2020). The state and problems of passenger air transportation development in Russia. *Regionalny Vestnik*, no. 16 (55), pp. 53–54. (in Russian)

4. Matyukha, S.V. (2023). Development of the regional air transport market model: the state's regulatory impact. *Creative economy*, no. 1, pp. 257–276. DOI: 10.18334/ce.17.1.117016 (in Russian)

5. Zinchenko, A.S. (2017). Monitoring of development of the domestic market of air transport at the present. *Vestnik universiteta*, no. 10, pp. 22–25. (in Russian)

6. Skryleva, E.V. (2018). The development of the Russian passenger market and the role of its regional segment at the present stage. *Transport business of Russia*, no. 5, pp. 188–190. (in Russian)

7. Volosov, E.N. (2021). State policy on the development of passenger air transportation in Siberia and the Far East. In: *Aktualnyye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj avi-*

atsii: sbornik trudov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Irkutsk, vol. 1, pp. 239–249. (in Russian)

8. Skryleva, E.V. (2019). Investigation of Russian experience in supporting regional air transportation. *Transport business of Russia*, no. 5, pp. 136–139. (in Russian)

9. Gorbunov, V.P. (2023). 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*, no. 2, pp. 44–62. DOI: 10.51955/2312-1327_2023_2_44 (in Russian)

10. Matyukha, S.V., Filippov, V.L., Fridlyand, A.A. (2020). Development of regional air transportation in Russia and improvement of the organization of activities of regional air enterprises. *Transport business of Russia*, no. 1, pp. 66–68. (in Russian)

11. Grubestic, T.H., Wei, F. (2012). Evaluating the efficiency of the essential air service program in the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 46, issue 10, pp. 1562–1573. DOI: 10.1016/j.tran.2012.08.004

12. Benko, E.V. Nadarian, B.M. (2023). State measures to support the aviation industry in the context of the Russian economy. In: *Problemy i perspektivy ekonomicheskikh otnosheniy predpriyatiy aviatsionnogo klastera: sbornik nauchnykh trudov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. Ulyanovsk: Ulyanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, pp. 45–50. (in Russian)

13. Bazikova, I.V. (2019). Development of aircraft leasing as a tool for increasing the competitiveness of Russian aviation equipment. *Innovatsii i investitsii*, no. 8, pp. 100–104. (in Russian)

14. Rublev, V.V. (2020). Prospects for the development of the Russian passenger airliner market in the context of macroeconomic instability. *Vestnik of Samara State University of Economics*, no. 8 (190), pp. 78–89. DOI: 10.46554/1993-0453-2020-8-190-78-89 (in Russian)

15. Matyukha, S.V. (2022). Economic measures of state support for passenger air

transportation in times of crisis. *Transport business of Russia*, no. 2, pp. 188–191. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_188 (in Russian)

Сведения об авторе

Пенкина Вероника Анатольевна, аспирант Московского государственного технического университета гражданской авиации, penkinaver@gmail.com.

Information about the author

Veronika A. Penkina, Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, penkinaver@gmail.com.

Поступила в редакцию	10.04.2024	Received	10.04.2024
Одобрена после рецензирования	30.09.2024	Approved after reviewing	30.09.2024
Принята в печать	28.11.2024	Accepted for publication	28.11.2024

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 629.7.015.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-72-81

**Экспериментальные исследования влияния
гироскопической системы демпфирования на аэроупругие
характеристики модели крупногабаритного летательного аппарата
с двигателями на упругих пилонах под крылом**

**Ю.В. Петров¹, М.В. Семакова¹, Н.Н. Медведева¹,
В.Г. Угренинов¹**

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: При создании современных крупногабаритных транспортных самолетов широко используется компоновка с двигателями, размещенными на упругих пилонах под крылом. Такое расположение двигателей обладает известными преимуществами, однако имеют место и существенные динамические особенности, обусловленные тем, что парциальные частоты вертикальных и горизонтальных (боковых) колебаний двигателей на упругих пилонах близки к собственным частотам изгибных и крутильных колебаний консолей крыла низших тонов. Именно указанный частотный спектр и определяет динамический отклик летательного аппарата в целом на внешние возмущающие воздействия, а также существенно влияет на динамическую устойчивость ЛА. Для гашения колебаний двигателей на упругих пилонах предложен ряд технических решений, в том числе реализация принципа «освобожденного двигателя». В данной работе предлагается для повышения диссипативных параметров колебаний двигателей на пилонах использовать специальные устройства – силовые гироскопы, которые являются основным элементом гироскопической системы демпфирования. Многочисленные теоретические исследования возможности применения силовых гироскопов показали, что устойчивость динамической системы можно повысить путем введения в нее дополнительных гироскопических, диссипативных и потенциальных сил. Известно предложение использовать метод непосредственной гироскопической стабилизации для управления аэроупругими колебаниями элементов конструкции ЛА. В статье предлагается использовать силовые гироскопы для гашения слабодемпфированных колебаний двигателей на пилонах крупногабаритного самолета. С целью оценки возможности практического применения гироскопической системы демпфирования (ГСД) были проведены экспериментальные исследования на динамически подобной флаттерной модели (ДПФМ) крупногабаритного самолета с четырьмя двигателями на пилонах под крылом типа Ан-124. Исследования включали два этапа: частотные и флаттерные испытания. В качестве ГСД использовалось гироскопическое устройство, выполненное по схеме скоростного гироскопа, который был установлен внутри гондолы двигателя. В статье приводятся результаты экспериментов по оценке влияния ГСД на динамические характеристики ДПФМ. Анализ нормированных амплитудно-частотных характеристик вертикальных и горизонтальных колебаний в центре масс внешних двигателей показывает значительное (в 1,5...5,0 раза) снижение пиковых значений амплитуд колебаний во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Результаты экспериментальных исследований влияния ГСД на флаттерные характеристики модели самолета показали значительное (7...15 %) увеличение критической скорости флаттера при всех уровнях заправки самолета топливом. При этом при включенной гироскопической системе демпфирования автоколебания носят вялый, сбивчивый характер, а формы флаттера за счет гироскопической связанности продольного и бокового движения переходят из одной в другую.

Ключевые слова: гироскопическая система демпфирования, частота и форма собственных колебаний, амплитудно-частотные характеристики, динамическая устойчивость, флаттер, критическая скорость флаттера.

Для цитирования: Петров Ю.В. Экспериментальные исследования влияния гироскопической системы демпфирования на аэроупругие характеристики модели крупногабаритного летательного аппарата с двигателями на упругих пилонах под крылом / Ю.В. Петров, М.В. Семакова, Н.Н. Медведева, В.Г. Угренинов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 72–81. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-72-81

Experimental studies of the influence of a gyroscopic damping system on the aeroelastic characteristics of a large aircraft model with elastic pylon-mounted engines under the wing

Y.V. Petrov¹, M.V. Semakova¹, N.N. Medvedeva¹, V.G. Ugreninov¹

¹*The Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: During production of modern large transport aircraft, engine arrangement mounted on the elastic pylons under the wing is widely used. This arrangement of engines has certain advantages, however, there are also significant dynamic features due to the fact that the partial frequencies of vertical and horizontal (lateral) vibrations of elastic pylon-mounted engines are close to the wing bending and torsional natural frequencies of low modes. It is this frequency spectrum that determines the dynamic response of the aircraft as a whole to external disturbance input, and also significantly affects the dynamic stability of the aircraft. A number of technical solutions have been proposed to damp vibrations of the elastic pylon-mounted engines, including the implementation of the “freed engine” principle. To increase the dissipative parameters of the pylon-mounted engines vibrations, this paper proposes to use special devices – powered gyroscopes, which are the main part of the gyroscopic damping system. Numerous theoretical studies of the possibility of using powered gyroscopes have shown that the stability of a dynamic system can be increased by introducing additional gyroscopic, dissipative and potential forces into it. It is known that a method of direct gyroscopic stabilization is proposed to control aeroelastic oscillations of aircraft structural elements. The article proposes to use powered gyroscopes to damp lightly damped vibrations of pylon-mounted engines of a large aircraft. In order to assess the possibility of practical application of the gyroscopic damping system (GDS), experimental studies were conducted on a dynamically similar flutter model (DSFM) of a large aircraft type An-124 with four pylon-mounted engines under the wing. The studies included two stages: frequency and flutter tests. A gyroscopic device made according to the scheme of a rate gyroscope, which was installed inside the engine nacelle, was used as the GDS. The article presents the results of the experiments to assess the effect of the GDS on the dynamic characteristics of the DPFM. The analysis of the normalized amplitude-frequency characteristics of vertical and horizontal oscillations in the center of mass of the outboard engines shows a significant (by 1.5...5 times) decrease in the peak values of the oscillation amplitudes across the entire frequency range covered. The results of the experimental studies of the effect of the GDS on the flutter characteristics of the aircraft model showed a significant (7...15%) flutter speed enhancement at all levels of aircraft refueling. At the same time, with the gyroscopic damping system powered on, the self-oscillations are sluggish and incoherent, and the flutter modes change from one to another due to the gyroscopic coupling of the longitudinal and lateral motion.

Key words: gyroscopic damping system, frequency and mode of natural oscillations, amplitude-frequency characteristics, dynamic stability, flutter, flutter speed.

For citation: Petrov, Y.V., Semakova, M.V., Medvedeva, N.N., Ugreninov, V.G. (2024). Experimental studies of the influence of a gyroscopic damping system on the aeroelastic characteristics of a large aircraft model with elastic pylon-mounted engines under the wing. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 72–81. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-72-81

Введение

На современных крупногабаритных транспортных самолетах широко используется компоновка с двигателями, размещенными на упругих пилонах под крылом. Такое расположение двигателей обладает известными преимуществами [1–5], однако имеют место и существенные динамические особенности, обусловленные тем, что парциальные частоты вертикальных и горизонтальных (боко-

вых) колебаний двигателей на упругих пилонках близки к собственным частотам изгибных и крутильных колебаний консолей крыла низших тонов. Известно, что указанный частотный спектр определяет динамический отклик летательного аппарата на внешние возмущающие воздействия (турбулентность воздуха, движение по неровностям аэродрома, управляющие воздействия и др.), а также существенно влияет на динамическую устойчивость летательного аппарата (ЛА). Появ-

ляются новые формы флаттера, при которых в число флаттирующих тонов входят собственные колебания двигателей на упругих пилонах [1, 2, 4], существенное влияние на параметры динамической системы оказывают гироскопические эффекты от работающих двигателей, в частности возникает гироскопическая связанность симметричных и антисимметричных тонов колебаний.

