

Том 22, № 06, 2019

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 22, No. 06, 2019

Издается с 1998 г.

Москва
2019

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, к. филос. н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

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

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

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

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

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

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

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

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

Франко Персиани, PhD, директор Межведомственного Центра промышленных исследований в аэронавтике, Болонский университет, Болонья, Италия;

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 аэронавтики, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Chief Editorial Board

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

Members of the Chief Editorial Board:

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;

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;

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

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

Vacily 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;

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

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

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

Franco Persiani, PhD, Director of Centre, University of Bologna, Bologna, Italy;

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 автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акиншин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президенте 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;

Вышинский В.В., проф., д. т. н., 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;

Кубланов М.С., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, 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;

Нечаев Е.Е., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

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

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

Татаринов 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 «Экспериментальная мастерская 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, 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;

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;

Michael S. Kublanov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 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;

Evgeniy E. Nechaev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, 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;

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, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 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 "Experimental laboratory 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

ТРАНСПОРТ

Ardeshiri S.

The impact of physico-chemical properties of the jet fuel and biofuels on the characteristics of gas-turbine engines 8

Бачкало Б.И., Золотых В.И.

Методический аппарат оценки состояния защищенности авиационной системы от опасных факторов 17

Гладких А.А., Большедворская Л.Г., Волков Ан.К., Волков Ал.К.

Развитие перспективных сетевых тренажерных комплексов на воздушном транспорте с применением нечетких моделей и помехоустойчивого кодирования 29

Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б.

Формирование частных критериев эффективности А-СДМ с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке 44

Филиппова Н.А., Власов В.М.

Методология повышения эффективности и надёжности транспортно-технологической мультимодальной системы Севера России 55

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Buzuluk V.I., Kosushkin K.G., Mavritskiy V.I.

Multi-rotor helicopter type platform capacities research 66

Габриэльян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А.

Особенности использования статистического метода стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах 75

Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Сеник В.Я.

Определение критериев прочности по условиям визуальной контролепригодности ударных повреждений в композитных авиационных конструкциях 86

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Благодарумов А.К., Кирпичев И.Г., Петров Д.В.

Изоляция вычислительных сетей предприятия с использованием виртуализации серверов 100

Borisov Yu.A., Rybkin P.N., Chinyuchin Yu.M.

Information technologies-the basis of training, retraining and advanced training systems for helicopter pilots 112

CONTENTS

TRANSPORT

Ardeshiri S. The impact of physico-chemical properties of the jet fuel and biofuels on the characteristics of gas-turbine engines	8
Bachkalo B.I., Zolotykh V.I. Methodical apparatus for evaluating the state of aviation system safety and security	17
Gladkih A.A., Bolshedvorskay L.G., Volkov An.K., Volkov Al.K. The development of advanced network simulators for air transport by using fuzzy models and noise-resistant coding	29
Lebedev G.N., Malygin V.B. Formation of private performance criteria A-CDM taking into account the interests of the participants in the decision-making process in a dynamic environment	44
Filippova N.A., Vlasov V.M. Methodology of the north of russia transport and technological multimodal system efficiency and reliability improvement	55

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Buzuluk V.I., Kosushkin K.G., Mavritskiy V.I. Multi-rotor helicopter type platform capacities research	66
Gabrielyan D.D. , Kostenko P.I. , Safaryan O.A. Features of the use of the statistical method of frequency stabilization of generators in distributed information-measuring systems	75
Dubinskiy S.V., Feygenbaum Yu.M., Senik V.Ya. Determination of strength criteria on conditions of visual testability of impact damage in composite aircraft constructions	86

MECHANICAL ENGINEERING AND THEORY OF MACHINES AND MECHANISMES

Blagorazumov A.K., Kirpichev I.G, Petrov D.V. Isolation of corporate local area networks using server virtualization	100
Borisov Yu.A., Rybkin P.N., Chinyuchin Yu.M. Information technologies-the basis of training, retraining and advanced training systems for helicopter pilots	112

ТРАНСПОРТ

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

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

UDC 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-8-16

**THE IMPACT OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF
THE JET FUEL AND BIOFUELS
ON THE CHARACTERISTICS OF GAS-TURBINE ENGINES**

S. ARDESHIRI¹

*¹Air Transport Bureau at the International Civil Aviation Organization,
Montreal, Canada*

ABSTRACT

The current development trend of global civil aviation is the growth of passenger and freight traffic, which entails the consumption of jet fuel. Under these conditions, increasing the efficiency of jet fuel used is of great importance. Global energy consumption is constantly growing, and, first of all, the question of diversification of oil resources arises, resources from which the bulk of motor fuels is produced. Other types of raw energy sources (natural gas, coal, bio-mass) currently account for only a small part. However, an analysis of the development of jet fuels indicates that work is underway to obtain these from other sources of raw materials, especially bio-fuels. Much attention is given to obtaining bio-fuels from renewable sources – such as algae. The issue of the mass transition of civil aviation to alternative fuels is complex and requires the solution of intricate technical as well as economic issues. One of these is the assessment of the impact of new fuels on GTE performance. It is important to give an objective and quick assessment of the use of various types of fuels on the main characteristics of the engine – i.e., throttle and high-speed characteristics. In this case, it is necessary to take into account chemical processes in the chemical composition of new types of fuel. To assess the effect of fuels on the characteristics of a gas turbine engine, it is proposed to use a mathematical model that would take into account the main characteristics of the fuel itself. Therefore, the work proposes a mathematical model for calculating the characteristics of a gas turbine engine taking into account changes in the properties of the fuel itself. A comparison is made of the percentage of a mixture of biofuels and JetA1 kerosene, as well as pure JetA1 and TC-1 kerosene. The calculations, according to the proposed model, are consistent with the obtained characteristics of a gas turbine engine in operation when using JetA1 and TC-1 kerosene. Especially valuable are the obtained characteristics of a gas turbine engine depending on a mixture of biofuel and kerosene. It was found that a mixture of biofuel and kerosene changes the physicochemical characteristics of fuel and affects the change in engine thrust and specific fuel consumption. It is shown that depending on the obtained physicochemical properties of a mixture of biofuel and kerosene, it is possible to increase the fuel efficiency and environmental friendliness of the gas turbine engines used.

Key words: biofuel, kerosene, physical and chemical properties, mathematical model, thrust, specific fuel consumption, throttle and altitude characteristics of the engine.

The author expresses her gratitude to Dr. Vajid A. Chishti of the National Research Council of Canada for all his advice and assistance.

INTRODUCTION

The intensive use of civil aviation in passenger and cargo transportation puts forward a demand for increasing the fuel efficiency of aircraft. The use of traditional and new schemes of the aircraft and engine, although increases the efficiency of their application, but it is approaching its maximum limit. It is becoming clear that they can radically improve their performance and reduce CO₂ emissions with-

out the development of new engine configurations and airframe layouts, as well as without the use of alternative fuels¹ [1]. However, alternative fuels, as shown by studies [2], have physicochemical properties that are somewhat different from traditional aviation kerosene. Analysis of research in this area shows that many world airlines are conducting research on the possible use of alternative fuels in gas turbine engines² [3–6].

As can be seen, in order to solve the question of the further use of alternative types of fuels, it is necessary to analyse their influence on the characteristics of gas turbine engines and, first of all, high-speed and throttle. Such an analysis can be carried out on the basis of a mathematical model of a power plant taking into account the variable properties of the fuel [7]. Therefore it is necessary to develop a mathematical model that takes into account changes in the parameters of fuel mixtures such as calorific value, heat capacity, saturated vapour pressure, viscosity, etc. This approach allows us to expand the possibility of studying the influence of new types of fuel on the efficiency of their use in gas turbine engines.

FORMULATION OF THE PROBLEM

The main task of mathematical modelling of a gas turbine engine is to calculate its operational characteristics, that is, to determine the thrust and specific fuel consumption under given flight conditions (H and MH) at a given steady-state mode of operation, that is, the parameters of the gas flow at any point in the engine's flow part are taken, unchanged in time. It is assumed that before the start of the simulation, the calculated engine parameters are known. These parameters can be obtained experimentally or by gas-dynamic calculation of the engine, which is included in the mathematical model as an independent module, or are known in advance.

When calculating the operational characteristics of a gas turbine engine, the flight conditions and its operation mode are specified by setting control factors. It is believed that in the configuration of turbofan engines considered below (figure 1) there is only one control factor – i.e., fuel supply to the main combustion chamber (GT). Therefore, using this control factor, only one (controlled) parameter can be controlled, for example: the reduced rotor speed n_{pr} ; the physical rotor speed n ; the gas temperature in front of the turbine T_g^* ; and the engine thrust F .

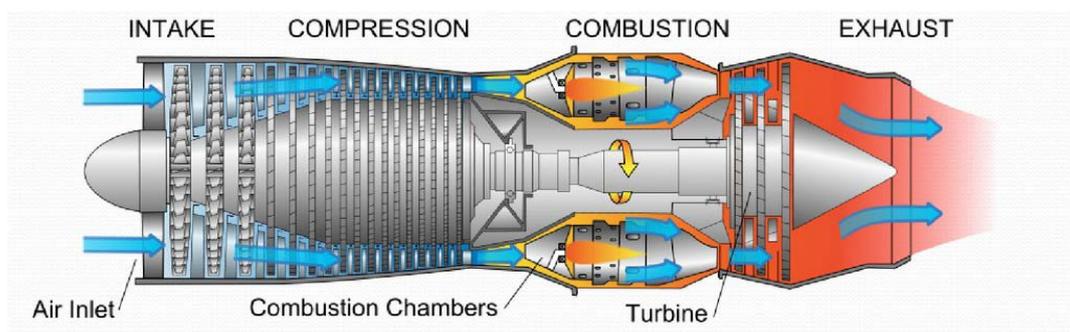


Fig. 1. Scheme of turbojet engine

Since this is an arbitrary choice, it is used in this paper as a managed (modal) physical parameter of selected rotor speed n .

To assess the effect of new fuels on the characteristics of gas turbine engines, a fuel mixture of FT SPK biofuel with JetA1 fuel in the ratio of 50:50, 17% HDO SAK in HEFA SPK was selected as a

¹ ICAO Secretariat. Alternative Fuels. Potential Effects of Alternative Fuels on Local and Global Aviation Emissions ICAO Environmental Report

² Alternative aviation fuels. Proceedings of the meeting on international aviation and climate change. ICAO HLM-ENV/09-WP/9.

working fluid and a comparison was made with the obtained characteristics when using pure JetA1 and TC-1 kerosene.

FT SPK biofuel is produced from coal by Fischer-Tropsch synthesis (FT) and is characterized by a low content of aromatic hydrogens and sulfur^{3,4}.

HDO SAK is a hydro deoxygenated synthesized aromatic kerosene, which consists of approximately 95% mono-aromatic compounds.

HEFA SPK is used to denote biologically active biofuels based on biogenic hydrocarbon raw materials – i.e., a wide range of vegetable oils and fats.

The properties of the working fluid, which is fuel, primarily include the adiabatic exponent k and the gas constant R . In approximate calculations, they can be considered constant, taking the value $k = 1.4$ for air, and for gas, i.e., mixtures of air and fuel combustion products, – $k_g = 1.25...1.33$. The gas constant for air is taken equal to $R = 287.05 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$, and for gas – $R_g = 287.6 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$.

For more accurate calculations, it is recommended to use approximation dependencies. So, the adiabatic exponent for air can be determined by the following formula:

$$k = \frac{(1+1.5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0.672+1.2 \cdot 10^{-3} T^*)} \quad (1)$$

where T^* – is the absolute temperature in the corresponding design section.

To calculate k_g , there is a similar expression:

$$k_g = \frac{(1+1.5 \cdot 10^{-3} T^*)}{(0.672+1.2 \cdot 10^{-3} T^*)} - 0.7g_T + 1.1g_T^2 \quad (2)$$

where the relative amount of fuel consumption g_T in the main combustion chamber is equal to:

$$g_T = \frac{c_p(T_g^* - T_k^*)}{\eta_g H_u} \quad (3)$$

H_u is the calorific value of the fuel. The conditional heat capacity of the heat supply process in the combustion chamber c_p , $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ is determined by the following formula:

$$C_p = 0.883 + 2.09 \cdot 10^{-4} (T_g^* + 0.48 \cdot T_k^*) \quad (4)$$

The gas constant can be calculated by the following approximate formula:

$$R_g = 287.05 + 24.5g_T \quad (5)$$

The coefficient taking into account the physical properties of air or gas in any section of the engine and included in the flow rate formula is determined by the expression:

$$m = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (6)$$

When calculating, it is necessary to take into account that the adiabatic exponent and gas constant are substituted into these formulas for air or gas. All expressions given here, with the exception of (3) and (6), are semi-empirical. Their validity was tested for a wide class of tasks.

³ A new alternative source of fuel for aircraft. Available at: <http://spacefacts.ru/news/planet-earth/eco/725-novyy-alternativnyy-istochnik-topliva-dlya-samoletov.html> (accessed 09.12.2019).

⁴ Aviation needs alternative fuels. Available at: <http://www.aviaport.ru/news/2012/07/27/238185.html> (accessed 09.12.2019).

Given the information above, as the initial data for calculating the effect of new types of fuel on the characteristics of gas turbine engines, the following variable parameters of fuel mixtures were selected:

- H_u – calorific value of the fuel, kJ/kg;
- η_g is the coefficient of heat generation (completeness of combustion);
- c_p – conditional heat capacity of the heat supply process during the combustion of kerosene in air;
- kJ/(kg · K);
- k_g is the adiabatic exponent;
- g_T is the relative fuel consumption in the combustion chamber.

For the studied fuels, these characteristics are summarized in Table 1.

As a rule [8, 9], in the process of operation, mainly 12 basic properties of aviation fuels are used. However, their determination in the Russian Federation and abroad differs by the determination methods and experimental conditions. This complicates their objective comparison. As can be seen from the data presented, the main physicochemical properties of the studied fuels differ from 5 to 8%. However, as will be seen from the calculations, this affects the resulting characteristics of the gas turbine engine.

Table 1

Initial data for the mathematical model of fuels

№ п/п	Fuel grade	H_u , kJ/kg	η_g	k_g	g_T	c_p , kJ/(kg · K)
1	JetA1	42800	0.98	1.11	0.02	2.01
2	50% FT SPK в Jet A-1	44200	0.995	1.14	0.0196	1.98
3	TC-1	43000	0.98	1.33	0.031	1.276
4	17% HDO SAK в HEFA SPK	43600	0.99	1.13	0.0198	2.0

PRIMARY PROVISION

The operational characteristics of an aircraft gas turbine engine are the dependencies of thrust and specific fuel consumption on flight conditions and engine operating conditions. The operational characteristics include high-speed and throttle characteristics.

Along the line of limit modes, an engine control program is formed at maximum speed. GTE are usually equipped with on-board systems for measuring parameters such as: n – rotor speed; T_k^* – air temperature at the inlet to the compressor; T_t^* – temperature behind the turbine, by which one can indirectly monitor the temperature in front of the turbine T_g^* . In our case, we do not change the gas turbine engine regulation program, but we only change the characteristics data of the jet fuel used (Table 1).

High-speed characteristics are composite of high-speed and high-altitude characteristics of a gas turbine engine.

Based on the obtained values of thrust and specific fuel consumption, depending on the fuel used, the graphs $P = f(M_H)$ and $C_{ud} = f(M_H)$ are constructed, as shown in Figures 2 and 3.

According to the obtained dependencies (figure 2 and 3), it can be seen that the engine thrust and specific fuel consumption decrease with increasing height when using all types of fuel.

Such changes in traction parameters and specific fuel consumption are associated with a decrease in pressure, temperature and density of atmospheric air with a rise to a specific altitude.

The use of new types of fuel affects the gas turbine engine working process (thrust P and specific fuel consumption) mainly by the heat of combustion of the fuel, as well as the thermo-physical properties of the products of combustion of this type of fuel in the air [10]. We can say that the effi-

ciency of a gas turbine engine, in this case, will depend on the energy capabilities of the type of fuel used, which is confirmed by the obtained dependencies of thrust and specific fuel consumption.

As can be seen from Figure 3, at the beginning (with $M_H = 0$), the specific fuel consumption has the lowest value when P_{ud} has a maximum value, then, with a decrease in specific thrust, the specific fuel consumption increases.

From the foregoing, it is clear that the operation of the engine is advantageous at altitudes of about 11 km, since at these altitudes the specific fuel consumption is the lowest, which characterizes the efficiency of the engine.

Let now analyse the data obtained at these altitudes. As can be seen from Figure 2 and 3, the propulsion system has slightly higher thrust when using Jet A-1 kerosene and a mixture of 17% HDO SAK in HEFA SPK. Slightly lower with 50% FT SPK in Jet A-1. However, the lowest specific fuel consumption was obtained using a mixture of 50% FT SPK in Jet A-1.

As mentioned above, the performance of a gas turbine engine depends on the physicochemical properties of the fuels used. The calculated design characteristics of gas turbine engines are also confirmed by comparing the properties of the studied fuels (Table 2) [11].

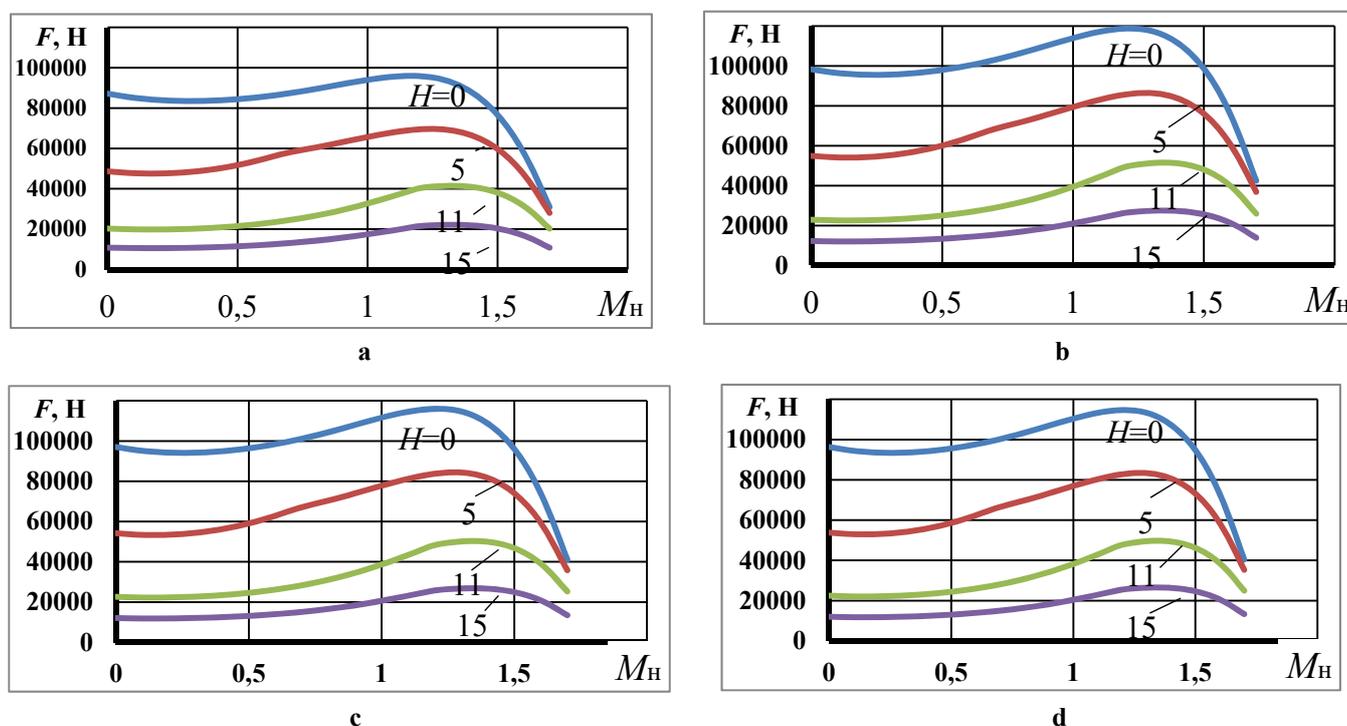


Fig. 2. Dependence of engine thrust on flight speed at different heights when using jet fuel:
a) TS-1; b) Jet A-1; c) 17% HDO SAK in HEFA SPK; d) 50% FT SPK Jet A-1

Table 2

Comparative data of kerosene and biofuel quality indicators

Fuel characteristics	TC-1	Jet A-1	50% FT SPK B Jet A-1	17% HDO SAK B HEFA SPK
net calorific value, MJ / kg	43.2	43,1	43.6	43.6
volumetric heat of combustion, MJ/m ³ · 10 ³	33.9	35,1	34.3	33.8
hydrogen content, %	14.0	13,7	15.0	14.43
carbon content, %	86.0	86,1	85.0	85.54
hydrogen / carbon ratio	0.16	0,16	0.18	0.17

Thus, the data obtained allow us to conclude that the use of a mixture of biofuel with kerosene allows under conditions not to reduce the thrust of the gas turbine engine, while reducing the specific fuel consumption. In addition, a change in the percentage of biofuels and kerosene can affect the take-off-speed and throttle characteristics of a gas turbine engine.

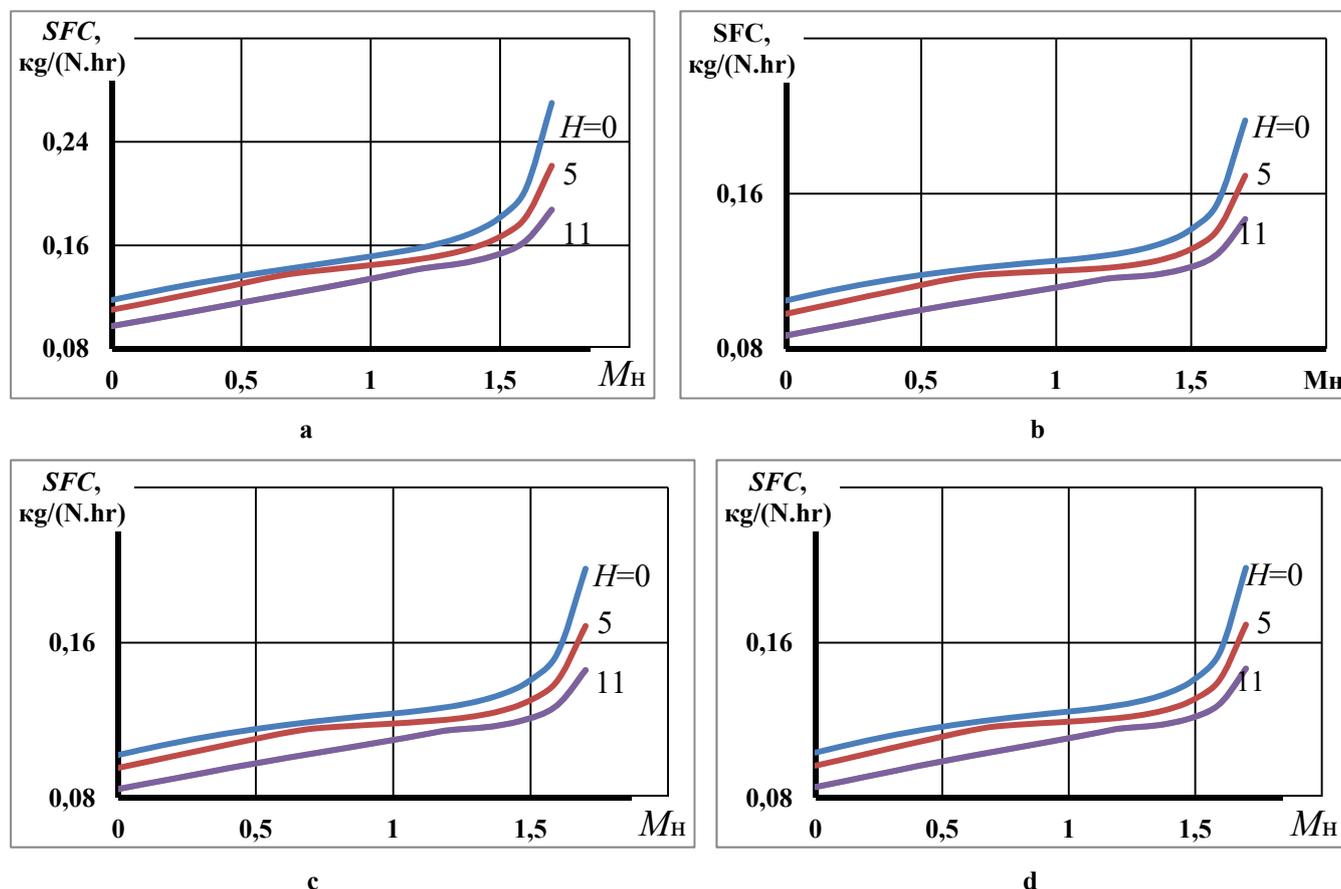


Fig. 3. Dependence of specific fuel consumption on flight speed at different heights in the application including Arctic marks: a) TS-1; b) JetA1; c) 17% HDO SAK in HEFA SPK; d) 50% FT SPK Jet A-1

CONCLUSION

1. A mathematical model has been developed for calculating the characteristics of gas turbine engines depending on the physicochemical properties of jet fuel.
2. The throttle and high-speed characteristics of gas turbine engines obtained by using a mixture of biofuel with kerosene in various proportions were calculated.
3. The reliability of the results is consistent with the results of the throttle and altitude-speed characteristics of the gas turbine engine when using massively used brands of kerosene JetA1 and TC-1.
4. It was found that the use of a mixture of biofuels and JetA1 kerosene allows to obtain higher characteristics of a gas turbine engine.

REFERENCES

1. **Gryadunov, K.I., Kozlov, A.N., Samoylenko, V.M. and Ardeshiri, S.** (2019). *Comparative analysis of quality indicators of aviation kerosine, biofuels and their mixtures*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 5, pp. 67–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75
2. **Vasilev, A.Yu., Chelebyan, O.G. and Medvedev, R.S.** (2013). *Peculiarities of application of biofuel mixture in combustion chambers of modern gas turbine engines*. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, no. 3–2 (41), pp. 57–62. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-57-62 (in Russian)
3. **Liu, K., Wood, J.P., Buchanan, E.R., Martin, P. and Sanderson, V.E.** (2010). *Biodiesel as an alternative fuel in Siemens DLE combustors: atmospheric and high-pressure rig testing*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 132, no. 1: 011501. Available at: <https://doi.org/10.1115/1.3204617> (accessed 10.07.2019).
4. **Fedorov, E.P. and Frantsuzova, N.A.** (2010). *Development of synthetic jet fuel from bio-raw materials*. Ramjet WFD and Chemmotology, in L.S. Yanovskii (Ed.). Proceedings of CIAM, no 1340, pp. 107–116. (in Russian)
5. **Nurgaleev, A.** (2012). *Bioplivno nuzhdaetsya v gosudarstvennoy podderzhke* [Biofuel needs state support]. Available at: <https://www.aviaport.ru/news/2012/02/01/228946.html> (accessed 15.03.2019). (in Russian)
6. **Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R.** (2017). *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*. International Renewable Energy Agency. Available at: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (accessed 15.06.2019).
7. **Zavyalik, I.I., Oleshko, V.S., Samoylenko, V.M. and Fetisov, E.V.** (2016). *Modeling of the functioning units of fuel system of gas turbine engine aircraft in view of aviation fuel quality changes*. Civil Aviation High Technologies, no. 225, pp. 49–54. (in Russian)
8. **Konyaev, E.A. and Gryadunov, K.I.** (2016). *Ekspluatatsionnyye svoystva aviatsionnykh goryuche-smazochnykh materialov: uchebnoye posobiye* [Operational properties of aviation fuels and lubricants. Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 82 p. (in Russian)
9. **Nechaev, V.M. and Tkachev, F.I.** (2015). *Goryuche-smazochnyye materialy i spetsialnyye zhidkosti: uchebnoye posobiye* [Fuels and lubricants and special liquids: Tutorial]. University of Civil Aviation, St. Petersburg, 60 p. (in Russian)
10. **Gishvarov, A.S.** (2008). *Ekspluatatsionnaya nadezhnost toplivnykh sistem vozdushnykh sudov* [Reliability of fuel systems of aircrafts. Proc. Allowance]. Ufa: UGATU, 298 p. (in Russian)
11. **Chishty, W.A., Chan, T., Canteenwalla, P., Davison, C.R. and Chalmers, J.** (2017). *Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation*. Journal of the Global Power and Propulsion Society, pp. 195–210. DOI: 10.22261/S5WGLD

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ardeshiri Shadi, Junior Research Fellow, Air Transport Bureau at the International Civil Aviation Organization (ICAO), shadiardeshiri@gmail.com.