Для гашения колебаний двигателей на упругих пилонах предложен ряд технических решений, в том числе реализация принципа «освобожденного двигателя» [3, 6]. В данной работе предлагается для повышения диссипативных параметров колебаний двигателей на пилонах использовать специальные устройства – силовые гироскопы, которые являются основным элементом гироскопической системы демпфирования. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования возможности применения силовых гироскопов показали, что устойчивость динамической системы можно повысить путем введения в нее дополнительных гироскопических, диссипативных и потенциальных сил [7–16]. Известно предложение использовать метод непосредственной гироскопической стабилизации для управления аэроупругими колебаниями элементов конструкции ЛА [17]. В статье предлагается использовать силовые гироскопы для гашения слабодемпфированных колебаний двигателей на пилонах крупногабаритного самолета. С целью оценки возможности практического применения гироскопической системы демпфирования (ГСД) были проведены экспериментальные исследования на динамически подобной флаттерной модели (ДПФМ) крупногабаритного самолета с четырьмя двигателями на пилонах под крылом типа Ан-124.

Методы исследования

Для экспериментальной оценки эффективности гироскопической системы демпфирования аэроупругих колебаний элементов конструкции крупногабаритных самолетов проводились исследования на динамически по-

добной флаттерной модели самолета Ан-124, которые включали два этапа: частотные и флаттерные испытания. В качестве ГСД использовалось гироскопическое устройство, выполненное по схеме скоростного гироскопа [6], который был установлен внутри гондолы двигателя. Принципиальная схема устройства и его установки к гондole двигателя показаны на рис. 1. Система координат $Ox_{гуд}$ совпадает с центром масс модели двигателя.

Устройство включает быстровращающийся ротор (гироскоп) в кожухе ($\vec{H}_p$ – вектор кинетического момента ротора), который жестко закреплен на полуосях. Полуоси установлены в подшипниках на силовых элементах гондолы двигателя. Кроме того, устройство включает упругий элемент и демпфирующее устройство. При вращении гироскопа в кожухе относительно оси Ox через рычаг усилие передается на упругий элемент и поршень демпфирующего устройства. Упругий элемент предназначен для настройки парциальной частоты колебаний гироскопа относительно оси Ox , а демпфирующее устройство для рассеивания энергии колебаний системы. В данном эксперименте в качестве демпфирующего устройства используется пневматический демпфер.

Принципиальная схема экспериментальной установки для проведения частотных испытаний изображена на рис. 2. ДПМ двигателя беспроточная, каплевидной формы, внутри нее устанавливалась ГСД, масса которой составляла 10 % от массы модели двигателя. В данном случае ГСД предназначена для гашения слабодемпфированных колебаний двигателей на упругих пилонах.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В гондолах внешних двигателей устанавливались ГСД. Посредством блока возбуждения (рис. 2) возбуждались установившиеся вынужденные колебания ДПФМ самолета заданной частоты. Интервал изменения частоты возбуждения составлял $f_v = 3...11$ Гц. В области резонансных пиков изменение частоты осуществлялось с шагом $\Delta f_v = 0,001...0,002$ Гц. Регистрировались вертикальные и горизонталь-

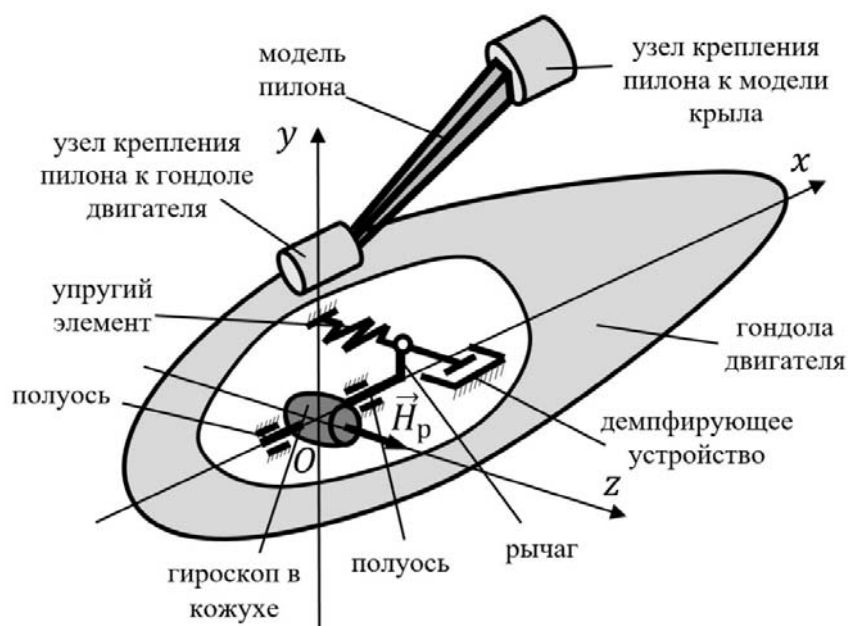


Рис. 1. Гироскопическая система демпфирования колебаний модели двигателя
Fig. 1. Gyroscopic system for damping vibrations of the engine model

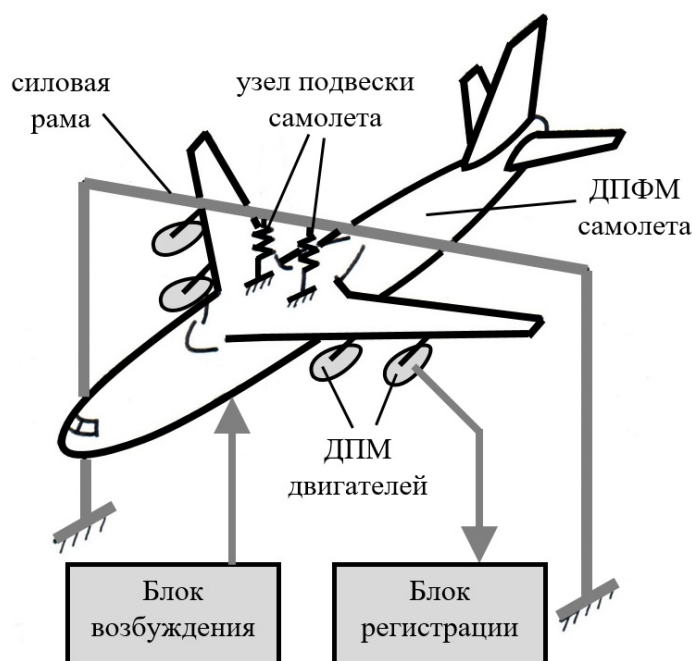


Рис. 2. Принципиальная схема установки частотных испытаний ДПФМ
Fig. 2. Schematic diagram of the frequency test stand of the DSFM

ные ускорения в центре масс внешних двигателей. Затем на каждой частоте осуществлялась тарировка амплитуд вертикальных A_{yd} и горизонтальных A_{zd} колебаний двигателей по перегрузкам и их нормирование по максимальному значению. Полученные данные были использованы для построения экспери-

ментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Сначала изображались АЧХ ДПФМ с выключенной системой демпфирования, а затем с включенной.

Принципиальная схема экспериментальной установки для проведения флаттерных испытаний изображена на рис. 3. ДПФМ са-

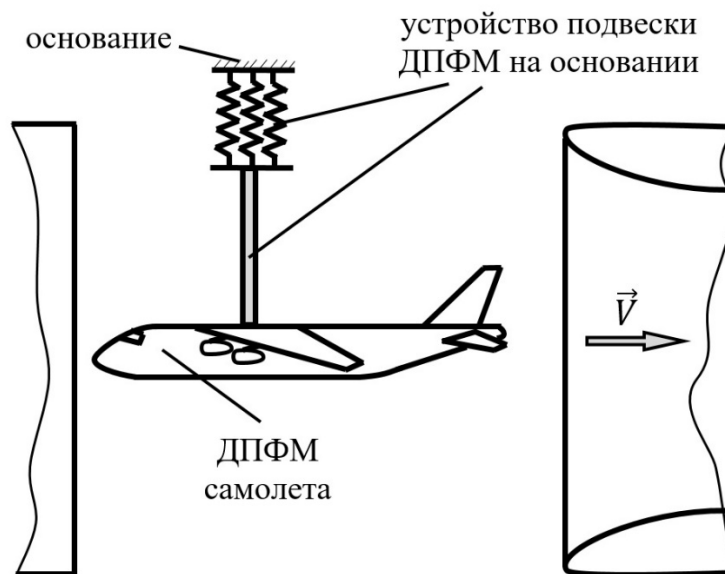


Рис. 3. Принципиальная схема установки флаттерных испытаний ДПФМ
Fig. 3. Schematic diagram of the flutter test stand of the DSFM

молета устанавливалась в рабочей части трубы посредством специального устройства подвески, закрепленного на жестком основании. ГСД установлены на ДПФМ обоих внешних двигателей.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем.

В процессе экспериментальных исследований на модели (при различных вариантах заправки топливом) регистрировались параметры: скорость потока, при которой возникает флаттер; частота и форма колебаний при флаттере. Амплитуды колебаний в характерных точках модели оценивались по показаниям тензодатчиков, прикрепленных к лонжерону крыла ДПФМ самолета. Скорость потока определялась по визуальному отсчету показаний манометра; полученные результаты пересчитывались на натуру. Форма колебаний при флаттере определялась визуально.

Для возбуждения флаттера модели сообщался начальный импульс посредством специального механического устройства. При возникновении интенсивных автоколебаний скорость потока уменьшалась до затухания колебаний. Скорость потока, при которой автоколебания еще присутствуют, принималась за критическую скорость флаттера $V_{кр}$. Затем

скорость набегающего потока вновь увеличивалась до возникновения автоколебаний, и в этот момент включалась ГСД, что приводило к исчезновению автоколебаний. По мере дальнейшего увеличения скорости снова развивались автоколебания, для которых по описанной выше методике определялась $V_{кр}$.

Результаты исследований

Результаты частотных испытаний ДПФМ приведены на рис. 4 и 5. Так, на рис. 4 приведены нормированные амплитудно-частотные характеристики вертикальных колебаний центра масс внешнего двигателя $\bar{A}_{уд}$ (где f_v – частота возбуждения). Сплошной линией показаны АЧХ при неработающих, но установленных ГСД, штриховой – при включенных гасителях. Имеет место значительное (в 1,5...5,0 раза) снижение пиковых значений амплитуд вертикальных колебаний двигателей во всем рассматриваемом частотном диапазоне. Аналогичные АЧХ для горизонтальных колебаний в центре масс внешних двигателей приведены на рис. 5.