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРОСИНА И БИОТОПЛИВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ш. Ардешири¹

¹Авиатранспортное бюро в Международной организации гражданской авиации (ИКАО), Монреаль, Канада

Современной тенденцией развития мировой гражданской авиации является рост пассажирских и грузовых перевозок, что влечет потребление авиакеросина. В этих условиях важное значение приобретает повышение топливной эффективности применяемого авиатоплива. Мировое потребление энергоресурсов непрерывно возрастает, и прежде всего встает вопрос о диверсификации ресурсов нефти, из которой производится основная доля моторных топлив, на другие виды сырья (природный газ, уголь, биомассу) в настоящее время приходится только незначительная часть объема производства. Однако анализ развития авиатоплив свидетельствует, что интенсивно ведутся работы по получению авиатоплив из других источников сырья, и особенно биотоплива. Большое внимание уделяется получению биотоплива из восстанавливаемых источников – водорослей. Проблема массового перехода гражданской авиации на альтернативные виды топлива является сложной и требует решения комплексных как технических, так и экономических вопросов. Одним из таких вопросов является оценка влияния новых видов топлива на служебные характеристики ГТД. Важно дать объективную и быструю оценку влияния применения различных видов топлив на основные характеристики двигателя – дроссельную и высотно-скоростные. При этом необходимо учитывать сложные химические процессы в химмотологической системе новых видов топлива. Для оценки влияния топлив на характеристики ГТД предлагается применить математическую модель, которая бы учитывала основные характеристики самого топлива. Поэтому в работе предложена математическая модель расчета характеристик ГТД с учетом изменения свойств самого топлива. Проведено сравнение процентного соотношения смеси биотоплива и керосина JetA1, а также чистых керосинов JetA1 и ТС-1. Данные расчеты по предложенной модели согласуются с получаемыми характеристиками ГТД в эксплуатации при использовании керосинов JetA1 и ТС-1. Особенно ценным являются полученные характеристики ГТД в зависимости от смеси биотоплива и керосина. Установлено, что смесь биотоплива и керосина изменяет физико-химические характеристики топлива и влияет на изменение тяги двигателя и удельного расхода топлива. Показано, что в зависимости от получаемых физико-химических свойств смеси биотоплива и керосина можно повысить топливную эффективность и экологичность применяемых ГТД.

Ключевые слова: биотопливо, керосин, физико-химические свойства, математическая модель, тяга, удельный расход топлива, дроссельная и высотная характеристики двигателя.

Автор выражает свою благодарность доктору Ваджиду А. Чишти из Национального исследовательского совета Канады за все его советы и помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грядунов К.И. Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплив и их смесей / К.И. Грядунов, А.Н. Козлов, В.М. Самойленко, Ш. Ардешири // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т.22, №5. С. 67–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75
2. Васильев А.Ю. Особенности применения биотопливной смеси в камерах сгорания современных газотурбинных двигателей / А.Ю. Васильев, О.Г. Челебян, Р.С. Медведев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2013. № 3–2 (41). С. 57–62. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-2(41)-57-62
3. Liu K. Biodiesel as an alternative fuel in Siemens DLE combustors: atmospheric and high pressure rig testing / K. Liu, J.P. Wood, E.R. Buchanan, P. Martin, V.E. Sanderson [Электронный ресурс] // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2010. Vol. 132, no. 1: 011501. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3204617> (дата обращения: 10.07.2019).
4. Федоров Е.П., Французова Н.А. Разработка синтетического реактивного топлива из биосырья // Труды ЦИАМ: Прямочные ВРД и химмотология: сб. науч. ст. / под общ. ред. Л.С. Яновского. 2010. № 1340. С. 107–116.

5. **Нургалеев А.** Биотопливо нуждается в государственной поддержке [Электронный ресурс] // Отраслевое агентство «АвиаПорт». URL: <https://www.aviaport.ru/news/2012/02/01/228946.html> (дата обращения: 15.03.2019).

6. **Lefebvre A.H., Ballal D.R.** Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions [Электронный ресурс] // International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (дата обращения: 15.06.2019).

7. **Завялик И.И.** Моделирование функционирования агрегатов топливной системы газотурбинного двигателя летательного аппарата с учетом изменения качества авиационного топлива / И.И. Завялик, В.С. Олешко, В.М. Самойленко, Е.В.Фетисов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 225. С.49–54.

8. **Коняев Е.А., Грядунов К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов: учебное пособие. М: МГТУ ГА, 2016. 80 с.

9. **Нечаев В.М., Ткачев Ф.И.** Горюче-смазочные материалы и специальные жидкости: учебное пособие / Университет ГА. Санкт-Петербург, 2015. 60 с.

10. **Гишваров А.С.** Эксплуатационная надежность топливных систем воздушных судов: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 298 с.

11. **Chishty W.A., Chan T.** Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation / W.A. Chishty, T. Chan, P. Canteenwalla, C.R. Davison, J. Chalmers // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2017. Pp. 195–210. DOI: 10.22261/S5WGLD

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Ардешири Шади, младший научный сотрудник, Авиатранспортное бюро в Международной организации гражданской авиации (ИКАО), Монреаль, Канада, shadiardeshiri@gmail.com.

Поступила в редакцию 21.10.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 21.10.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 351.814.2

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-17-28

МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ

Б.И. БАЧКАЛО¹, В.И. ЗОЛОТЫХ¹

*¹Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия*

В статье проводится анализ существующих проблем, препятствующих эффективному управлению безопасностью полетов авиационных формирований Вооруженных Сил Российской Федерации. В результате этого анализа выявлено противоречие между необходимостью построения системы управления безопасностью полетов и отсутствием эффективных механизмов оценки состояния авиационной системы и учета влияния человеческого фактора авиационных специалистов на безопасность полетов. Для разрешения данного противоречия требуется разработка комплекса методик, позволяющих количественно оценить реальное состояние защищенности авиационной системы от воздействия угроз, связанных с человеческим фактором летного состава. В результате проведенного исследования проблемы численной оценки влияния личностного фактора летчика на безопасность полета, разработан методический аппарат оценки состояния защищенности авиационной системы от опасных факторов, который основан на применении лично ориентированного подхода к оценке и управлению состоянием авиационной системы. Данный методический аппарат оценки представляет собой комплекс методик численной оценки состояния безопасности полета воздушного судна и состояния безопасности полетов авиационного формирования. Представленная в статье методика оценки состояния безопасности полета позволяет количественно оценить состояние защищенности системы «экипаж – воздушное судно» от воздействия опасных факторов, обусловленных личностным фактором конкретного летчика перед полетом и оценивать в масштабе реального времени состояние защищенности системы «экипаж – воздушное судно» во время выполнения полета.

Ключевые слова: безопасность полетов, безопасность полета, личностный фактор, человеческий фактор, авиационная система, летный состав.

ВВЕДЕНИЕ

Вначале необходимо определиться в терминологии. Для этого потребуется уточнить значение некоторых терминов, имеющих отношение к объекту исследования.

Характерно, что при определении обстоятельств и причин авиационных происшествий (АП) и инцидентов, произошедших вследствие неправильных действий авиационных специалистов при производстве полетов и их обеспечении, применяют термины «человеческий фактор» и «личностный фактор». При этом зачастую происходит смешение понятий, определенных этими терминами. Поэтому необходимо условиться о значении используемых терминов. Даже если эти значения в деталях не совпадут с принятыми в смежных науках, они пояснят мысль авторов, поскольку такое понимание необходимо для дальнейшего исследования.

Для различных сфер человеческой деятельности дано свое определение человеческого фактора. Как правило, в каждом из этих определений отражена возможность причинения вреда системе, обусловленная наличием присущих человеку физиологических и психологических возможностей и ограничений.

В настоящей работе под человеческим фактором (ЧФ) понимается совокупность физиологических и психологических возможностей и ограничений, присущих авиационному персоналу, которые в случае непринятия их во внимание могут стать причиной неправильных действий при организации и выполнении полета и обусловить причину авиационного события [1]. Вопросы проявления ЧФ в авиации рассматривались, например, в работах [2–4].

Необходимо отметить, что на практике, а порой и в теории, довольно часто все причины, связанные с неудовлетворительной деятельностью личного состава, относят к одному опасному фактору – человеческому, хотя в большинстве случаев проявляется так называемый личностный фактор, который по своей сути является разновидностью или составным элементом человеческого фактора.

Как правило, о личностном факторе говорят в том случае, если событие было обусловлено особенностями конкретного человека. Например, личностным фактором может быть уровень физического развития человека: летчику не хватило сил для создания необходимых усилий на ручке управления, когда другие летчики справились бы с этой задачей. Или особенности темперамента летчика не позволили ему выполнить требуемые действия с необходимым темпом, когда другие летчики могли бы благополучно выйти из создавшейся ситуации.

Заметим, что причинами нарушения полетного задания, порядка или правил его выполнения фактически всегда являются именно личностные особенности летчика (его убеждения, склонности, нравственные качества).

Обобщая приведенные выше положения, можно сделать вывод, что понятием «человеческий фактор» в авиации охвачен спектр физиологических и психологических возможностей и ограничений, несущих в себе потенциальную угрозу безаварийному функционированию авиационной системы (АС), присущих авиационному персоналу как совокупности авиационных специалистов. Под личностным фактором понимается набор физиологических, психологических и моральных возможностей и ограничений, присущих конкретному авиационному специалисту – индивидууму, представляющих собой потенциальную угрозу безаварийному функционированию АС. В настоящей работе именно в таком контексте понимаются термины «человеческий фактор» и «личностный фактор».

Безопасность полетов, которая определена в работе [1] как защищенность авиационной системы от воздействия опасных факторов, позволяет обеспечить функционирование авиационной системы без авиационных происшествий. Она подвержена влиянию множества факторов, неустойчивых по своему характеру, находящихся, как правило, в тесных взаимосвязях друг с другом и с компонентами АС. При этом международными и государственными стандартами предписывается обязательное системное управление безопасностью полетов (БзПов). В соответствии с этими требованиями в Концепции¹ определена задача построения системы управления БзПов. Решению этой задачи, по мнению авторов, препятствует следующее.

1. Управление безопасностью полетов в обязательном порядке предусматривает количественное оценивание параметров БзПов, по которым осуществляется управление (управлять возможно тем, что можно измерить).

В работе [1] обосновано, что БзПов необходимо отражать через следующие характеристики: БзПов как процесс реагирования АС – через состояние БзПов;

БзПов как результат реагирования АС – через уровень авиационной аварийности.

Уровень авиационной аварийности – комплексная характеристика БзПов, отображающая посредством системы статистических показателей людские потери и утраты авиационной техники (АТ) в результате АП, произошедших в государственной авиации РФ за определенный период. Одним из показателей уровня авиационной аварийности является количество АП на сто тысяч часов налета [1].

В настоящее время БзПов оценивается совокупностью количественных и качественных показателей. Уровень БзПов оценивается по количеству авиационных событий, произошедших в анализируемом периоде. Такая оценка носит апостериорный характер и не может отражать истинного текущего и перспективного состояния АС. Поэтому единственная возможность успешного решения задач управления БзПов появляется при условии количественной и качественной оценки состояния БзПов в каждом авиационном формировании в масштабе реального времени.

¹ Концепция безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Российской Федерации. Утв. МО РФ 31.05.2017 г. М.: СБП А ВС РФ, 2017. 19 с.

В работе [1] состояние БзПов определено как интегральная характеристика защищенности авиационной системы, определенная воздействием на нее опасных факторов в масштабе реального времени.

Оценка состояния БзПов в авиационных формированиях в настоящее время выполняется способом, определенным Руководством². Но то, что мы пытаемся оценивать этим способом, не является *состоянием* БзПов (курсив авторов). По сути дела, оценивается уровень аварийности за прошедший период, при этом используются абсолютные статистические показатели. И оценивается качество профилактической работы, проведенной в авиационном формировании за оцениваемый период. Ни о какой оценке реального состояния БзПов при таком способе оценки речи быть не может. Отсюда следует вывод – на настоящий момент эффективные механизмы и инструменты, определенные руководящими документами для оценки состояния БзПов в авиационных формированиях, отсутствуют.

2. Согласно официальной статистике большинство АП происходит по причинам, связанным с неудовлетворительной деятельностью авиационных специалистов, задействованных в АС при производстве полетов. Доля таких АП в государственной авиации в разные периоды колеблется от 63 до 85 % от общего количества.

Характерно, что наиболее часто причины АП связаны с ошибочными действиями и умышленными нарушениями летным составом установленных правил при выполнении полетов – то, что на языке авиационных специалистов называют проявлениями «человеческого фактора» (ЧФ). Доля таких АП в общем количестве катастроф и аварий, произошедших по причинам, связанным с неудовлетворительной деятельностью авиационных специалистов при производстве полетов, составляет примерно 80 %.

В широкой авиационной общественности считается признанным тот факт, что в пилотируемой авиации ЧФ является одной из главных причин аварийности. При этом, как показывает практика, ЧФ наиболее сложно поддается контролю. Объясняется это тем, что на протяжении всего периода развития авиации решались задачи обеспечения безопасности полетов, а задачам обеспечения безопасности конкретного полета и управления безопасностью конкретного полета не уделялось должного внимания. При таком подходе попытки контролировать ЧФ авиационных специалистов можно сравнить с попытками контролировать среднюю по больнице температуру больных.

Назрела необходимость разделить такие понятия, как уровень БзПов и уровень безопасности полета (далее БзПа). Для того чтобы повышать уровень БзПа, необходимо оценить его исходное состояние и определить, до какой величины он должен быть повышен. Существующий механизм оценки состояния БзПов такой возможности не дает [4].

АС представляет собой сложную динамическую систему, исполнительной частью которой является система «экипаж – воздушное судно» (далее система ЭВС). Система ЭВС является человеко-машинной или эргатической системой. Главным элементом любой эргатической системы является человек-оператор, поэтому необходимо учитывать влияние социальных и психофизиологических аспектов, связанных с участием человека в управлении системой ЭВС, – то, что на языке авиационных специалистов называют «личностным фактором» (ЛФ).

По сути ЛФ является составным элементом ЧФ, поэтому реальная возможность контролировать ЧФ летного состава авиационных формирований появится при условии контроля ЛФ каждого конкретного летчика.

Существующие в настоящее время механизмы оценки состояния БзПов и контроля готовности элементов АС к полету не позволяют системно учесть влияние на безопасность пред-

² Руководство по предотвращению авиационных происшествий с государственными воздушными судами в Российской Федерации (РПАП-2002 – утверждено приказом МО РФ 2002 г. № 390). М.: Воениздат, 2003. 71 с.

стоящего полета опасных факторов, связанных с ЛФ летчика. Поэтому на сегодняшний день в авиационных формированиях Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) ЛФ каждого летчика системно не учитывается, и оценка его влияния на БзПа носит интуитивный характер. Отсюда следует вывод – на настоящий момент эффективные механизмы и инструменты оценки влияния ЛФ конкретного летчика на БзПа воздушного судна и ЧФ летного состава на БзПов в авиационных формированиях отсутствуют.

Все это образует противоречие, где, с одной стороны, существует объективная необходимость построения эффективной системы управления БзПов, с другой стороны, имеет место недостаток информации о состоянии защищенности АС от воздействия ОФ, обусловленных ЧФ авиационных специалистов, задействованных в АС при производстве полетов. Это противоречие обусловлено отсутствием механизмов оценки состояния БзПов с учетом влияния ЧФ авиационных специалистов, прежде всего из числа летного состава, и препятствует выработке обоснованных управляющих воздействий, направленных на повышение БзПов.

Для устранения этого противоречия на кафедре безопасности полетов ВУНЦ ВВС «ВВА» разработан методический аппарат оценки состояния БзПов, представляющий собой комплекс методик численной оценки состояния БзПа воздушного судна (ВС) и состояния БзПов авиационного формирования. Целью настоящей статьи является доведение до научной общественности и специалистов в области БзПов содержания разработанной методики оценки состояния БзПа с учетом влияния ЛФ летчика.

СПОСОБ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЛФ ЛЕТЧИКА НА СОСТОЯНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ ЭВС

Для того чтобы объективно оценить влияние ЧФ летного состава на защищенность АС, необходимо прежде всего иметь возможность численной оценки влияния ЛФ каждого летчика оцениваемого подразделения на защищенность системы ЭВС, элементом которой является данный летчик. Поэтому вначале разработан способ учета влияния ЛФ летчика на состояние защищенности системы ЭВС. Основой для разработки данного способа послужил метод формализации личностного фактора в эргатической системе, подробно описанный в работе [5].

Разработанный способ базируется на применении лично ориентированного подхода к оценке обеспечения БзПа. Основой лично ориентированного подхода применительно к области БзПов является обязательный учет ЛФ каждого авиационного специалиста, задействованного в АС при производстве полетов.

Для практической реализации данного подхода впервые применен интегральный показатель угроз АС со стороны ЛФ летчика. Данный показатель получил название «суммарный показатель опасности летчика». Численное значение суммарного показателя опасности летчика ($K_{ол}$) зависит от проявлений ЛФ конкретного летчика и может изменяться в диапазоне от 0 до 1. Значение $K_{ол} = 0$ характеризует состояние системы ЭВС при отсутствии угроз со стороны ЛФ летчика, при $K_{ол} = 1$ угрозы состоянию системы ЭВС со стороны ЛФ летчика определяются как максимально возможные.

Получена математическая формула или математическая модель (1) уровня обеспечения безопасности полета, позволяющая учесть как законность допуска к полету конкретного летчика и ВС, так и влияние ЛФ летчика на состояние защищенности системы ЭВС:

$$U = Z_l \cdot (1 - K_{ол}) \cdot 100\% \cdot Z_{ВС} = Z \cdot (1 - K_{ол}) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U – уровень обеспечения БзПа;
 $K_{ол}$ – суммарный показатель опасности летчика;
 Z_l – законность допуска летчика к выполнению предстоящего полета;

$Z_{вс}$ – законность допуска ВС к выполнению предстоящего полета;

Z – законность выполнения полета системой ЭВС.

Значения законности $Z_{л}$, $Z_{вс}$ и Z могут быть «да» или «нет» – «1» или «0». Таким образом, величина U может меняться от 0 до 100 % [4].

Для того чтобы иметь возможность определять численное значение суммарного показателя опасности летчика $K_{ол}$, необходимо:

- определить наиболее существенные показатели угрозы безопасности полета со стороны ЛФ летчика, названных показателями опасности;
- обоснованно определить величину каждого такого показателя опасности.

В результате применения экспертных методов определены пять показателей опасности. В сумме значения показателей опасности дают величину суммарного показателя опасности летчика (2):

$$K_{ол} = K_{саи} + K_{аи} + K_{нд} + K_{нрп} + K_{оп}, \quad (2)$$

где $K_{ол}$ – суммарный показатель опасности летчика;

$K_{саи}$ – показатель опасности, связанный с наличием серьезных авиационных инцидентов (САИ), произошедших по вине летчика;

$K_{аи}$ – показатель опасности, связанный с наличием авиационных инцидентов (АИ), произошедших по вине летчика;

$K_{нд}$ – показатель опасности, связанный с проявлением недисциплинированности летчика при выполнении полетного задания;

$K_{нрп}$ – показатель опасности, связанный с нечестностью летчика при разборе полетов. В данном случае речь идет о межполетном разборе полетов, цель которого – предотвратить выпуск в повторный полет летчика, допустившего авиационный инцидент (АИ). При проведении именно такого разбора полетов наиболее вероятно проявление нечестности летчика;

$K_{оп}$ – показатель опасности, связанный с отстранениями летчика от полетов. Причинами отстранения могут быть неудовлетворительная подготовка к полетам, состояние здоровья перед полетом, выявленное при предполетном медосмотре и т. п.

При определении численных значений показателей опасности применялись методы экспертных оценок. В табл. 1 представлены значения определенных показателей опасности в зависимости от количества зафиксированных фактов негативных проявлений ЛФ летчика.

Таблица 1
Table 1

Значения показателей опасности в зависимости от количества зафиксированных неблагоприятных событий

Values of hazard indicators depending on the number of recorded adverse events

Количество зафиксированных неблагоприятных событий	$K_{саи}$	$K_{нд}$	$K_{аи}$	$K_{оп}$	$K_{нрп}$
0	0	0	0	0	0
1	0,16	0,13	0,11	0,1	0,06
2 и более	0,27	0,22	0,2	0,19	0,12

Период влияния зафиксированного неблагоприятного события на величину соответствующего показателя опасности определялся экспертным методом и составил 1 год в отношении $K_{саи}$, $K_{нд}$ и $K_{аи}$; 6 и 3 месяца в отношении $K_{оп}$ и $K_{нрп}$ соответственно.

Шкала суммарного показателя опасности летчика $K_{ол}$, представленная на рис. 1, использовалась при разработке критериев оценки влияния ЛФ летчика на БзПа.

зеленый	желтый	синий	оранжевый	красный	
0	0,1	0,2	0,5	0,75	1

Рис. 1. Распределение значений суммарного показателя опасности летчика по цветовой шкале
Fig. 1. The distribution of the values of the total hazard indicator of the pilot on a color scale

Критерии распределились по шкале следующим образом:

$K_{ол}$ свыше 0,75 до 1 включительно находится в красном цветовом диапазоне – недопустимо;

$K_{ол}$ свыше 0,5 до 0,75 включительно находится в оранжевом цветовом диапазоне – условно допустимо;

$K_{ол}$ свыше 0,2 до 0,5 включительно находится в синем цветовом диапазоне – допустимо;

$K_{ол}$ свыше 0,1 до 0,2 включительно находится в желтом цветовом диапазоне – вполне допустимо;

$K_{ол}$ свыше 0 до 0,1 включительно находится в зеленом цветовом диапазоне – допустимо в первую очередь.

Таким образом, получив возможность определять численное значение $K_{ол}$ в зависимости от фактов проявления ЛФ летчика и выработав критерии оценки степени влияния данного показателя на БзПа в зависимости от его численного значения, мы получили способ оценки влияния ЛФ летчика на состояние защищенности первичной АС или, иными словами, на БзПа. Полученный способ лег в основу методики оценки состояния безопасности полета воздушного судна с учетом влияния ЛФ летчика.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЛИЧНОСТНОГО ФАКТОРА ЛЕТЧИКА

Состояние безопасности полета в работе [1] обосновано как интегральная характеристика защищенности системы ЭВС, определенная воздействием на нее опасных факторов в масштабе реального времени. Состояние безопасности полета отражают следующие показатели: уровень обеспечения БзПа и уровень БзПа.

Уровень обеспечения БзПа – полученное при подготовке к полету численное значение показателя, отражающего состояние защищенности системы ЭВС от известных и учтенных установленным порядком ОФ, обусловленных ЛФ летчика, перед полетом, с учетом законности допуска к полету летчика и ВС.

Уровень БзПа – показатель, характеризующий состояние защищенности системы ЭВС от воздействия ОФ в ходе выполнения полетного задания [1].

Очевидно, что возможность численно оценить уровень обеспечения БзПа и уровень БзПа появится в результате разработки соответствующих методик.

ОЦЕНКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

В методике оценки уровня обеспечения БзПа определен один оцениваемый показатель – уровень обеспечения БзПа (U). При определении его текущего значения используется выражение (1).

Определение критериев оценки уровня обеспечения БзПа является следующим этапом разработки методики.

С учетом обратной зависимости U от $K_{ол}$ и распределения по цветовой шкале $K_{ол}$, распределение U по цветовой шкале выглядит следующим образом (см. рис. 2).

зеленый	желтый	синий	оранжевый	красный
100 %	90 %	80 %	50 %	25 %
				0 %

Рис. 2. Распределение по цветовой шкале значений уровня обеспечения безопасности полета
Fig. 2. Color scale distribution of flight safety level values

Применяя номинативную шкалу U , определим следующие критерии оценки уровня обеспечения БзПа:

- зеленому цвету соответствуют значения U от 100 до 90 % включительно – допустимо в первую очередь;
- желтому цвету соответствуют значения U от 90 до 80 % включительно – вполне допустимо;
- синему цвету соответствуют значения U от 80 до 50 % включительно – допустимо;
- оранжевому цвету соответствуют значения U от 50 до 25 % включительно – условно допустимо;
- красному цвету соответствуют значения U от 25 до 0 % включительно – недопустимо.

Разработка критериев оценки уровня обеспечения БзПа явилась заключительным этапом разработки методики оценки уровня обеспечения БзПа с учетом влияния ЛФ летчика, структурная схема которой показана на рис. 3.

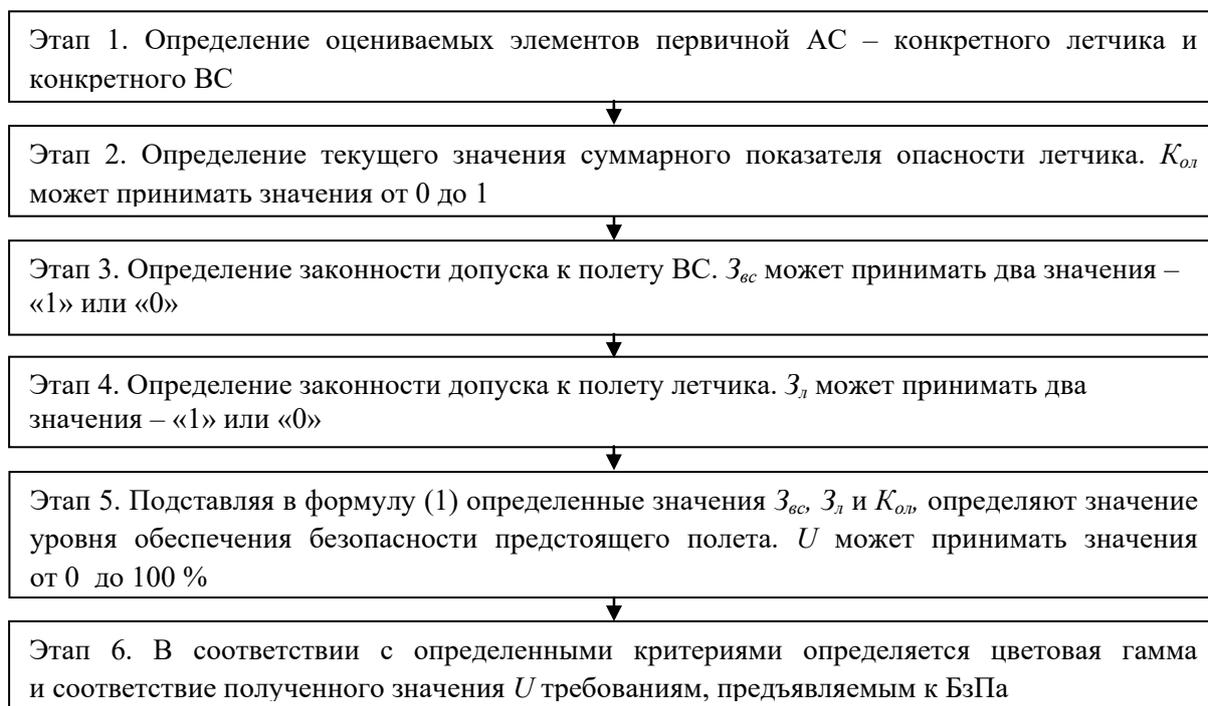


Рис. 3. Структурная схема методики оценки уровня обеспечения безопасности полета с учетом влияния личного фактора летчика

Fig. 3. Block diagram of the methodology for assessing the level of flight safety, taking into account the influence of the personal factor of the pilot-pilot

Данная методика позволяет оценить состояние защищенности системы ЭВС перед полетом с учетом законности допуска к полету летчика и ВС и с учетом влияния ЛФ летчика на БзПа [4].

ОЦЕНКА УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

В ходе непосредственного выполнения полетного задания решаются задачи управления БзПа. Суть этого процесса заключается в том, чтобы своевременно определить возникновение особой ситуации (ОС) в полете и путем управляющих воздействий прежде всего не позволить перерасти ОС в аварийную, а в оптимальном варианте – вернуть систему ЭВС в штатные параметры полета [6–9].

ОС – это нештатная ситуация в которую попадает система ЭВС в результате воздействия на нее ОФ. По степени опасности последствий для экипажа (пассажиров) и АТ особые ситуации подразделяются на следующие:

- усложнение условий полета;
- сложную ситуацию;
- аварийную ситуацию;
- катастрофические ситуации.