Результаты трубного эксперимента приведены на рис. 6, где сплошной линией пока-

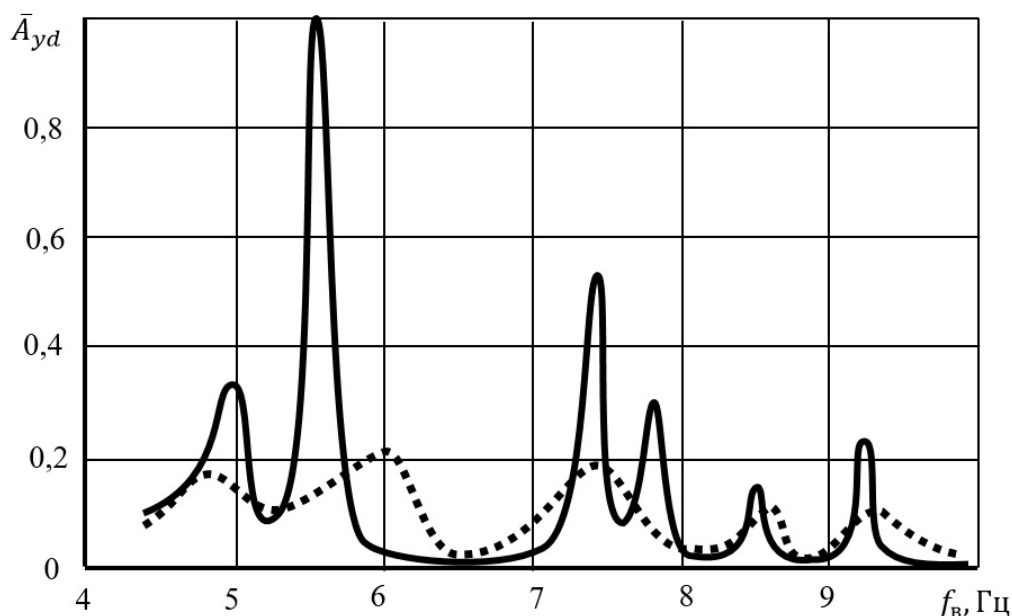


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики вертикальных колебаний центра масс внешнего двигателя ДПФМ самолета
Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of vertical oscillations in the center of mass of the outboard engine of the aircraft DSFM

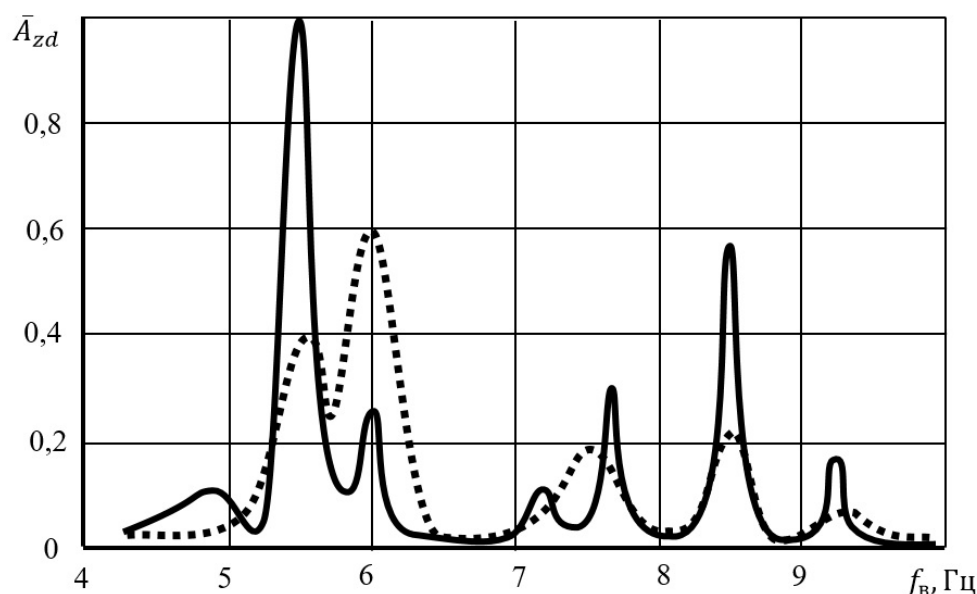


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики горизонтальных колебаний центра масс внешнего двигателя ДПФМ самолета
Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of horizontal oscillations in the center of mass of the outboard engine of the aircraft DSFM

зана зависимость критической скорости флаттера в пересчете на натуру $V_{кр}^H$ от уровня заправки самолета топливом $\bar{G}_T = G_T/G_{T0}$ (здесь G_{T0} – вес топлива при полной заправке; G_T – текущий вес топлива в баках) при уста-

новленных и выключенных ГСД, штриховой – соответствующие кривые при включенной системе демпфирования.

Анализ экспериментальных данных показывает, что во всем диапазоне заливок имеет

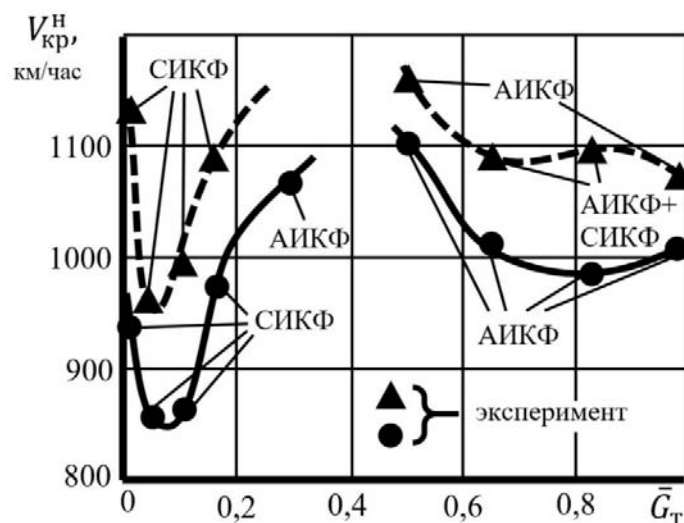


Рис. 6. Зависимость критической скорости флаттера от уровня заправки топливных баков
Fig. 6. Dependence of the flutter speed on the fuel tanks filling level

место значительное (7...15 %) увеличение критической скорости флаттера при всех уровнях заправки. Представляет интерес изменение формы флаттера в зависимости от уровня заправки. Если топлива в баках менее 20 %, то критической формой флаттера является симметричный изгибно-крутильный флаттер (СИКФ), и лишь при 30%-ной заправке и выключенной ГСД реализуется переход от СИКФ к антисимметричному изгибно-крутильному флаттеру (АИКФ). При уровне топлива в баках 30...50 % полной заправки в рассматриваемом диапазоне скоростей флаттер не наблюдается. При заправках выше 50 % преобладающей является форма флаттера АИКФ, однако при включенной ГСД существенно возрастает не только критическая скорость флаттера, но и форма АИКФ становится неустойчивой, периодически переходя в СИКФ.

Следует подчеркнуть, что практически при всех уровнях заправки и включенной гироскопической системе демпфирования автоколебания носят вялый, сбивчивый характер, а формы флаттера за счет гироскопической связанности продольного и бокового движения переходят из одной в другую и обратно.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что одним из перспективных направлений, позволяющих оказывать существенное влияние на динамические нагрузки элементов конструкции планера самолета и его динамическую устойчивость, является использование специальных гироскопических систем демпфирования.

В частности, при использовании ГСД, масса которой составляла около 10 % от массы модели двигателя, наблюдается значительное (1,5...5,0 раза) снижение пиковых значений амплитуд колебаний двигателей на упругом пилоне, в первую очередь при крутильных и двигательных тонах колебаний. При флаттерных испытаниях применение ГСД позволяет увеличить критическую скорость флаттера до 15 %.

Список литературы

1. Jorgensen L., Saki H. Design of aero engine structure. Bachelor's thesis. University West. Uppsala, Sweden, 2023. 65 p.
2. Зиченков М.Ч., Ишмуратов Ф.З., Кузнецов А.Г. Исследование совместного влияния гироскопических сил и конструкцион-

ного демпфирования на характеристики флаттера крыла аэроупругой модели EuRAM // Вестник МАИ. 2018. Т. 25, № 4. С. 86–95.

3. **Овчинников В.В., Петров Ю.В.** Исследование влияния упругодиссипативных параметров подвески двигателя на пилоне под крылом на аэроупругие и прочностные характеристики самолета // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2021. № 1. С. 119–128. DOI: 10.31857/S0572329921010086

4. **Waitz S., Hennings H.** The aeroelastic impact of engine thrust and gyroscopics on aircraft flutter instabilities // International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics. IFASD-2015. Russia, Saint Petersburg, 2015. Pp. 1–15.

5. **Wang L.** Aeroelastic modeling and analysis of the wing/engine system of a large aircraft / L. Wang, Z. Wan, Q. Wu, Ch. Yang // Procedia Engineering. 2012. Vol. 31. Pp. 879–885. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.1116

6. **Овчинников В.В., Петров Ю.В.** Исследование влияния инерционных и гироскопических свойств работающих двигателей на прочностные характеристики динамической системы двигатель-пилон-крыло // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 3. С. 63–72. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-63-72

7. **Ишлинский А.Ю.** Механика гироскопических систем. М.: АН СССР, 1963. 482 с.

8. **Сорокин А.В., Яременко В.В.** История создания силовых гироскопов для систем управления ориентацией космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 1 (116). С. 84–92. DOI: 10.17285/0869-7035.0087

9. **Мкртычан А.Р.** Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов / А.Р. Мкртычан, Н.И. Башкеев, Д.О. Якимовский, Д.И. Акашев, О.Б. Яковец // Гироскопия и навигация. 2015. № 1 (88). С. 93–99. DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.1.093-099

10. **Полянин К.С., Гордиенко В.С.** Система ориентации космического аппарата на базе силового гироскопического комплекса // Наука без границ. 2019. № 1 (29). С. 16–25.

11. **Ünker F., Çuvalcı O.** Gyroscopic vibration damper for building: Theoretical and experimental research // Gazi Journal of Engineering Sciences. 2022. Vol. 8, no. 3. Pp. 457–471. DOI: 10.30855/gmbd.0705034

12. **Платонов В.Н., Сумароков А.В.** Управление космическим аппаратом с помощью двухступенных гироскопов при их раскрутке и торможении // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 2. С. 156–167. DOI: 10.31857/S0002338820020110

13. **Вермель В.Д.** Результаты исследований опытного образца механического демпфера вибраций с вращательными парами трения / В.Д. Вермель, М.Ч. Зиченков, А.Н. Корякин, С.Э. Парышев // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4 (35). С. 77–86. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-4-77-86

14. **He H., Xie X., Wang W.** Vibration control of tower structure with multiple cardan gyroscope [Электронный ресурс] // Shock and Vibration. 2017. Vol. 2017. ID: 3548360. 11 p. DOI: 10.1155/2017/3548360 (дата обращения: 03.07.2024).