В ходе процесса управления БзПа становится актуальным уровень БзПа (W). Величина W определяется значением уровня обеспечения БзПа U и степенью особой ситуации (ОС), в которой находится система ЭВС в момент оценки. Для численной оценки влияния ОС на уровень БзПа впервые применен показатель, характеризующий степень ОС в полете, названный в исследовании коэффициентом безопасности полета (K_{δ}).

Значение уровня БзПа может быть представлено в виде функции:

$$W = f(U, K_{\delta}).$$

Определение значения K_{δ} является наиболее сложным при оценке уровня БзПа. Для успешного решения этой задачи необходимо разработать и внедрить в систему управления БзПа автоматизированной системы, способной определять в режиме реального времени степень опасности возникающей в полете ОС для системы ЭВС. Такая автоматизированная система до сих пор не создана, но технические затруднения не должны создавать препятствий для проведения научных исследований в направлении оценки реального состояния защищенности системы ЭВС во время выполнения полетного задания.

Значение U определяется перед полетом и остается постоянным в процессе всего полета, при условии благополучного его завершения. Переменная K_{δ} может изменяться в течение полета в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от сложности ОС, возникающей в полете. Значение $K_{\delta} = 0$ характеризует состояние системы ЭВС при отсутствии ОС, при $K_{\delta} = 1$ ОС стала катастрофической.

В окончательном виде уровень БзПа можно представить в виде выражения (3)

$$W = U \cdot K_{\delta}, \quad (3)$$

где W – уровень БзПа;

U – уровень обеспечения БзПа;

K_{δ} – коэффициент безопасности полета.

Очевидно, что величина W может меняться от 100 до 0 %.

Для удобства применения целесообразно качественно оценить состояние БзПа во время его выполнения. На рис. 4 показано распределение значений W по цветовой шкале.

зеленый	желтый	синий	оранжевый	красный	
100 %	90 %	80 %	50 %	25 %	0 %
отлично	хорошо	удовлетвор.	неудовлетворительно		

Рис. 4. Распределение значений уровня безопасности полета W по цветовой шкале
Fig. 4. The distribution of the values of the safety level of the flight W on a color scale

Значения W от 100 до 90 % включительно находятся в зеленом цветовом диапазоне – желательно. Оценка за состояние БзПа – отлично;

Значения W менее 90 до 80 % включительно находятся в желтом цветовом диапазоне – вполне допустимо. Оценка за состояние БзПа – хорошо;

Значения W менее 80 до 50 % включительно находятся в синем цветовом диапазоне – допустимо. Оценка за состояние БзПа – удовлетворительно;

Значения W менее 50 до 25 % включительно находятся в оранжевом цветовом диапазоне – нежелательно. Оценка за состояние БзПа – неудовлетворительно;

Значения W менее 25 до 0 % включительно находятся в красном цветовом диапазоне – недопустимо. Оценка за состояние БзПа – неудовлетворительно;

Распределение значений W по цветовой шкале определено методом экспертных оценок. В частности, применен метод опроса экспертов, который проводился способом интервьюирования-анкетирование в один тур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате применения лично ориентированного подхода к оценке состояния АС разработана методика оценки состояния БзПа с учетом влияния ЛФ летчика.

Способ учета влияния ЛФ летчика на состояние защищенности системы ЭВС и полученный в ходе его разработки интегральный показатель угроз безопасности предстоящего полета, получивший название «суммарный показатель опасности летчика», положены в основу разработанной методики оценки состояния БзПов в авиационном формировании. Эта методика позволяет в результате применения лично ориентированного подхода к оценке состояния АС оценивать состояние защищенности АС тактического уровня функционирования (авиационная часть) от ОФ, обусловленных ЧФ летного состава во время организации и проведения полетов в масштабе реального времени. К сожалению, объем статьи не позволяет довести содержание этой методики до заинтересованных читателей. Но в планы авторов входит опубликование полученных результатов в следующих выпусках «Научного Вестника».

В заключение необходимо отметить, что разработанный инструмент оценки состояния защищенности АС от ОФ носит адаптивный характер ввиду того, что при его разработке широко применялись экспертные методы. Поэтому велика вероятность внесения дополнений и уточнений в ходе его практического применения, что в конечном итоге поможет усовершенствовать полученный инструмент оценки состояния защищенности АС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотых В.И. О состоянии безопасности полетов // Электронное периодическое издание «Воздушно-космические силы. Теория и практика». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2017. № 3. С. 59-67.
2. Козлов А.С. Человеческий фактор и система обеспечения безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 182. С. 84–88.

3. Пономаренко В.А. Психологический анализ летных происшествий и предпосылок к ним: метод. пособие. М.: Военное издательство, 1990. 56 с.
4. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск: Поликом, 2006. 629 с.
5. Бачкало Б.И., Золотых В.И. Метод учета влияния «личностного фактора» человека-оператора на безопасность управляемой им эргатической системы // Вестник Академии военных наук. 2018. № 3. С. 96–103.
6. Бачкало Б.И., Ирмалиев Р.Э. Информационная теория безопасности: монография. Монино: ВВА, 2011. 98 с.
7. Жмеренецкий В.Ф., Полулях К.Д., Акбашев О.Ф. Активное обеспечение безопасности полета летательного аппарата: методология, модели, алгоритмы. М.: ООО «Ленанд», 2014. 320 с.
8. Жмеренецкий В.Ф. Научно-методические основы построения и функционирования бортовых КСБП // Проблемы безопасности полетов. М.: ВИНТИ, 1998. № 6. С. 25–32.
9. Ирмалиев Р.Э. Информационная модель безопасного полета воздушного судна // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». Йошкар-Ола: ПГТУ. 2015. № 2 (26). С. 41–50.
10. Ирмалиев Р.Э. Некоторые возможности реализации элементов искусственного интеллекта в бортовой информационно-управляющей системе безопасности полета воздушного судна // Научные чтения по авиации посвященные памяти Н.Е. Жуковского. М.: ООО "Экспериментальная мастерская НаукаСофт". 2015. С. 295–300.
11. Артюхович М.В., Феоктистова О.Г. Роль инженерно-технического персонала в обеспечении безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 39–43.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бачкало Борис Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры боевой подготовки (авиации) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», bachkalo@list.ru.

Золотых Валерий Иванович, кандидат военных наук, доцент кафедры безопасности полетов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», zolotikh-valeri@yandex.ru.

METHODICAL APPARATUS FOR EVALUATING THE STATE OF AVIATION SYSTEM SAFETY AND SECURITY

Boris I. Bachkalo¹, Valeri I. Zolotikh¹

¹*Air Force Education and Research Center "The Zhukovsky and Gagarin
Air Force Academy", Voronezh, Russia*

ABSTRACT

The article analyzes the existing problems that impede the effective safety management of the flights of the air forces of the Armed Forces of the Russian Federation. As a result, this analysis revealed the contradiction between the need to build a safety management system and the lack of effective mechanisms for assessing the state of the aviation system and taking into account the influence of the human factor of aviation professionals on flight safety. The contradiction identified the need for developing a set of

methods to estimate the actual state of the aviation system protection from the effects of threats associated with the human factor of flight personnel. A methodological apparatus was developed for assessing the security status of an aviation system against hazardous factors, which is based on applying a personality-oriented approach to assessing and managing the state of an aviation system. The method of assessing the state of flight safety allows you to quantify the state of protection of the crew-aircraft system from the impact of hazards caused by the personal factor of a particular pilot before the flight and to assess in near real-time the state of protection of the crew-aircraft system during the flight. The method of assessing the state of safety in aviation formation allows you to assess the status of safety during the organization and conduct of flights, taking into account the influence of the human factor of flight personnel in near real time.

Key words: flight safety, flight security, personality factor, human factor, aviation system, flight personnel.

REFERENCES

1. Zolotykh, V.I. (2017). *On the aviation units flights safety state problem*. Electronic periodical «Aerospace forces. Theory and practice». Voronezh: VUNTS VVS «VVA», no. 3, pp. 59–67. (in Russian)
2. Kozlov, A.S. (2012). *The human factor like the main element in system of safety of flight*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no. 182, pp. 84–88. (in Russian)
3. Ponomarenko, V.A. (1990). *Psikhologicheskiy analiz letnykh proisshestviy i predposylok k nim: metodicheskoye posobiye* [Psychological analysis of flight accidents and prerequisites for them]. Moscow: Voennoye izdatelstvo, 56 p. (in Russian)
4. Ponomarenko, V.A. (2006). *Psikhologiya chelovecheskogo faktora v opasnoy professii*. [Psychology of the human factor in a dangerous profession]. Krasnoyarsk: Polikom, 629 p. (in Russian)
5. Bachkalo, B.I. and Zolotykh, V.I. (2018). *Method of accounting influence of the "human factor" of the human-operator on the safety of the ergas system managed by them*. Vestnik Akademii voyennykh nauk, no. 3, pp. 96–103. (in Russian)
6. Bachkalo, B.I. and Irmaliyev, R.E. (2011). *Informatsionnaya teoriya bezopasnosti poletov. Monografiya* [Information Theory of Flight Safety: Monograph]. Monino: VVA, 98 p. (in Russian)
7. Zhmerenetskiy, V.F., Polulyakh, K.D. and Akbashev, O.F. (2014). *Active safety flight of the aircraft. Methodology, models, algorithms*. Moscow: OOO «Lenand», 320 p. (in Russian)
8. Zhmerenetskiy, V.F. (1998). *Nauchno-metodicheskiye osnovy postroyeniya i funktsionirovaniya bortovykh KSBP* [Scientific and methodological foundations of the construction and operation of airborne KSBP]. Problemy bezopasnosti poletov. Moscow: VINITI, no. 6, pp. 25–32. (in Russian)
9. Irmaliyev, R.E. (2015). *Information model of the safe flight of aircraft*. Vestnik of Volga State University of Technology. Series «radio engineering and infocommunication systems». Yoshkar-Ola: VSUOT, no. 2 (26), pp. 41–50. (in Russian)
10. Irmaliyev, R.E. (2015) *Nekotoryye vozmozhnosti realizatsii elementov iskusstvennogo intellekta v bortovoy informatsionno-upravlyayushchey sisteme bezopasnosti poleta vozdušnogo sudna* [Some opportunities for the implementation of elements of artificial intelligence in the onboard information and control safety system of the flight of an aircraft]. Nauchnyye chteniya po aviatsii posvyashchennyye pamyati N.Ye. Zhukovskogo. Moscow: OOO «Eksperimentalnaya masterskaya NaukaSoft», pp. 295–300. (in Russian)
11. Artyukhovich, M.V. and Feoktistova, O.G. (2014). *The role of the technical staff in the flight safety*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no. 204, pp. 39–43. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris I. Bachkalo, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Professor of the Air Force Education and Research Center "The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy", bachkalo@list.ru.

Valeri I. Zolotykh, Candidate of Military Sciences, the Associate Professor of the Air Force Education and Research Center "The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy", zolotykh-valeri@yandex.ru.

Поступила в редакцию 02.08.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 02.08.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 658.71.08,519.87

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-29-43

РАЗВИТИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЕВЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ВОЗДУШНОМ ТРАНСПОРТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ

А.А. ГЛАДКИХ¹, Л.Г. БОЛЬШЕДВОРСКАЯ², Ан.К. ВОЛКОВ¹, Ал.К. ВОЛКОВ¹

¹Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,
г. Ульяновск, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

В данной работе проведен анализ зарубежного опыта и сделан вывод, что один из путей повышения эффективности обеспечения авиационной безопасности в Российской Федерации заключается в применении современных сетевых тренажерных комплексов. Предложен и апробирован новый подход к оценке уровня компетентности операторов досмотра, позволяющий учитывать параметры глазодвигательной деятельности и вариабельности сердечного ритма испытуемых операторов, отличающийся от существующих подходов применением нечетких моделей классификации. В качестве аппаратных средств психофизиологического мониторинга использованы технология Eye tracking и устройство психофизиологического тестирования УПФТ-1/30 «Психофизиолог». Представлены основы автоматической генерации нечетких моделей типа Сугено и Мамдани из экспериментальных данных. Проведены экспериментальные исследования на базе ФГБОУ ВО УИ ГА. Результаты сравнения сгенерированных моделей показали, что модель Сугено, обученная с применением ANFIS-алгоритма, точнее, чем модель Мамдани и модель линейной регрессии, идентифицирует исследуемую зависимость по оценке компетентности операторов досмотра. В качестве критерия качества моделей на обучающих и тестовых данных использована средняя квадратическая ошибка. Обоснована актуальная задача выбора эффективной концепции помехоустойчивого кодирования в телекоммуникационной составляющей перспективных тренажерных комплексов. Описаны пути решения важной задачи повышения достоверности актуальных цифровых данных в сетевых тренажерных комплексах на основе применения средств помехоустойчивого кодирования. Представлена модель перестановочного декодера недвоичного избыточного кода на базе лексикографической когнитивной карты. Данная модель декодера избыточного кода использует методы когнитивной обработки данных при реализации процедуры перестановочного декодирования для эффективной защиты команд дистанционного управления от влияния деструктивных факторов на процесс управления.

Ключевые слова: оператор досмотра, тренажерная подготовка, технология Eye tracking, нечеткие модели, ANFIS-алгоритм, субтрактивная кластеризация, сетевые технологии, помехоустойчивое кодирование.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач, стоящей перед авиационной отраслью в настоящее время, является повышение качества профессиональной подготовки различных категорий авиационного персонала, и в частности операторов досмотра. Для решения данной задачи необходимо повысить уровень интеллектуализации процессов принятия решений по оценке компетентности операторов досмотра и реализовать интеграцию систем подготовки в единое информационное пространство.