15. **Горелова А.Ю., Кристаль М.Г.** Виброгаситель инструмента для обработки гидроцилиндров шахтной крепи // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 6. С. 50–59.

16. **Волкова А.Ю., Суетин В.П.** Экспериментальное исследование особенностей вращательного движения гироскопа // Математическое моделирование и информационные технологии при решении прикладных задач в транспортном вузе: сборник статей. Екатеринбург: УГУПС, 2021. Т. 1 (241). С. 61–69.

17. **Виноградов Р.И., Гайнутдинов О.И., Петров Ю.В.** Управление упругими колебаниями авиационных конструкций при помощи силовых гироскопов // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1986. № 4. С. 41–43.

References

1. Jorgensen, L., Saki, H. (2023). Design of aero engine structure. Bachelor's thesis. University West. Uppsala, Sweden, 65 p.
2. Zichenkov, M.C., Ishmuratov, F.Z., Kuznecov, A.G. (2018). Studying the gyroscopic forces and structural damping joint impact on the wing flutter of the aeroelastic EuRAM model. *Aerospace MAI Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 86–95. (in Russian)
3. Ovchinnikov, V.V., Petrov, Y.V. (2021). Investigation of the influence of elastic dissipative parameters of the under wing pylon-mounted engine suspension on aeroelastic and strength characteristics of the aircraft. *Mechanics of Solids*, Vol. 56, no. 1, pp. 95–102. DOI: 10.3103/S0025654421010106
4. Waitz, S., Hennings, H. (2015). The aeroelastic impact of engine thrust and gyroscopics on aircraft flutter instabilities. In: *International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics*, IFASD-2015, pp. 1–15.
5. Wang, L., Wan, Z., Wu, Q., Yang, C. (2012). Aeroelastic modeling and analysis of the wing/engine system of a large aircraft. *Procedia Engineering*, vol. 31, pp. 879–885. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.1116
6. Ovchinnikov, V.V., Petrov, Yu.V. (2020). Study of running engines inertial and gyroscopic properties influence on the dynamic system engine-pylon-wing structural capabilities. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 3, pp. 63–72. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-63-72
7. Ishlinskiy, A.Yu. (1963). Mechanics of gyroscopic systems. Moscow: AN SSSR, 482 p. (in Russian)
8. Sorokin, A.V., Yaremenko, V.V. (2022). Control moment gyroscopes for spacecraft attitude control systems: history of development. *Gyroscopy and Navigation*, vol. 13, no. 1, pp. 53–58. DOI: 10.1134/S2075108722010060
9. Mkrtychan, A.R., Bashkeev, N.I., Yakimovskii, D.O., Akashev, D.I., Yakovets, O.B. (2015). Powered gyrosystems: state of the art and development prospects. *Giroskopiya i Navigatsiya*, no. 1 (88), pp. 93–99. DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.1.093-099 (in Russian)
10. Polyandin, K.S., Gordienko, V.S. (2019). The orientation system of the spacecraft on the basis of the power of the gyroscopic complex. *Nauka bez granits*, no. 1 (29), pp. 16–25. (in Russian)
11. Ünker, F., Çuvalci, O. (2022). Gyroscopic vibration damper for building: Theoretical and experimental research. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 457–471. DOI: 10.30855/gmbd.0705034
12. Platonov, V.N., Sumarokov, A.V. (2020). Controlling a satellite using single-gimbal control moment gyroscope during their spinning and braking. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 59, no. 2, pp. 289–300. DOI: 10.1134/S1064230720020100
13. Vermel, V.D., Zichenkov, M.Ch., Koryakin, A.N., Paryshev, S.E. (2020). Study of an experimental prototype simulating a mechanical vibration damper with rotational friction pairs. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, no. 4 (35), pp. 77–86. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-4-77-86 (in Russian)
14. He, H., Xie, X., Wang, W. (2017). Vibration control of tower structure with multiple cardan gyroscopes. *Shock and Vibration*, vol. 2017, ID: 3548360, 11 p. DOI: 10.1155/2017/3548360 (accessed: 03.07.2024).
15. Gorelova, A.Yu., Kristal, M.G. (2017). Vibration damper for hydraulic prop barrel manufacturing instrument. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, no. 6, pp. 50–59. (in Russian)
16. Volkova, A.Yu., Suetin, V.P. (2021). Experimental study of the rotational motion features of a gyroscope *Matematicheskoye modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii pri reshenii prikladnykh zadach v transportnom vuze: sbornik statey*. Yekaterinburg: UGUPS, vol. 1 (241), pp. 61–69. (in Russian)
17. Vinogradov, R.I., Gaynutdinov, O.I., Petrov, Yu.V. (1986). Control of elastic vibrations of aircraft structures using power gyro-

scopes. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, no. 4, pp.41–43. (in Russian)

Сведения об авторах

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики Московского государственного технического университета гражданской авиации, doctor561@rambler.ru.

Семакова Марина Владимировна, старший преподаватель кафедры технической механики и инженерной графики Московского государственного технического университета гражданской авиации, m.semakova@mstuca.ru.

Медведева Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры технической механики и инженерной графики Московского государственного технического университета гражданской авиации, n.medvedeva@mstuca.ru.

Угренinov Владимир Германович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики Московского государственного технического университета гражданской авиации, v.ugreninov@mstuca.ru.

Information about the authors

Yuriy V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, doctor561@rambler.ru.

Marina V. Semakova, Senior Lecturer, Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.semakova@mstuca.ru.

Natalia N. Medvedeva, Senior Lecturer, Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, n.medvedeva@mstuca.ru.

Vladimir G. Ugreninov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.ugreninov@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	12.09.2024	Received	12.09.2024
Одобрена после рецензирования	25.10.2024	Approved after reviewing	25.10.2024
Принята в печать	28.11.2024	Accepted for publication	28.11.2024

УДК 621.452.33.037.01

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-82-93

Натурный стенд для исследований алгоритмов навигации и фильтрации бесплатформенной навигационной системы с использованием среды Matlab Simulink

А.А. Санько¹, В.А. Ветошкин¹, Е.Л. Ивановская¹

¹Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация: В связи с возрастающей сложностью навигационного оборудования воздушных судов (ВС), с ростом требований, предъявляемых к ним, встает вопрос о необходимости исследования и усовершенствования существующих алгоритмов навигации и фильтрации путем решения задач по разработке натурных исследовательских стендов. В статье изложены результаты работы в области создания натурального стенда для исследований алгоритмов навигации и фильтрации для бесплатформенной навигационной системы (БИНС) в составе: датчики первичной навигационной информации, выполненные по микроэлектромеханической технологии (МЭМС), сервомашинки и навигационная платформа, имеющая две степени свободы по крену и тангажу. Представлены особенности конструктивной, аппаратной и алгоритмической реализации стенда с учетом перспектив его развития в части использования количества степеней свободы платформы (каналов тангажа, крена и рыскания). Описан реализованный принцип интеграции *Simulink*-модели объекта управления. Объект управления состоит из контроллера на базе платформы *Arduino*, *GPS*-датчика, датчика GY-91, имеющего инерциально-измерительный блок, состоящий из трех ортогонально расположенных: измерителя угловой скорости, акселерометра и одноканального барометра на базе МЭМС MP280. Реализован алгоритм позиционного (ручного) управления навигационной платформы по углу тангажа и крена с использованием двух сервомашин, через джойстик и виртуальный COM-порт. Представлена схема, иллюстрирующая логику взаимодействия структурных элементов стенда, часть программной реализации используемого комплементарного фильтра, а также функция его вычисления и имитационные связи *Simulink*-модели. Рассмотрен обмен информацией между ПЭВМ и микроконтроллером *Arduino*. Сделан вывод о целесообразности создания и использования разработанного стенда для обоснования применения того или иного алгоритма навигации и фильтрации для конкретного типа ВС.

Ключевые слова: бесплатформенная навигационная система, управление, микроконтроллер, моделирование, фильтрация, натурный стенд.

Для цитирования: Санько А.А., Ветошкин В.А., Ивановская Е.Л. Натурный стенд для исследований алгоритмов навигации и фильтрации бесплатформенной навигационной системы с использованием среды Matlab- Simulink // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 82–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-82-93

A full-scale simulator for research of navigation and filtering algorithms of a strapdown inertial navigation system using the Matlab-Simulink environment

A.A. Sanko¹, V.A. Vetoshkin¹, E.L. Ivanovskaya¹

¹Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus

Annotation: Due to the increasing complexity of aircraft navigation equipment and the growing demands placed on them, there is a need to study and improve existing navigation and filtering algorithms by solving problems of developing full-scale research simulators. The article presents the results of work in the field of creating a full-scale simulator for research of navigation and filtering algorithms for a strapdown inertial navigation system (SINS) comprising: primary navigation data sensors made using microelectromechanical system technology (MEMS), servos and a navigation platform with two-degrees-of-freedom in roll and pitch. The article presents the features of the design, hardware and algorithmic implementation of the test rig taking into account the

prospects for its development in terms of using the number of degrees of freedom of the platform (pitch, roll and yaw channels). The implemented principle of integrating the Simulink model of the control object is described. The control object consists of a controller based on the Arduino platform, a GPS sensor, a GY-91 sensor with an inertial measurement unit consisting of three orthogonally located: angular velocity meter, accelerometer and the single-channel barometer based on the MP280 MEMS. An algorithm for positional (manual) control of the navigation platform by pitch and roll angles using two servos, through a control stick and a virtual COM port is implemented. A diagram illustrating the logic of interaction of the structural elements of the simulator, a part of the software implementation of the complementary filter used, as well as the function of its calculation and simulation links of the Simulink model are presented. The information exchange between the PC and the Arduino microcontroller is considered. A conclusion was made about the feasibility of creating and using the developed simulator to justify the use of a particular navigation and filtering algorithm for a specific type of aircraft.

Key words: strapdown inertial navigation system, control, microcontroller, modeling, filtering, full-scale simulator.

For citation: Sanko, A.A., Vetoshkin, V.A., Ivanovskaya, E.L. (2024). A full-scale simulator for research of navigation and filtering algorithms of a strapdown inertial navigation system using the Matlab- Simulink environment. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 6, pp. 82–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-82-93

Введение

Одним из важнейших этапов создания воздушного судна (ВС) является разработка его навигационной системы. В зависимости от предъявляемых требований к характеристикам навигационной системы ВС, обладающей индивидуальными особенностями в БИНС, реализуются алгоритмы фильтрации и навигации по данным, полученным от первичных датчиков первичной навигационной информации, требующие оценки адекватности и эффективности их работы [1, 2].

В условиях широкого внедрения навигационных датчиков, выполненных по МЭМС-технологии и имеющих разброс параметров при изготовлении до 3 %, несмотря на их калибровку при изготовлении, а также высокую чувствительность к внешним возмущениям, все большую актуальность приобретает проблема повышения точности БИНС [3–7]. Эту задачу целесообразно решать при «наземных испытаниях» с применением натурных стендов, функционирование которых основано на схожих с объектом исследования принципах [8–11]. Целесообразность такого подхода обоснована высокой вероятностью потери (повреждения) ВС в летных испытаниях, невозможностью учета методами математического моделирования большинства процессов и явлений, происходящих в полете, а также всего широкого многообразия свойств объекта.

Таким образом, актуальной представляется работа по созданию стендовой лаборатор-

ной базы для отработки алгоритмов навигации и фильтрации, позволяющей учесть как можно более широкий спектр воздействий на качество работы БИНС, находящейся на борту ВС.

Целью работы, результаты которой описываются в статье, являются создание такого стенда и оценка возможности его применения для определения типа используемого алгоритма навигации и фильтрации для конкретного типа ВС.

Основная часть

Ставится задача создания натурного стенда для создания и отработки существующих алгоритмов навигации и фильтрации, позволяющей учесть как можно более широкий спектр воздействий на качество работы БИНС для ВС.

На рис. 1 представлена конструкция и состав разработанного стенда. Основными элементами стенда являются: БИНС в составе *GY-91*, имеющего инерциально-измерительный блок (ИИБ), *GPS*-трекера и вычислителя – микроконтроллера типа *Arduino Nano* (1); вычислитель – ПЭВМ с установленной программой *Simulink* и авторским программным обеспечением (2); джойстик, управляемый с использованием микроконтроллера *Arduino Uno* (3); источник электропитания (4); платформа, имеющая две степени свободы по углу крена $\gamma_{\text{рамка}}$ и тангажа $\vartheta_{\text{рамка}}$ с установленными на ней сервома-

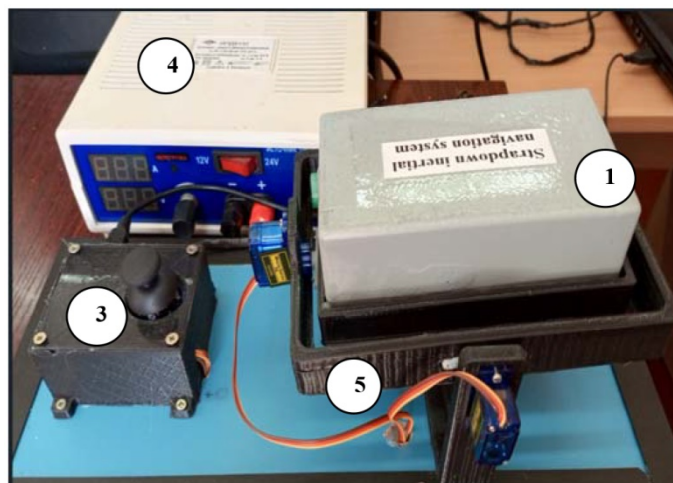


Рис. 1. Конструкция и состав разработанного стенда
Fig. 1. The design and composition of the developed simulator

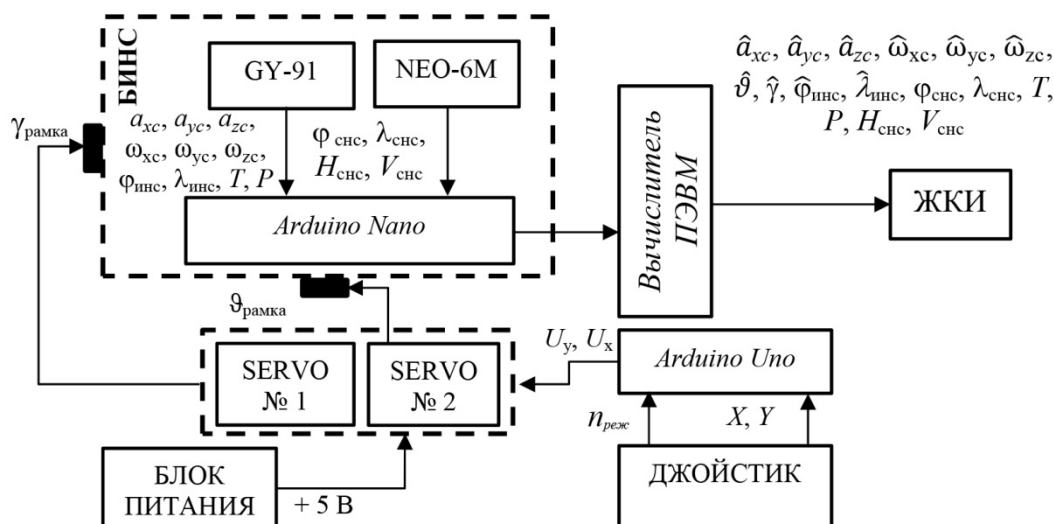


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая логику взаимодействия структурных элементов стенда
Fig. 2. The diagram illustrating the logic of interaction between the structural elements of the simulator

пинками SG-90 (5). Логика взаимодействия составных элементов стенда предусматривает наличие двух вариантов управления (рис. 2):

1) ручное перемещение рукоятки джойстика и формирование таким образом сигнала угла $\vartheta_{\text{рамка}}$ ($\gamma_{\text{рамка}}$);

2) программное управление заданным значением углов $\vartheta_{\text{рамка}}$ и $\gamma_{\text{рамка}}$ в диапазоне $-30...+30^0$ или периодическое движение по углам.

Переключение между режимами управления осуществляется кнопкой, размещенной на джойстике (формируется сигнал $n_{\text{реж}}$).

Источник электропитания обеспечивает подачу на сервомашинки опорного напряжения 5,5 В с током нагрузки более 0,5 А.

В вычислителе (ПЭВМ) с использованием разработанной *Simulink*-модели и по алгоритмам, заданным исследователем, производится:

1) прием информации из микроконтроллера *Arduino Nano*;

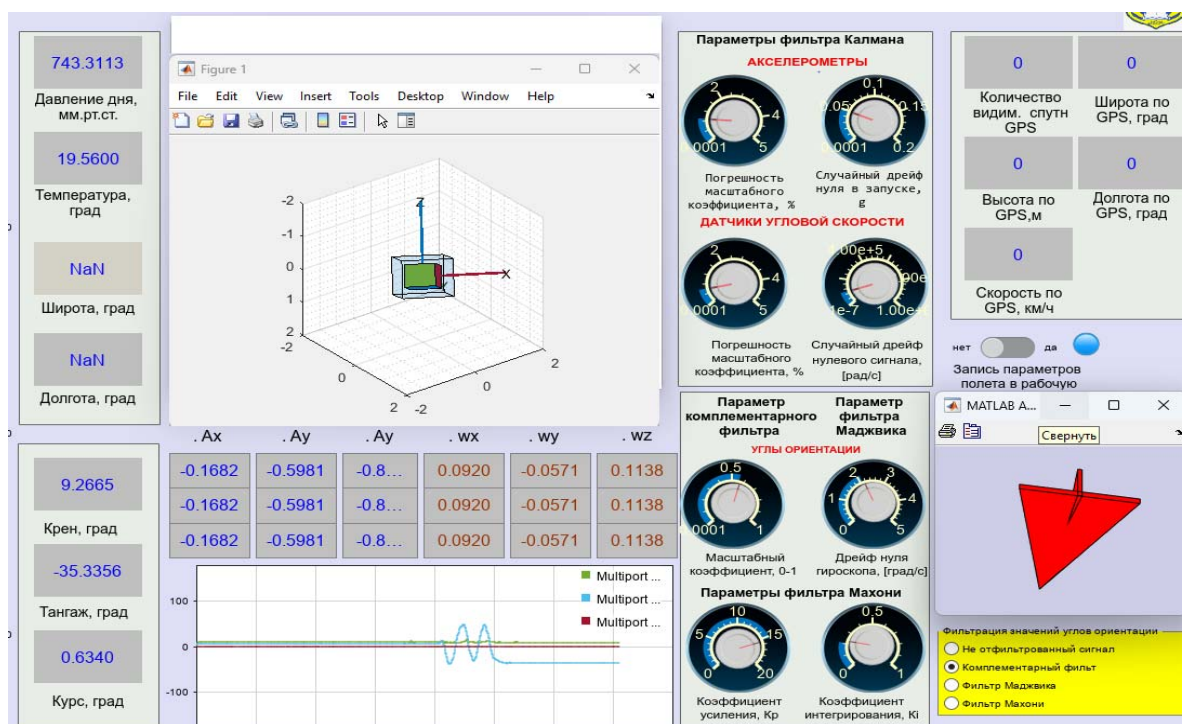


Рис. 3. Внешний вид части окна программы работы со стендом
Fig. 3. The interface of the part of the program window for working with the simulator

2) фильтрация первичных сигналов от акселерометров и гироскопов: $\hat{a}_{xc}$, $\hat{a}_{yc}$, $\hat{a}_{zc}$, $\hat{\omega}_{xc}$, $\hat{\omega}_{yc}$, $\hat{\omega}_{zc}$;

3) вычисление углов ориентации ИИБ $\hat{\theta}$, $\hat{\gamma}$ после фильтрации первичных сигналов;

4) расчет координат $\hat{\varphi}_{\text{инс}}$, $\hat{\lambda}_{\text{инс}}$ ИИБ по отфильтрованным значениям первичных сигналов;

5) масштабирование и преобразование аналоговых сигналов с джойстика;

6) визуализация результатов исследований графически и в виде численных значений.

Схема, иллюстрирующая логику взаимодействия структурных элементов стенда представлена на рис. 2.

Основным элементом БИНС является датчик *GY-91*, имеющий инерциально-измерительный блок, состоящий из трех ортогонально расположенных: измерителя угловой скорости, акселерометра и одноканального барометра на базе *MP280*. В качестве связанной системы координат (ССК) выбрана правая ортогональная система координат *OXYZ* с вершиной, совмещенной с центром масс объекта, *OX* – поперечная ось объекта (на правый борт), *OY* – продольная ось, *OZ* – нормальная ось [1].