Начальная подготовка операторов досмотра реализуется с применением специализированных компьютерных тренажеров, а текущая подготовка на рабочем месте с применением технологии проецирования изображений опасных предметов (ПИОП) [1]. Согласно рекомендациям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) подготовка авиационного персонала должна основываться на анализе фактических данных (Evidence Based Training, ЕВТ). Достижение качественной подготовки авиационных специалистов в рамках ЕВТ в первую очередь достигается за счет внедрения аппаратных средств психофизиологического мониторинга. Применение биологической обратной связи позволяет получать объективную и всестороннюю информацию о процессе тренажерной подготовки операторов. В данной работе для решения широкого

круга диагностических задач в области подготовки операторов досмотра на базе биологической обратной связи предлагается использовать технологию Eye tracking и метод вариационной кардиоинтервалометрии (ВКМ). Применение технологии Eye tracking позволяет оценить стратегии зрительного поиска запрещенных предметов операторами. Использование метода ВКМ в свою очередь позволяет оценить степень психофизиологической напряженности (ПФН) (психофизиологической «цены» выполняемой задачи) операторов во время тренажерной подготовки. Исследования особенностей движения глаз при решении профессиональных задач в процессе подготовки активно развиваются в медицине [2, 3], спорте [4, 5] и авиации [6, 7]. Существующие модели [8], используемые для оценки компетентности операторов досмотра, применяют только итоговые результаты их деятельности, не учитывая при этом параметры глазодвигательной деятельности и ПФН операторов. При этом в рамках даже одной тренировочной сессии в условиях ЕВТ генерируется большой информационный массив, поэтому необходимо применять технологии интеллектуального анализа данных. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового подхода к поддержке принятия решений по оценке уровня компетентности операторов досмотра, заключающегося в применении аппаратных методов диагностики психофизиологического состояния обучающихся с последующим автоматическим проектированием нечетких моделей из экспериментальных данных. В связи с тем, что принятие решений в области обеспечения авиационной безопасности часто происходит в условиях неопределенности и неполноты исходных данных, применение нечетких моделей является оправданным.

Анализ зарубежного опыта показывает, что развитие сетевой организации подготовки операторов досмотра является актуальным направлением повышения качества обеспечения авиационной безопасности. В целях стандартизации начальной подготовки операторов досмотра в Европейском союзе был разработан сетевой тренажерный комплекс X-Ray Tutor [9]. В целях централизованного управления текущей подготовкой операторов на рабочих местах 3-е поколение технологии ПИОП также реализовано с применением сетевых технологий [10]. В настоящее время в Европейском союзе реализуется проект «Автоматическое сравнение рентгеновских изображений при сканировании грузов» (Automated Comparison of X-ray Images for cargo scanning) [11, 12]. Данный проект предполагает объединить в общую сеть как объекты транспортной инфраструктуры, так и различные исследовательские центры [13]. Необходимо отметить, что внедрение сетевых технологий в процессы организации подготовки операторов досмотра предъявляет повышенные требования к характеристикам применяемых каналов связи. Для подобных систем реального времени требуется обеспечить качество визуальных данных, своевременность и достоверность получаемой и обрабатываемой цифровой информации. При этом даже в условиях применения очень надежных оптических систем связи возникает острая необходимость использования средств и методов помехоустойчивого кодирования для защиты данных от ошибок. В связи с этим обоснование и выбор эффективной концепции помехоустойчивого кодирования в телекоммуникационной составляющей перспективных тренажерных комплексах является, безусловно, актуальной задачей.

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРА

Методика автоматического проектирования нечетких моделей по результатам кластеризации

На практике чаще всего используют два основных типа нечетких моделей: модель Мамдани и модель Сугено. Нечеткий вывод Мамдани предполагает, что все значения входных и выходной переменных заданы нечеткими множествами. Нечеткий вывод Сугено предполагает, что заключения правил являются линейными функциями от входов. Методика автоматического

проектирования нечетких моделей из экспериментальных данных предполагает, что имеется зависимость $y = f(X)$, которую можно описать нечеткой базой знаний. При этом имеется обучающая выборка из M пар данных, связывающая входные данные (x) с выходом (y) исследуемой зависимости [14]:

$$(X_r, y_r), \quad r = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где X_r – значение входных данных в r -й строке выборки и y_r – соответствующий выход.

Процедура генерации модели Сугено из экспериментальных данных состоит из двух этапов. На первом этапе для синтеза базовой структуры нечеткой модели применяется субтрактивная кластеризация. На втором этапе происходит обучение полученной базовой модели с применением ANFIS-алгоритма. Обучение модели Сугено осуществляется по критерию средней квадратической ошибки ($RMSE_s$):

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(P, B, X_r))^2}, \quad (2)$$

где P – вектор характеристик функций принадлежности (ФП) термов переменных (x); B – вектор коэффициентов в заключениях правил базы знаний Сугено; $F(P, W, X_r)$ – результат нечеткого логического вывода Сугено.

Генерация из данных нечеткой модели Мамдани реализуется с помощью кластеризации по алгоритму нечетких s -средних. Обучение модели Мамдани осуществляется по критерию средней квадратической ошибки ($RMSE_m$):

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{r=1, M} (y_r - F(P, W, X_r))^2}, \quad (3)$$

где P – вектор характеристик ФП термов переменных (x) и (y); W – вектор весовых коэффициентов правил базы знаний; $F(P, W, X_r)$ – результат нечеткого логического вывода Мамдани.

Термы переменных представляются нечеткими множествами с гауссовыми ФП. Для оценки качества разбиения исходных данных на нечеткие кластеры используется индекс Хей-Бени (Index Xei-Beni, IXB) [15]:

$$IXB = \frac{\sum_{i=1, c} \sum_{k=1, M} (\mu_{ki})^m \|X_k - V_i\|^2}{M \min_{i \neq j} (\|X_k - V_i\|^2)}, \quad (4)$$

где μ_{ki} – элемент матрицы нечеткого разбиения, причем $\mu_{ki} \in [0, 1]$, $k = \overline{1, M}$, $i = \overline{1, c}$; X_k – k -й элемент общего множества X ; V_i – центры нечетких кластеров; m – экспоненциальный вес, $m \in (1, \infty)$.

Разбиению на компактные и отделимые кластеры соответствует критерий $IXB < 1$. В качестве входных переменных (x) модели используются три показателя, описывающих стратегии зрительного поиска операторов (DT, SE и ET), которые представлены в работе [14]. Четвертый показатель HR описывает психофизиологическое напряжение оператора и базируется на анали-

зе частоты сердечных сокращений. Выходом модели (y) является частота обнаружения запрещенных предметов. Таким образом, ставится задача идентифицировать нелинейную зависимость между показателями глазодвигательной деятельности оператора, его психофизиологической напряженностью и частотой обнаружения запрещенных предметов.

Генерация нечетких моделей оценки компетентности операторов досмотра

Для разработки нечеткой модели были проведены экспериментальные исследования на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева». В качестве средств съема показателей деятельности операторов использовался ай-трекер Eye Tracking Glasses 2.0 и устройства психофизиологического тестирования УПФТ-1/30 «Психофизиолог». В тестировании приняло участие 35 курсантов, из них 30 вошли в обучающую выборку и 5 в тестовую.

Для оценки качества исходных данных проведено робастное оценивание, которое представлено в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Робастное оценивание
Robust evaluation

	Trimmed mean, 5,000 %	Winsorized mean, 5,000 %	Grubbs Test Statistic	p-value	Std. Dev.
<i>DT</i>	2,989	2,985	2,208	0,795	0,445
<i>SE</i>	0,100	0,106	2,072	1,000	0,094
<i>ET</i>	2,258	2,294	2,603	0,219	0,695
<i>HR</i>	0,958	0,955	3,037	0,038	0,049

Критерии Граббса для максимальных значений показателей *DT*, *SE*, *ET* и *HR* имеют уровень значимости 0,7952; 1; 0,2199; 0,03858 соответственно, что больше выбранного уровня значимости $\alpha = 0,01$. Рассчитанные критерии Граббса не превышают критического значения, равного 3,33 при $\alpha = 0,01$. Таким образом, максимальные значения не являются выбросами. Значения показателей точности выборочных характеристик равны: $Ar_{DT} = 2,5234\%$, $Ar_{SE} = 14,9901\%$, $Ar_{ET} = 5,1421\%$, $Ar_{HR} = 0,8634\%$. Значение Ar для *DT* и *HR* находится ниже заданных критериев, что говорит о достаточной точности данных характеристик. Для остальных интегральных показателей значение Ar несколько превышает 5 %. Проведенный анализ показал пригодность полученных статистических данных для обучения нечеткой модели.

Для генерации нечетких моделей использовался пакет Fuzzy Logic Toolbox системы Matlab. С помощью функции *genfis2* генерируется модель Сугено с использованием субтрактивной кластеризации. Значение радиусов кластеров равно 0,7. В результате синтезирована нечеткая модель Сугено с тремя правилами:

ЕСЛИ $DT=in1cluster1$ И $SE=in2cluster1$ И $ET=in3cluster1$ И $HR=in4cluster1$, ТО $DP=out1cluster1$;
ЕСЛИ $DT=in1cluster2$ И $SE=in2cluster2$ И $ET=in3cluster2$ И $HR=in4cluster2$, ТО $DP=out1cluster2$;
ЕСЛИ $DT=in1cluster3$ И $SE=in2cluster3$ И $ET=in3cluster3$ И $HR=in4cluster3$, ТО $DP=out1cluster3$.

Ошибка моделирования на обучающей выборке согласно (2) равна $trnRMSE_1^1 = 0,0105$, а на тестовой – $chkRMSE_1^1 = 0,8313$. Результаты тестирования модели на обучающей выборке после субтрактивной кластеризации представлены на рис. 1.

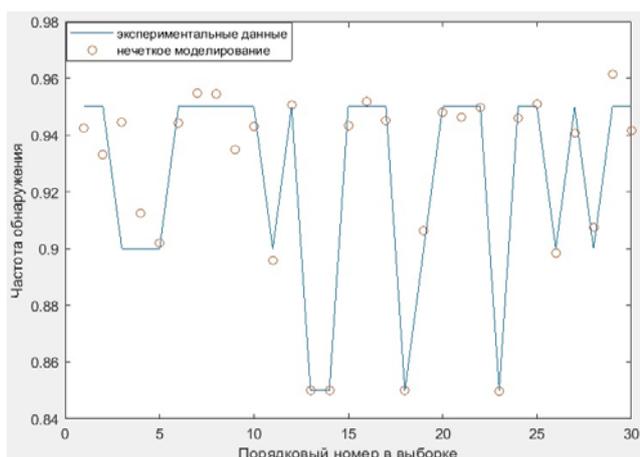


Рис. 1. Тестирование модели Сугено
Fig. 1. Testing the Sugeno model

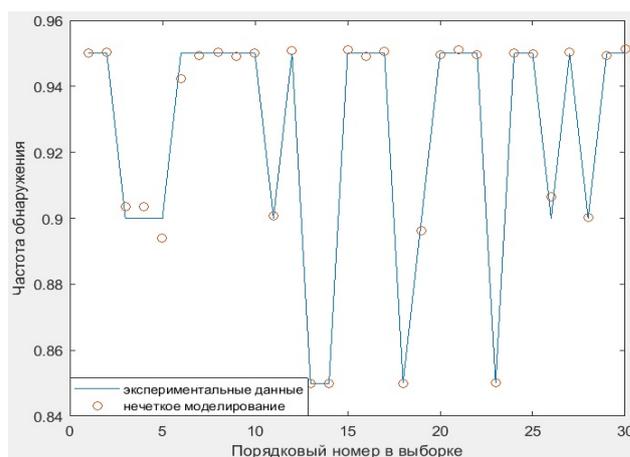


Рис. 2. Тестирование модели Сугено после ANFIS-обучения
Fig. 2. Testing the Sugeno model after ANFIS-training

После обучения модели на протяжении 200 итераций с использованием ANFIS-алгоритма значение ошибок снизилось до $trnRMSE_2^1 = 0,0025$ и $chkRMSE_2^1 = 0,0329$. Сравнение экспериментальных данных с результатами нечеткого моделирования после ANFIS-обучения представлено на рис. 2.

На рис. 3 представлены кривые обучения модели при использовании ANFIS-алгоритма.

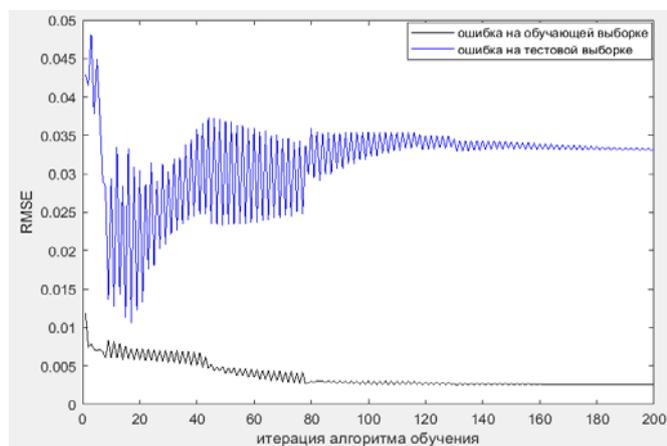


Рис. 3. Динамика обучения модели Сугено
Fig. 3. Dynamics of learning Sugeno model

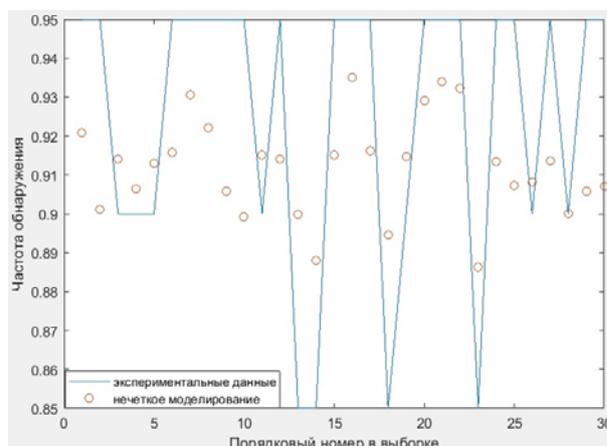


Рис. 4. Тестирование модели Мамдани
Fig. 4. Testing Mamdani model

Анализ динамики обучения (рис. 3) позволяет сделать вывод, что ошибка на тестовой выборке достигает наименьшего значения на 20-й итерации ($chkRMSE_{мес}^1 = 0,0106$). При этом ошибка на обучающей выборке снижается на протяжении всех 200 итераций.

На рис. 5 и 6 изображены ФП нечетким кластерам для переменной HR до обучения ANFIS-алгоритмом и после обучения.