Информацию, поступающую с *GY-91*, обрабатывает микроконтроллер *Arduino Nano*. Первичная информация, поступающая с *GY-91*:

- a_{xc} , a_{yc} , a_{zc} – значения ускорений объекта в ССК, измеряемые акселерометрами;
- ω_{xc} , ω_{yc} , ω_{zc} – значения угловой скорости объекта в ССК, измеряемые датчиками угловой скорости (ДУС).

Параметры датчиков *GY-91*: диапазон регистрируемой перегрузки: $\pm 4g$; угловой скорости ± 250 °/с.

Вычисление температуры (*T*) и давления (*P*) воздуха осуществляет барометр *MP280*. Дополнительным элементом БИНС является *GPS*-трекер на базе чипа *NEO-6M*. Чип способен отслеживать до 22 спутников одновременно на 50 каналах с большим уровнем чувствительности (до -181 дБ). *GPS*-трекер выдает ряд сигналов в ПЭВМ через микроконтроллер *Arduino Nano*, а именно: место расположения (широта $\varphi_{\text{снс}}$ и долгота $\lambda_{\text{снс}}$), скорость ($V_{\text{снс}}$), высоту расположения БИНС над уровнем моря ($H_{\text{снс}}$) и т. д. Общий вид фрагмента диалогового окна *Simulink*-модели представлен на рис. 3.

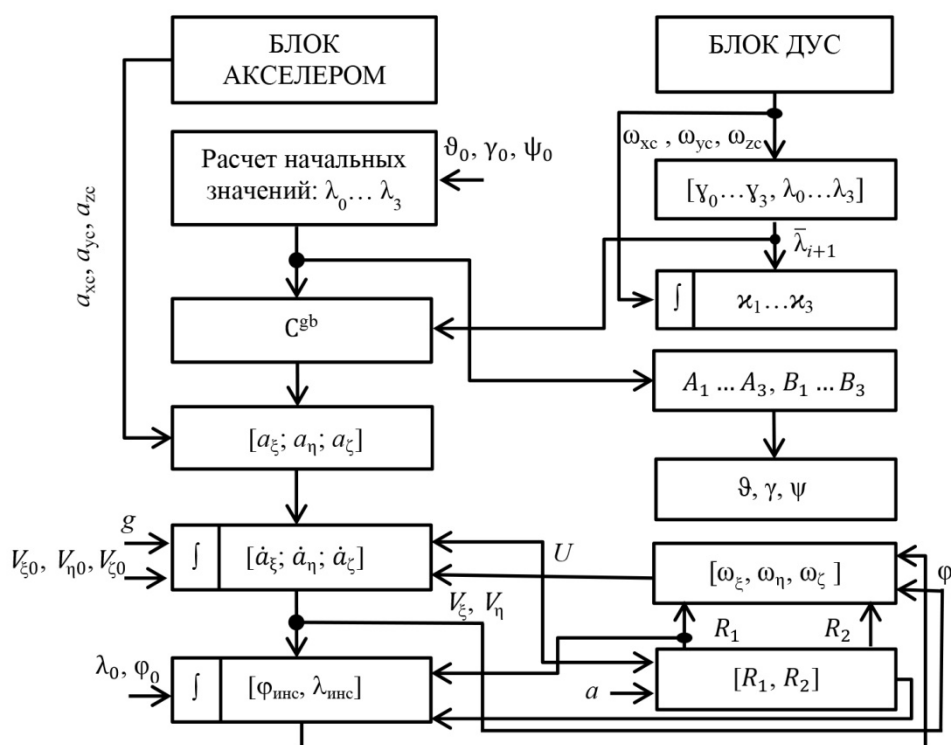


Рис. 4. Структурная схема алгоритма с интегрированием уравнения в параметрах Родрига – Гамильтона в географическом сопровождающем базисе

Fig. 4. The structural schematic of the algorithm with equation integration in Rodrigue-Hamilton parameters in a geographical accompanying basis

Непосредственное вычисление координат инерциальным способом ($\varphi_{инс}$ и $\lambda_{инс}$) и углов ориентации осуществляет микроконтроллер *Arduino Nano*, используя сигналы от *GY-91*. При этом применяется алгоритм вычисления координат и углов ориентации в географическом сопровождающем базисе без фильтрации. В качестве промежуточных параметров ориентации используются параметры Родрига – Гамильтона (рис. 4) [1]. На рис. 4 V_ξ, V_η, V_ζ – проекции линейной скорости объекта на оси географического трехгранника; R_1, R_2 – радиусы кривизны эллипсоида; U – угловая

скорость вращения Земли; a – большая полуось эллипсоида; g – ускорение силы тяжести; C^{gb} – матрица направляющих косинусов (1); $\lambda_0 \dots \lambda_3$ – начальные значения параметров Родрига – Гамильтона (2); a_ξ, a_η, a_ζ – проекции значений вектора ускорений объекта из ССК в географическую СК (3); $\kappa_1 \dots \kappa_3$ – приращения параметров ориентации объекта в географической СК (4); $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ – проекции угловой скорости на оси географического трехгранника (5).

$$\begin{aligned}
 C^{gb}(1,1) &= 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1; \\
 C^{gb}(1,2) &= 2(-\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2); \\
 C^{gb}(1,3) &= 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2); \\
 C^{gb}(3,1) &= 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2); \\
 C^{gb}(3,2) &= 2(\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3); \\
 C^{gb}(3,3) &= 2\lambda_0^2 + 2\lambda_3^2 - 1; \\
 C^{gb}(2,1) &= 2(\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2); \\
 C^{gb}(2,2) &= 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1; \\
 C^{gb}(2,3) &= 2(-\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3).
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \cos(\psi/2)\cos(\vartheta/2)\cos(\gamma/2) + \sin(\psi/2)\sin(\vartheta/2)\sin(\gamma/2); \\ \lambda_1 &= \cos(\psi/2)\sin(\vartheta/2)\cos(\gamma/2) + \sin(\psi/2)\cos(\vartheta/2)\sin(\gamma/2); \\ \lambda_2 &= \cos(\psi/2)\cos(\vartheta/2)\sin(\gamma/2) - \sin(\psi/2)\sin(\vartheta/2)\cos(\gamma/2); \\ \lambda_3 &= \cos(\psi/2)\cos(\vartheta/2)\sin(\gamma/2) - \sin(\psi/2)\sin(\vartheta/2)\cos(\gamma/2).\end{aligned}\quad (2)$$

$$[a_\xi; a_\eta; a_\zeta] = C^{gb}[a_{xc}; a_{yc}; a_{zc}]. \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= 0,5 \omega_\xi dt; & A_1 &= \lambda_1 - \kappa_1; & B_1 &= \lambda_1 + \kappa_1; \\ \kappa_2 &= 0,5 \omega_\eta dt; & A_2 &= \lambda_2 - \kappa_2; & B_2 &= \lambda_2 + \kappa_2; \\ \kappa_3 &= 0,5 \omega_\zeta dt; & A_3 &= \lambda_3 - \kappa_3; & B_3 &= \lambda_3 + \kappa_3.\end{aligned}\quad (4)$$

Изменение параметров Родрига – Гамильтона:

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \lambda_0\lambda_0 - A_1\lambda_1 - A_2\lambda_2 - A_3\lambda_3; \lambda_1 = \lambda_0\lambda_1 + A_1\lambda_0 + B_2\lambda_3 - B_3\lambda_2; \\ \lambda_2 &= \lambda_0\lambda_2 - B_1\lambda_3 + A_2\lambda_0 + B_3\lambda_1; \lambda_3 = \lambda_0\lambda_3 + B_1\lambda_2 - B_2\lambda_1 + A_3\lambda_0.\end{aligned}\quad (5)$$

$$\omega_\xi = -\frac{V_\eta}{R_2}; \omega_\eta = \frac{V_\xi}{R_1} + U\cos\varphi; \omega_\zeta = \frac{V_\xi}{R_1} + \sin\varphi. \quad (6)$$

В стенде для вычисления значений углов псевдоповоротов может использоваться [2]:

1) алгоритм второго порядка точности, реализующий метод средней скорости:

$$y_0 = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2)^{0,5}; \lambda_0 = \cos \frac{y_0}{2}; \lambda_j = y_0^{-1} y_i \sin \frac{y_0}{2}, (i = 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 3),$$

где $y_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t) dt$, t_{n-1} – значение углов псевдоповоротов в предыдущий момент времени ($dt = 0,1$ с);

2) алгоритм, реализующий второе приближение к методу средней скорости:

$$\lambda_0 = 1 - \frac{1}{8} y_0^2; \lambda_j = \frac{1}{2} y_i; y_0 = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2)^{0,5};$$

3) одношаговый алгоритм третьего порядка точности:

$$\Delta\lambda_0 = 1 - \frac{1}{8} y_0^2; \Delta\lambda_1 = \alpha y_1 + \beta y_{23}; \Delta\lambda_2 = \alpha y_2 + \beta y_{31}; \Delta\lambda_3 = \alpha y_3 + \beta y_{12};$$

$$\alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{48} y_0^2; \beta = \frac{1}{24}; y_0 = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2)^{0,5}; y_{23} = y_3 y_2' - y_2 y_3';$$

$$y_{31} = y_1 y_3' - y_3 y_1'; y_{12} = y_2 y_1' - y_1 y_2'; y_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t) dt; y_i' = \int_{t_{n-2}}^{t_{n-1}} \omega_i(t) dt.$$

Параметры Родрига – Гамильтона и углы Эйлера – Крылова связывают соотношения

$$\vartheta = \arcsin(2\lambda_0\lambda_1 + 2\lambda_2\lambda_3); \gamma = -\arctg\left(\frac{2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2}{\lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2}\right).$$

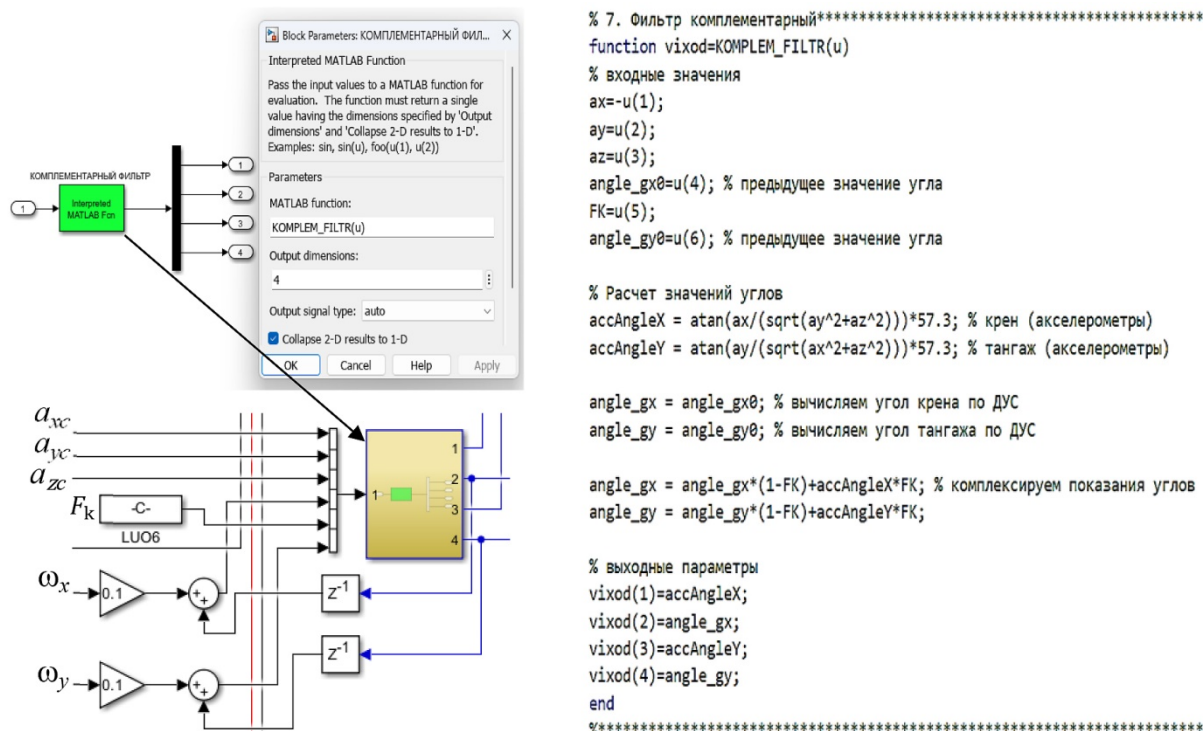


Рис. 5. Программная реализация комплементарного фильтра, функция его вычисления и имитационные связи между ними

Fig. 5. Software implementation of a complementary filter, its calculation function and imitative connections between them

Измеренное значение долготы и широты вычисляется как

$$\lambda_{\text{инс}} = \lambda_0 + \frac{V_{\xi} dt_n}{R_1 \cos \varphi}; \varphi_{\text{инс}} = \varphi_0 + \frac{V_{\eta} dt_n}{R_2}. \quad (7)$$

Настройка микроконтроллера *Arduino Nano* выполняется с использованием встроенного языка в среде программирования *Arduino IDE*. При этом скетч использует 17 854 байта (55 %) памяти устройства, а глобальные переменные – 954 байта (46 %), что позволяет иметь некоторый запас оперативной памяти на модернизацию и доработку скетча программы. В ПЭВМ с использованием *Simulink*-модели происходит вычисление и фильтрация сигналов [11–20]:

- $\hat{\vartheta}$ и $\hat{\gamma}$ (пользователь может применять алгоритм Махони, Маджвика или комплементарный фильтр);

$$\vartheta_{\text{дус}}[t] = \hat{\vartheta}[t-1] + \omega_{\text{zc}}[t]dt; \hat{\vartheta}[t] = \vartheta_{\text{дус}}[t-1](1 - F_k) + F_k \vartheta_N(t),$$

- $\hat{\varphi}_{\text{инс}}, \hat{\lambda}_{\text{инс}}$ по значениям $\hat{\vartheta}, \hat{\gamma}$ и $\hat{a}_{\text{xc}}, \hat{a}_{\text{yc}}, \hat{a}_{\text{zc}}, \hat{\omega}_{\text{xc}}, \hat{\omega}_{\text{yc}}, \hat{\omega}_{\text{zc}}$ (пользователь может применить фильтр Калмана или медианный фильтр).

Программная реализация алгоритмов в *Simulink*-модели основывается на использовании блока *MATLAB function*, самой функции вычисления и имитационных связей между ними. В качестве примера программная реализация комплементарного фильтра, функция его вычисления и имитационные связи между ними представлены на рис. 5. Для комплементарного фильтра итоговая величина угла $\hat{\vartheta}$ представляет собой сумму интегрированного значения показаний гироскопа и мгновенных значений показаний акселерометра:

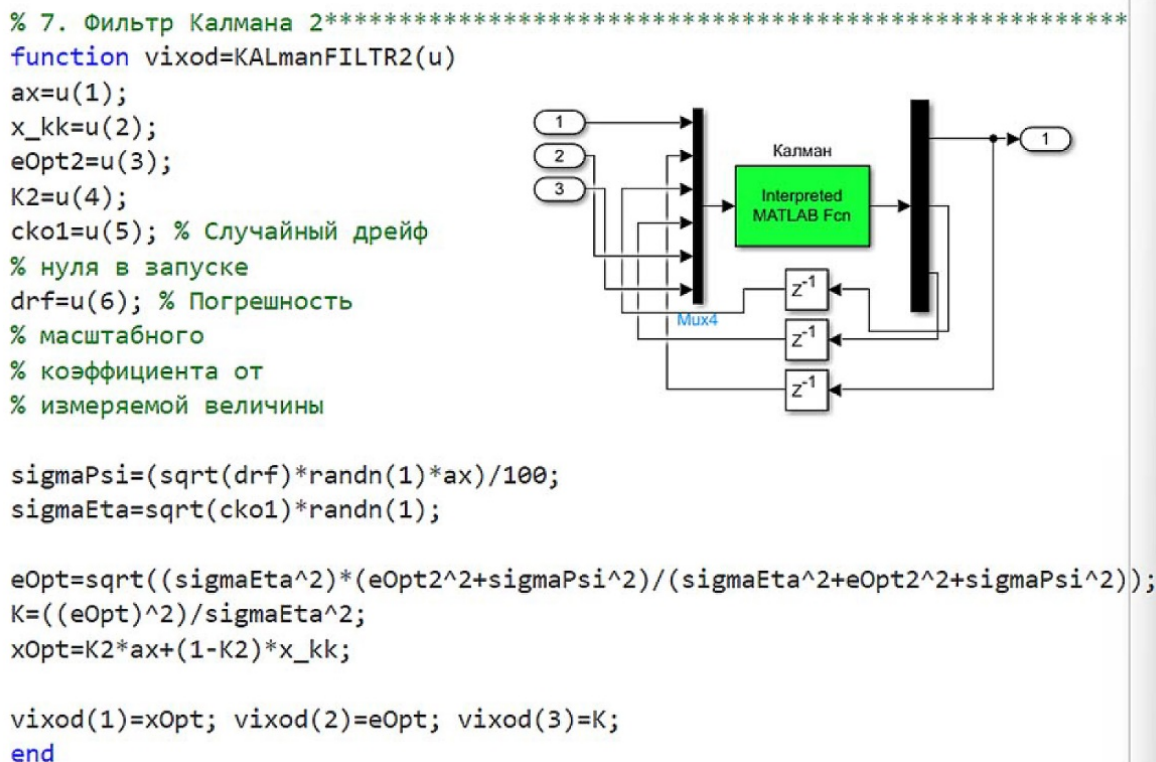


Рис. 6. Программная реализация фильтра Калмана в Simulink-модели
Fig. 6. Software implementation of the Kalman estimator in the Simulink model

где $F_k = 0,7$ – коэффициент комплементарного фильтра [3]; ϑ_N – угол тангажа, полученный с использованием значений ускорений:

$$\vartheta_N = \text{atan}\left(-a_{yc}/\sqrt{a_{xc}^2 + a_{zc}^2}\right) \frac{180}{\pi}.$$

В качестве параметров, характеризующих шумы акселерометра, задаются пользователем:

- погрешность масштабного коэффициента, %;
 - случайный дрейф нуля в запуске, g.
- В качестве параметров шумов ДУС:
- погрешность масштабного коэффициента, %;
 - случайный дрейф нулевого сигнала, рад/с.

Программная реализация фильтра Калмана в Simulink-модели представлена на рис. 6. Медианный фильтр реализовался с помощью стандартного блока *Median Filter* системы Simulink с указанием длины усредняемого сигнала ($l = 10$). Для алгоритма Махони из-

меняемыми параметрами использовались коэффициенты усиления и интегрирования [14], для алгоритма Маджвика – дрейф нуля гироскопа [13].

Обмен информацией между ПЭВМ и микроконтроллером *Arduino Nano* осуществляется в цифровом формате с использованием UART-соединения. Эта задача решается в блоке «Синхронизация с *Arduino Nano*» (рис. 7). Настройки UART-обмена данными осуществляются с использованием блока *Serial Configuration*. Для приема данных из микроконтроллера используется элемент *Serial Receive*. Блок синхронизации микроконтроллера *Arduino Nano* с Simulink-моделью (рис. 7) решает задачу преобразования данных вещественного типа, применяемых при расчете параметров движения объекта в целочисленный тип *uint_8*. Основные элементы программного кода связи *Arduino Nano* с Simulink-моделью на примере передачи сигнала a_{xc} представлены на рис. 8.

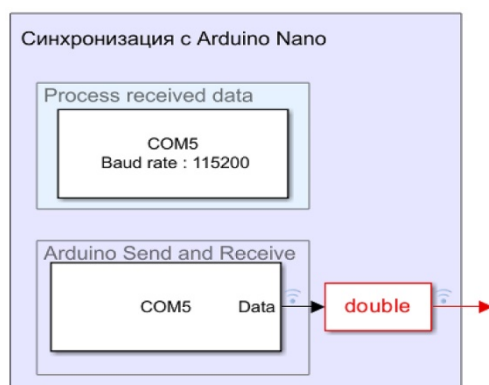


Рис. 7. Синхронизация с *Arduino Nano*
Fig. 7. Synchronization with *Arduino Nano*

```
{
    float number;
    uint8_t bytes[4];
    int i=0;
}
FLOATUNION_t ;
FLOATUNION_t accx_fl;
```

Преобразование формата данных из *uint8_t* в *double* для передачи в *Simulink*

```
Serial.write('A');
accx_fl.number=accx_f ;

for (int i=0; i<4; i++) //
{
    Serial.write(accx_fl.bytes[i]);
    Serial.print('\n');
}
```

Считывание данных по виртуальному COM порту

Рис. 8. Основные элементы программного кода
Fig. 8. The key software code elements

Заключение

В качестве заключения представляется целесообразным отметить следующее.

1. Разработанная конструкция стенда дает возможность провести цикл исследований для отработки алгоритмов навигации и фильтрации, позволяющей учесть как можно более широкий спектр внешних и управляющих воздействий на качество работы БИНС.