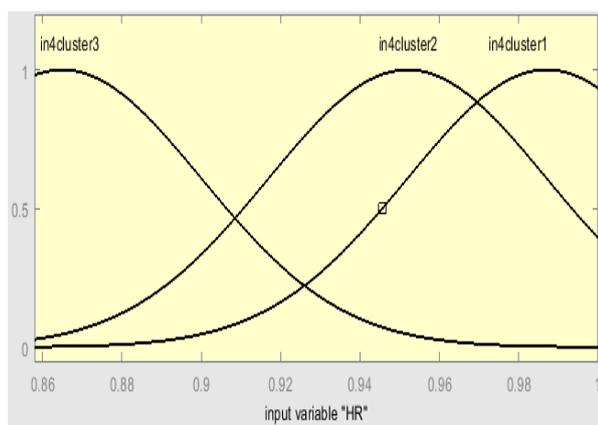


Рис. 5. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной HR до обучения

Fig. 5. Membership functions for fuzzy clusters of HR variable before learning

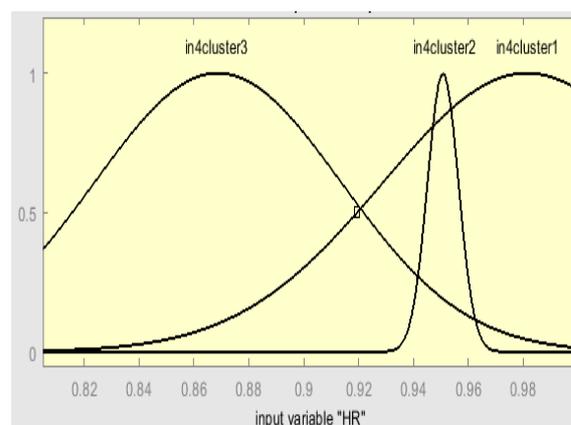


Рис. 6. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной HR после ANFIS-обучения

Fig. 6. Membership functions for fuzzy clusters of HR variable after ANFIS learning

Параметры ФП для всех значений переменной *HR* представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Параметры функций принадлежности нечетким кластерам
Parameters of membership functions for fuzzy clusters

Входная переменная	Кластер	до обучения		после ANFIS-обучения	
		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>b'</i>	<i>c'</i>
<i>HR</i>	cluster1	0,987	0,035	0,981	0,052
	cluster2	0,952	0,035	0,951	0,005
	cluster3	0,865	0,035	0,868	0,045

В данном случае показатель *b* характеризует координату максимума, а показатель *c* коэффициент концентрации функций принадлежности. Аналогичным образом после применения ANFIS-алгоритма были уточнены как параметры ФП других входных переменных, так и параметры в заключениях правил модели Сугено.

С помощью функции *genfis3* была сгенерирована нечеткая модель Мамдани. Параметры алгоритма нечетких *s*-средних были выбраны следующими: количество кластеров – 3; экспоненциальный вес – 2; значение улучшения целевой функции за одну итерацию – 0,00001; количество итераций – 100. В результате нечеткой кластеризации сгенерирована модель Мамдани, также содержащая базу знаний из трех правил. Ошибка моделирования на обучающей выборке согласно (3) равна $trnRMSE_3^1 = 0,0323$, а на тестовой – $chkRMSE_3^1 = 0,0360$. Результаты тестирования модели на обучающей выборке представлены на рис. 4. В результате кластеризации получена матрица координат центров нечетких кластеров (и матрица степеней принадлежности объектов кластерам).

На рис. 7 и 8 представлены примеры ФП нечетким кластерам для входной переменной SE и выходной переменной DP.

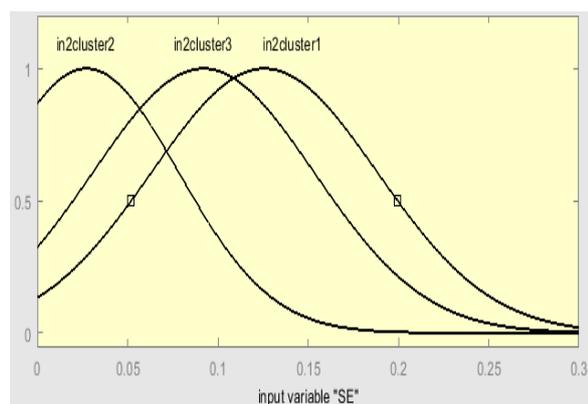


Рис. 7. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной SE

Fig. 7. Membership functions for a fuzzy cluster of the variable SE

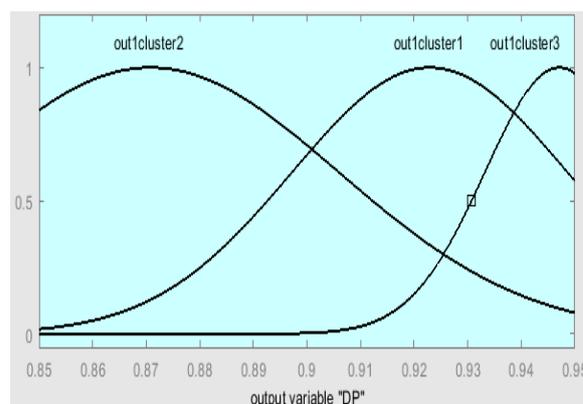


Рис. 8. Функции принадлежности нечетким кластерам переменной DP

Fig. 8. Membership functions for a fuzzy cluster of the variable DP

Следующим этапом исследования являлся регрессионный анализ. Параметры регрессионной модели для исследуемой зависимости представлены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Параметры регрессионной модели
Regression model parameters

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	Значение t-критерия Стьюдента	Уровень значимости (p-value)
Константа	0,554	0,103	5,332	9,102E-06
DT	-0,025	0,007	-2,874	0,007
SE	0,095	0,034	2,873	0,008
ET	-0,005	0,005	-0,920	0,364
HR	0,467	0,084	5,595	4,339E-06
R^2	0,83			

Ошибка модели на обучающей выборке равна $trnRMSE_4^1 = 0,0368$, а на тестовой – $chkRMSE_4^1 = 0,0393$. Оценка правильности выбора количества кластеров проводилась по критерию IXB и согласно (4) составила 0,6892. Таким образом, был сделан вывод, что получены компактные и отделимые нечеткие кластеры. На последнем этапе сравнивались результаты нечеткой идентификации с моделью линейной регрессии (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Оценка качества моделей
Evaluation of the models' quality

Нечеткая модель	$RMSE$ на обучающей выборке	$RMSE$ на тестовой выборке
Сугено (без ANFIS-обучения)	0,0105	0,8313
Сугено (с ANFIS-обучением)	0,0025	0,0329
Мамдани	0,0323	0,0360
Линейная модель регрессии	0,0368	0,0393

Из табл. 4 следует, что модель Сугено, обученная с применением ANFIS-алгоритма, точнее других моделей идентифицирует исследуемую зависимость по оценке компетентности операторов досмотра.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В СЕТЕВЫХ ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Концепция когнитивной метафоры в перестановочном декодировании

Объективной основой интеллектуализации многих перспективных информационных и технологических процессов является совершенствование процедуры управления при их реализации в масштабе реального времени. Последнее обстоятельство требует поиска путей сокращения цикла получения требуемого изображения, внедрения принципов когнитивной адаптации и искусственного интеллекта. Конечно же, использование недвоичных кодов является бесспорным. Тогда становится очевидным, что жесткие требования к длительности цикла представления обучающего видеоряда не позволяют использовать в полной мере для достижения указанной цели ряд положений теории помехоустойчивого кодирования, например, в виде систем турбокодирования с емкой по числу арифметических операций процедурой итеративных преобразований данных или системы, основанной на полярных кодах. Указанные конструкции недостаточно приспособлены для обработки недвоичных сигналов. На этом фоне возникает проблема эффективного применения коротких недвоичных помехоустойчивых кодов для защиты векторных изображений с максимальным использованием введенной в такие коды избыточностью и быстрой идентификацией цифровых данных. Предлагается метод, в котором емкая по времени процедура решения системы линейных уравнений заменяется на шаблон, хранящийся в памяти декодера. Метод основан на возможности создания множества эквивалентных кодов в системе перестановки символов кодовых векторов [17, 18]. Преимуществом перестановочного декодирования (ПД) перед другими методами в контексте когнитивной обработки данных является наличие детерминированной составляющей, которую декодер может вычислять в процессе работы и хранить в когнитивной карте. Данный подход резко снижает сложность реализации процедуры декодирования на программируемых логических интегральных схемах.

Результаты помехоустойчивого кодирования на базе когнитивной метафоры

Анализ показывает, что целевая функция алгоритма ПД содержит несколько стохастических параметров и единственную детерминированную компоненту. Образ целевой функции можно представить как

$$F\{\bullet\} = \begin{cases} \{V_k\} \oplus e(h); \\ \{P_n\}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\{V_k\}$ – множество случайных векторов, составляющих суть команды управления, а $e(h)$ – вероятность появления векторов помех длины n как функция отношения сигнал/шум при $h = E_b/N_0$, действующих на элементы множества $\{V_k\}$. К детерминированной составляющей целесообразно отнести множество перестановок $\{P_n\}$, формирующихся на втором этапе реализации ПД. Принципиально такие перестановки могут быть вычислены заранее (в процессе обучения декодера), и результаты вычисления матриц вида могут быть зафиксированы в памяти декодера, по сути в его когнитивной карте. В этом случае сложный в реализационном отношении второй этап алгоритма ПД однозначно теряет свое негативное значение в реализации процедуры ПД.

Пусть в системе обмена данными используется недвоичный код РС с параметрами (7,3,5). Порождающая матрица G этого кода в систематической форме имеет вид

$$G = \begin{pmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

а столбцы матрицы нумеруются обычным образом слева направо. Здесь и далее α – примитивный элемент поля $GF(2^3)$. Предположим, что надежными символами в некотором принятом кодовом векторе кода РС будут символы с номерами (2 4 5), а менее надежные символы в порядке убывания значений располагаются в последовательности вида (6 7 1 3). Тогда из выражения (6) следует

$$G' = \begin{pmatrix} 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 0 \\ \alpha^0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & 0 & \alpha^0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В систематической форме матрица (7) принимает вид

$$G'_{sis} = \begin{pmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Заметим, что для вычисления матрицы (8) при реализации известного алгоритма ПД пришлось выполнить 336 арифметических операций в поле $GF(2^3)$.

В ходе оперативной обработки данных сочетание надежных символов кодовой комбинации вида (2 4 5) даже в одном сеансе связи с высокой долей вероятности может повторяться. Поэтому в целях экономии вычислительного ресурса декодера целесообразно сохранить этот результат в памяти процессора и использовать эти данные при возможных повторениях перестановок с номерами (2 4 5). Проверочная часть матрицы, полученная из выражения (8) и представленная на рис. 9, со строго возрастающей последовательностью номеров строк называется канонической, и сама матрица является эталонной.

$$\begin{matrix} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ 6 & 7 & 1 & 3 \end{matrix}$$

Рис. 9. Структура эталонной матрицы в каноническом виде по системе надежных символов
Fig. 9. The structure of the reference matrix in canonical form on the system of reliable symbols

В ходе исследований установлено, что при сохранении номеров позиций в перестановках k надежных и $(n - k)$ ненадежных символов следует на первом шаге переставлять строки эта-

лонной матрицы, а на втором шаге – столбцы этой новой матрицы. Следуя принципам когнитивной обработки данных, декодер, получив, например, кортеж значений надежных символов в виде (5 2 4) для первых k надежных символов принятой комбинации и оставшихся $(n - k)$ менее надежных символов в виде (3 7 1 6), формирует матрицу G' , исходя из структуры эталонной матрицы, как показано ниже:

$$G'_{sis} = \begin{vmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{vmatrix}.$$

Для этого выполняются три действия с перестановкой строк, например, вторая строка из эталонной матрицы с первой позиции устанавливается на вторую позицию в соответствии с перестановкой (5 2 4) и т. п. И затем выполняются четыре перестановки столбцов вновь образованной матрицы с соответствующей конфигурацией ненадежных символов (3 7 1 6). Всего семь действий копирования и переноса данных вместо 336 арифметических операций. Проверка полученного результата (и многих других) с применением классической методики показала справедливость предложенной модели ПД.

$$\begin{matrix} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 & 2 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 & 4 \\ 6 & 7 & 1 & 3 & & 6 & 7 & 1 & 3 & & 3 & 7 & 1 & 6 \end{matrix} \Rightarrow$$

Становится очевидным, что для поиска эталонной матрицы декодер не выполняет арифметических операций в полях Галуа, а реализует тривиальную процедуру копирования и адресного переноса данных. В последнем случае число таких операций всегда будет равно длине кодового вектора n .