2. Комплексное применение *Simulink*-моделей и платформ на базе устройств *Arduino* позволяет оперативно изучить состав, алгоритмы функционирования и структуру построения БИНС.

3. Анализ установившихся процессов и ошибок, при резких и плавных реакциях БИНС на управляющие сигналы по углам ориентации, позволит проанализировать качество фильтрации информации от ДУС и акселерометров, а также провести сравнение ошибок значений координат объекта при использовании *GPS* и координат, рассчитанных с использованием уравнений в параметрах Родрига – Гамильтона.

Разработанный натурный стенд может являться основой для исследования алгоритмов навигации и фильтрации при решении различных целевых задач ВС, а также базой для

построения аналогичного стенда на основе российского программного продукта, например *SiminTech*.

Список литературы

1. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. Кировоград: ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. 171 с.
2. Санько А.А., Шейников А.А. Определение угловой ориентации в БИНС: сравнение традиционных алгоритмов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 1. С. 77–88. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-77-88
3. Иванов Ю.В. Исследование статистических характеристик микромеханических датчиков инерциального модуля / Ю.В. Иванов, В.А. Орлов, Р.В. Алалуев, В.В. Матвеев // Датчики и системы. 2007. № 1. С. 25–26.
4. Санько А.А., Шейников А.А., Туганов Г.Ш. Экспериментальное исследование законов распределения выходных сигналов микроэлектрических навигационных датчиков БПЛА [Электронный ресурс] // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 1. С. 101–112. DOI: 10.51955/23121327-2022-1-101 (дата обращения: 26.05.2024).

5. **Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В.** Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Элмор, 2008. 400 с.

6. **Han Sh.** Random error reduction algorithms for MEMS inertial sensor accuracy improvement – a review / Sh. Han, Zh. Meng, O. Omisore, T. Akinyemi, Y. Yan // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, iss. 11. P. 1021. DOI: 10.3390/mi11111021

7. **Шаврин В.В., Конаков А.С., Тисленко В.И.** Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений // *Доклады ТУСУР*. 2012. № 1-2 (25). С. 265–269.

8. **Владимиров В.М., Гречкосеев А.К., Толстиков А.С.** Имитатор измерительной информации для отработки эфемеридно-временного обеспечения космической навигационной системы ГЛОНАСС // *Измерительная техника*. 2004. № 8. С. 12–14.

9. **Верещиков Д.В., Разуваев Д.В., Костин П.С.** Прикладная информатика: Применение Matlab@Simulink для решения практических задач: учеб. пособие. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 104 с.

10. **Верещиков Д.В.** Натурный стенд для отработки системы управления винтомоторной силовой установкой конвертируемого летательного аппарата / Д.В. Верещиков, И.К. Макаров, И.С. Моисеева, С.М. Баранцев // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2024. Т. 27, № 1. С. 61–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-1-61-71

11. **Харин Е.Г., Копылов И.А.** Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.

12. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, no. 1. Pp. 35–45.

13. **Madgwick S.O.H.** An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays [Электронный ресурс] // *Semantic Scholar*. 2010. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-efficient-orientation-filter-for-inertial-and-Madgwick/bfb456caf5e71d426bd3e2fd529ee833a6c3b7e7> (дата обращения: 26.04.2024).

14. **Mahony R., Hamel T.** Attitude estimation on SO (3) based on direct inertial measurements // *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Orlando, FL, USA, 2006. Pp. 2170–2175. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642025

15. **Mehra R.K.** On the identification of variances and adaptive Kalman filtering // *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1970. Vol. 15, iss. 2. Pp. 175–184. DOI: 10.1109/TAC.1970.1099422

16. **Wang P., Li G., Gao Ya.** A compensation method for gyroscope random drift based on unscented Kalman filter and support vector regression optimized by adaptive beetle antennae search algorithm // *Applied Intelligence*. 2023. Vol. 53. Pp. 4350–4365. DOI: 10.1007/s10489-022-03734-7

17. **Аванесов Г.А.** Вопросы применения микромеханических гироскопов для космических проектов / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, С.А. Дятлов, А.Н. Куркина, В.В. Сазонов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 4. С. 51–63.

18. **Guo H.** Kalman filtering for GPS/magnetometer integrated navigation system / H. Guo, M. Yu, Ch. Zou, W. Huang // *Advances in Space Research*. 2010. Vol. 45, iss. 11. Pp. 1350–1357. DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.011

19. **Brilingaite A., Jensen C.S.** Online Route Prediction for Automotive Applications [Электронный ресурс] // *ResearchGate*. October 2006. 8 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/240804392_ONLINE_ROUTE_PREDICTION_FOR_AUTOMOTIVE_APPLICATIONS (дата обращения: 26.04.2024).

20. **Шахтарин Б.И., Сучков В.Б., Губанов Д.А.** Оптимальная фильтрация случайных процессов: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 90 с.

References

1. **Meleshko, V.V., Nesterenko, O.I.** (2011). Strapdown inertial navigation systems. Tutorial. Kirovograd: POLIMED-Servis, 171 p. (in Russian)

2. Sanko, A.A., Sheinikov, A.A. (2022). Angular orientation determination in SINS: traditional algorithms comparison. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 77–88. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-77-88. (in Russian)
3. Ivanov, Yu.V., Orlov, V.A., Alaluev, R.V., Matveev, V.V. (2007). Investigation of steady-state characteristics of inertial module's micromechanical sensors. *Datchitki i sistemy*, no. 1, pp. 25–26. (in Russian)
4. Sanko, A.A., Sheynikov, A.A., Tuganov, G.Sh. (2022). Experimental study of the distribution laws of output signals of microelectromechanical navigation sensors of an unmanned aerial vehicle. *Crede Experto: transport, society, education, language*, no. 1, pp. 101–112. DOI: 10.51955/23121327-2022-1-101 (accessed: 26.05.2024). (in Russian)
5. Boronakhin, A.M., Lukyanov, D.P., Filatov, Yu.V. (2008). Optical and micromechanical inertial devices. St. Petersburg: Elmor, 400 p. (in Russian)
6. Han, Sh., Meng, Zh., Omisore, O., Akinyemi, T., Yan, Y. (2021). Random error reduction algorithms for MEMS inertial sensor accuracy improvement – a review. *Micromachines*, vol. 11, issue 11, p. 1021. DOI: 10.3390/mi11111021
7. Shavrin, V.V., Konakov, A.S., Tislenko, V.I. (2012). Calibration of strapdown mems acceleration and gyro sensors in inertial navigation systems. *Doklady TUSUR*, no. 1-2 (25), pp. 265–269. (in Russian)
8. Vladimirov, V.M., Grechkoseev, A.K., Tolstikov, A.S. (2004). Simulator of measuring information for testing ephemeris-time support of the GLONASS space navigation system. *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 8, pp. 12–14. (in Russian)
9. Vereshchikov, D.V., Razuvaev, D.V., Kostin, P.S. (2016). Application computer science: Application Matlab@Simulink for the decision of practical problems: Tutorial. Voronezh: VUNTS VVS “VVA”, 104 p. (in Russian)
10. Vereshnikov, D.V., Makarov, I.K., Moiseeva, I.S., Barancev, S.M. (2024). Full-scale simulator to test a control system of an engine-propeller powerplant of a convertible aerial vehicle. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 27, no. 1, pp. 61–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-1-61-71
11. Kharin, E.G., Kopylov, I.A. (2012). Flight testing technologies for onboard equipment of aircraft using an onboard trajectory measurement system. Moscow: MAI-PRINT, 360 p. (in Russian)
12. Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
13. Madgwick, S.O.H. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Semantic Scholar*. Available at: http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf. (accessed: 26.04.2024).
14. Mahony, R., Hamel, T. (2006). Attitude estimation on SO (3) based on direct inertial measurements. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Orlando, FL, USA, pp. 2170–2175. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642025
15. Mehra, R.K. (1970). On the identification of variances and adaptive Kalman filtering. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 15, issue 2, pp. 175–184. DOI: 10.1109/TAC.1970.1099422
16. Wang, P., Li, G., Gao, Ya. (2023). A compensation method for gyroscope random drift based on unscented Kalman filter and support vector regression optimized by adaptive beetle antennae search algorithm. *Applied Intelligence*, vol. 53, pp. 4350–4365. DOI: 10.1007/s10489-022-03734-7
17. Avanesov, G.A., Bessonov, R.V., Dyatlov, S.A., Kurkina, A.N., Sazonov, V.V. (2013). Joint data processing algorithms from star trackers and microelectromechanical angular velocity sensors. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, vol. 10, no. 4, pp. 51–63. (in Russian)
18. Guo, H., Yu, M., Zou, Ch., Huang, W. (2010). Kalman filtering for GPS/magnetometer integrated navigation system. *Advances in Space Research*, vol. 45, issue 11, pp. 1350–1357. DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.011
19. Brilingaite, A., Jensen, C.S. (2006). Online Route Prediction for Automotive Applications. *ResearchGate*, 8 p. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/240804392_ONLINE_ROUTE_PREDICTION_FOR_AUTOMOTIVE_APPLICATIONS (accessed: 26.04.2024).

20. Shakhtarin, B.I., Suchkov, V.B., Gubanov, D.A. (2017). Optimal filtration of random processes: Tutorial. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 90 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Санько Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», nimiz75@mail.ru.

Ветошкин Вячеслав Александрович, преподаватель кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», vv_1@mail.ru.

Ивановская Екатерина Леонидовна, магистр технических наук, преподаватель кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», ekaterina2011715@icloud.com.

Information about the authors

Andrey A. Sanko, Candidate of Technical Sciences, The Head of the Department of Aircraft and Aviation Equipment, Military Faculty, Belarusian State Academy of Aviation, nimiz75@mail.ru.

Vyacheslav A. Vetoshkin, Lecturer, Department of Aircraft and Aviation Equipment, Military Faculty, Belarusian State Academy of Aviation, vv_1@mail.ru.

Ekaterina L. Ivanovskaya, Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of Aircraft and Aviation Equipment, Military Faculty, Belarusian State Academy of Aviation, ekaterina2011715@icloud.com.

Поступила в редакцию 28.06.2024
Одобрена после рецензирования 29.08.2024
Принята в печать 28.11.2024

Received 28.06.2024
Approved after reviewing 29.08.2024
Accepted for publication 28.11.2024

ББК 05
Н 34
Св. план 2024

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 27, № 06, 2024
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 27, No. 06, 2024

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989
от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 24.12.2024.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

12 усл. печ. л.

Заказ № 1061/228

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2024