Таблица 5
Table 5

Оценка выигрыша по числу операций
Estimation of winning by the number of operations

Код Рида – Соломона	Классический метод	Предложенный метод
Код PC (7,3,5)	336	7
Код PC (15,5,11)	$2,4 \cdot 10^3$	15
Код PC (15,9,7)	$2,9 \cdot 10^6$	15
Код PC (15,13,3)	$6,8 \cdot 10^{10}$	15

Преимущества предлагаемого метода очевидны, особенно для кодов с различной корректирующей способностью при фиксированной длине кодового вектора. Впервые разработана модель декодера избыточного кода, использующая методы когнитивной обработки данных при реализации процедуры перестановочного декодирования для эффективной защиты команд дистанционного управления от влияния деструктивных факторов на процесс управления. Математически обоснован аппарат быстрых матричных преобразований эталонных матриц и доказаны

циклические свойства таких матриц, позволившие за счет некоторого увеличения вычислительной нагрузки на процессор декодера снизить объем его когнитивной карты до приемлемых размеров. Современная элементная база позволяет реализовать алгоритмы ПД. Повышение скорости получения конечного результата позволяет говорить о целесообразности использования алгоритмов ПД для систем реального времени, и в частности для построения тренажерных средств для специалистов системы авиационной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа зарубежного опыта был сделан вывод, что важным направлением повышения эффективности обеспечения авиационной безопасности в Российской Федерации является применение современных сетевых тренажерных комплексов. Разработан новый подход к поддержке принятия решений по оценке уровня компетентности операторов досмотра, заключающейся в применении аппаратурных методов диагностики психофизиологического состояния обучающихся с последующим автоматическим проектированием нечетких моделей из экспериментальных данных. В работе описаны пути решения важной задачи повышения достоверности и надежности передачи данных в сетевых тренажерных комплексах на основе применения помехоустойчивого кодирования. Представлены результаты моделирования перестановочного декодера недвоичного избыточного кода на базе когнитивной карты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hofer F., Schwaninger A.** Using threat image projection data for assessing individual screener performance // Safety and Security Engineering. 2005. Vol. 82. Pp. 417–426. DOI: 10.2495/SAFE050411
2. **Atkins M.** What do surgeons see: capturing and synchronizing eye gaze for surgery applications / M. Atkins, G. Tien, R. Khan, A. Meneghetti, B. Zheng // Surgical Innovation. 2013. Vol. 20, no. 3. Pp. 241–248. DOI: 10.1177/1553350612449075
3. **Bond R.R.** Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach / R.R. Bond, T. Zhu, D.D. Finlay, B. Drew, P.D. Kligfield, D. Guldenring, C. Breen, A.G. Gallagher, M.J. Daly, G.D. Clifford // J. Electrocardiol. 2014. Vol. 47, no. 6. Pp. 895–906. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011
4. **Menshikova G.Ya.** Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique / G.Ya. Menshikova A.I. Kovalev, O.A. Klimova, A.M. Chernorizov, S.V. Leonov // Procedia, social and behavioral sciences. 2014. Vol. 146. Pp. 252–258. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.123
5. **Hancock D.J., Ste-Marie D.M.** Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees // Psychology of Sport and Exercise. 2013. Vol. 14 (1). Pp. 66-71. DOI: 10.1016/j.psychsport.2012.08.002
6. **Vrzakova H., Bednarik R.** Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits // Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction. 2012. Vol. 7. Pp. 130–136. DOI: 10.1145/2401836.2401843
7. **Weibel N.** Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck / N. Weibel, A. Fouse, C. Emmenegger, S. Kimmich, E. Hutchins // Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. 2012. Pp. 107–114. DOI: 10.1145/2168556.2168573

8. **Hofer F.** Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2004. Vol. 38. Pp. 303–308. DOI: 10.1109/CCST.2004.1405409
9. **Schwaninger A.** Reacting to the terror threat. Analyzing, controlling and adapting to the meet new threats // Airport. 2006. Vol. 5. Pp. 30–31.
10. **Schwaninger A.** Increasing efficiency in airport security screening // Safety and Security Engineering. 2005. Vol. 82. Pp. 407–416. DOI: 10.2495/SAFE050401
11. **Visser W.** Automated comparison of x-ray images for cargo scanning / W. Visser, A. Schwaninger, D. Hardmeir, A. Flisch, M. Costin, C. Viene, F. Sukowski, U. Hassler U., I. Dorion, A. Marciano, G. Koomen, M. Slegt, C.A. Cesare // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2016. Vol. 50. Pp. 268–276. DOI: 10.1109/CCST.2016.7815714
12. **Kolokytha S.** Creating a reference database for cargo inspection X-ray images using high energy CT of cargo mock-ups / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, S. Hartmann, W. Vasser, A. Schwaninger, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // IEEE Instrumentation and measurement society. 2016. Pp. 249–254. DOI: 10.1109 / IST.2016.7738232
13. **Kolokytha S.** Improving customs' border control by creating a references database of cargo inspection X-ray images / S. Kolokytha, A. Flisch, T. Lüthi, M. Plamondon, A. Schwaninger, W. Vasser, D. Hardmeier, M. Costin, C. Vienne, F. Sukowski, U. Hassler, I. Dorion, N. Gadi, S. Maitrejean, A. Marciano, A. Canonica, E. Rochat, G. Koomen, M. Slegt // Technology and Engineering Systems Journal. 2017. Vol. 2, iss 3. Pp. 60–66. DOI: 10.25046/aj020309
14. **Волков А.К.** Исследование и диагностика стратегий зрительного поиска операторов досмотра с применением технологии Eye-tracking в целях создания интеллектуальных тренажерных комплексов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 75–86.
15. **Штовба С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия, Телеком, 2007. 288 с.
16. **Yager R., Filev D.** Essentials of Fuzzy Modeling and Control. New York: John Wiley & Sons. 1984, 387 p.
17. **Гладких А.А.** Перестановочное декодирование как инструмент повышения энергетической эффективности систем обмена данными // Электросвязь. 2017. № 8. С. 52–56.
18. **Гладких А.А., Ал Тамими Т.Ф.Х.** Система быстрых матричных преобразований в процедуре формирования эквивалентных избыточных кодов // Радиотехника. 2017. № 6. С. 41–44.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладких Анатолий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», a_gladkikh@mail.ru.

Большедворская Людмила Геннадьевна, доктор технических наук, доцент, профессор ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», l.bolshedvorskaya@mstuca.aero.

Волков Андрей Константинович, аспирант, ассистент ФГБОУ ВО «Ульяновский института гражданской авиации», oabuvauga@mail.ru.

Волков Александр Константинович, кандидат технических наук, старший преподаватель ФГБОУ ВО «Ульяновский института гражданской авиации», oabuvauga@mail.ru.

THE DEVELOPMENT OF ADVANCED NETWORK SIMULATORS FOR AIR TRANSPORT BY USING FUZZY MODELS AND NOISE-RESISTANT CODING

Anatoliy A. Gladkih¹, Lyudmila G. Bolshedvorskaya²,
Andrei K. Volkov¹, Alexander K. Volkov¹

¹Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

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

ABSTRACT

The article analyzes foreign experience and concludes that one of the ways to improve the efficiency of aviation security in the Russian Federation is to use modern network training complexes. A new approach to the assessment of the competence of the aviation security screeners was proposed and tested, that allows to take into account the parameters of the oculomotor activity and heart rate variability of the aviation security screeners being tested, different from the existing approaches using fuzzy classification models. The eye-tracking technology and the device of psychophysiological testing UPFT-1/30 "Psychophysiologicalist" were used as instruments of psychophysiological monitoring. The basics of automatic generation of fuzzy models such as Sugeno and Mamdani from experimental data are presented. Experimental studies were conducted on the basis of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute. The results of the comparison of the generated models showed that the Sugeno model trained with the use of ANFIS-algorithm is more accurate than the Mamdani model and the linear regression model identifies the dependence being studied, according to the competence of aviation security screeners. As a criterion of quality of models on training and test data the average square error is used. The actual problem of choosing an effective concept of noise-resistant coding in the telecommunication component of advanced training complexes is substantiated. The ways of solving the important problem of increasing the reliability of actual digital data in network training complexes based on the use of noise-resistant coding are described. A model of permutation decoder of non-binary redundant code based on lexicographic cognitive map is presented. This model of redundant code decoder uses methods of cognitive data processing in the implementation of the procedure of permutation decoding to effectively protect remote control commands from the influence of destructive factors on the control process.

Key words: aviation security screener, simulator training, Eye-tracking technology, fuzzy models, ANFIS-algorithm, subtractive clustering, network technologies, noise-resistant coding.

REFERENCES

1. Hofer, F. and Schwaninger A. (2005). *Using threat image projection data for assessing individual screener performance*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 417–426. DOI: 10.2495/SAFE050411
2. Atkins, M., Tien, G., Khan, R., Meneghetti, A. and Zheng, B. (2013). *What do surgeons see: capturing and synchronizing eye gaze for surgery applications*. Surgical Innovation, vol. 20, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.1177/1553350612449075
3. Bond, R.R., Zhu, T., Finlay, D.D., Drew, B., Kligfield, P.D., Guldenring, D., Breen, C., Gallagher, A.G., Daly, M.J. and Clifford, G.D. (2014). *Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach*. J. Electrocardiol, vol. 47, no. 6, pp. 895–906. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011
4. Menshikova, G.Ya., Kovalev, A.I., Klimova, O.A., Chernorizov, A.M. and Leonov, S.V. (2014). *Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique*. Procedia, social and behavioral sciences, vol. 146, pp. 252–258. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.08.123
5. Hancock, D.J. and Ste-Marie, D.M. (2013). *Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees*. Psychology of Sport and Exercise, vol. 14 (1), pp. 66–71. DOI: 10.1016/j.psychsport.2012.08.002

6. **Vrzakova, H. and Bednarik, R.** (2012). *Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits*. Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction, vol. 7, pp. 130–136. DOI: 10.1145/2401836.2401843
7. **Weibel, N., Fouse, A., Emmenegger, C., Kimmich, S. and Hutchins, E.** (2012). *Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck*. Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications, pp. 107–114. DOI: 10.1145/2168556.2168573
8. **Hofer, F.** (2004). *Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings, vol. 38, pp. 303–308. DOI: 10.1109/CCST.2004.1405409
9. **Schwaninger, A.** (2006). *Reacting to the terror threat. Analyzing, controlling and adapting to the meet new threats*. Airport, vol. 5, pp. 30–31.
10. **Schwaninger, A.** (2005). *Increasing efficiency in airport security screening*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 407–416. DOI: 10.2495/SAFE050401
11. **Visser, W., Schwaninger, A., Hardmeir, D., Flisch, A., Costin, M., Viene, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Marciano, A., Koomen, G., Slegt, M. and Cesare C.A.** (2016). *Automated comparison of x-ray images for cargo scanning*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. vol. 50, pp. 268–276. DOI: 10.1109/CCST.2016.7815714
12. **Kolokytha, S., Flisch, A., Lüthi, T., Plamondon, M., Hartmann, S., Vasser, W., Schwaninger, A., Hardmeier, D., Costin, M., Vienne, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Canonica, A., Rochat, E., Koomen, G. and Slegt, M.** (2016). *Creating a reference database for cargo inspection X-ray images using high energy CT of cargo mock-ups*. IEEE Instrumentation and measurement society, pp. 249–254. DOI: 10.1109 / IST.2016.7738232
13. **Kolokytha, S., Flisch, A., Lüthi, T., Plamondon, M., Schwaninger, A., Vasser, W., Hardmeier, D., Costin, M., Vienne, C., Sukowski, F., Hassler, U., Dorion, I., Gadi, N., Maitrejean, S., Marciano, A., Canonica, A., Rochat, E., Koomen, G. and Slegt, M.** (2017). *Improving customs' border control by creating a references database of cargo inspection X-ray images*. Technology and Engineering Systems Journal, vol. 2, no. 3, pp. 60–66. DOI: 10.25046/aj020309
14. **Volkov, An.K.** (2019). *The research and diagnostics of aviation security screeners' visual search strategies by using Eye-tracking technology in order to develop intellectual training complexes*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, GosNII GA, no. 25, pp. 75–86. (in Russian)
15. **Shtovba, S.D.** (2007). *Proyektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]*. Moscow: Hot line, Telecom, 288 p. (in Russian)
16. **Yager, R. and Filev, D.** *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1984, 387 p.
17. **Gladkikh, A.A.** (2017). *Permutation decoding as a tool to improve the energy efficiency of data exchange systems*. Telecommunication, no. 8, pp. 52–56. (in Russian)
18. **Gladkikh, A.A and al Tamimi, T. F. H.** (2017). *The system of fast matrix transformations in the procedure of the equivalent redundant codes formation*. Radio technology, no. 6, pp. 41–44. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy A. Gladkikh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, a_gladkikh@mail.ru.

Lyudmila G. Bolshedvorskaya, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, l.bolshedvorskaya@mstuca.aero.

Andrei K. Volkov, Postgraduate Student of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

Alexander K. Volkov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.06.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 04.06.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ А-СДМ С УЧЕТОМ ИНТЕРЕСОВ УЧАСТНИКОВ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ¹, В.Б. МАЛЫГИН²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-08-00010

В статье рассматривается процесс совместного управления в аэропортах А-СДМ в динамически изменяющихся условиях производственного процесса, под которым понимается возникновение нештатных ситуаций, способных изменить запланированные действия. В реальном производстве в этом случае появляется большое количество возможных решений по каждой нештатной ситуации, чем ниже уровень учета этих вариантов, тем больше их количество. В данной работе акцент сделан на внешние факторы, существенно влияющие на деятельность авиакомпаний и аэропортов и на соответствующие ответные действия со стороны управления, формализованные в виде пяти пунктов. Актуальность выбора продиктована наличием противоречивых интересов участников процесса. Объективное объяснение в пользу того или иного решения, основанное на минимизации общих потерь от возникновения нештатных ситуаций, позволит значительно укрепить позиции каждого участника процесса. Авторы ввели в математический аппарат ряд обозначений и допущений, перечень которых может дополняться. Сформированы динамические приоритеты для каждого участника процесса. Инструментом оптимизации совместного принятия решений является генетический алгоритм, позволяющий за меньшее число итераций в реальном масштабе времени получить субоптимальное, отвечающее требованиям участников процесса, решение. В качестве примера в статье рассматривается ситуация, которая может возникнуть в реальном процессе производственной деятельности. На основе мультипликативной формы назначается динамический приоритет для задержанных рейсов с учетом противоречивых интересов участников процесса, формируются частные критерии для ранжирования рейсов на каждом шаге перепланирования, применяется генетический алгоритм. В результате получено конкретное решение «нештатной» ситуации, спонтанно возникшей в результате воздействия внешних факторов. Без сомнения, данный математический аппарат имеет перспективы внедрения в производственный процесс, так как любая нештатная ситуация может быть встроена в алгоритм поиска решения с ее учетом.

Ключевые слова: совместное принятие решений (СДМ), безопасность полетов, генетический алгоритм, первоочередное обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенный анализ взаимодействия в рамках А-СДМ службы управления воздушным движением, аэропортовыми службами и авиакомпаниями убедительно показал наличие противоречий интересов и необходимости совместного управления. В обеспечении приемлемого уровня безопасности воздушного движения заинтересованы все участники процесса. Однако в динамической обстановке, под которой понимаются условия незапланированного ухудшения метеоусловий, временного падения спроса пассажиров на авиаперевозки и непредвиденных отказов техники, проявляются различия интересов [1, 2, 3, 4]. Границы рассматриваемой в статье задачи определяются исходя из ситуации, возникающей под воздействием внешних факторов, которые допускают использование только части ресурсов того или иного участника процесса А-СДМ. В частности, для авиакомпаний стоит задача поиска минимального, но достаточного количества и качества обеспечения расписания в сбойных ситуациях воздушными судами, снижения топливных затрат, затрат расходного материала. В интересах службы управления воздушным движением важно скорейшее погашение возмущения потока движе-

ния ВС [9], для аэропортов важны задачи эффективного использования ресурсов перрона и аэропортового комплекса [7].

Для поиска общего взвешенного решения требуется учет всех интересов (авиакомпаний, аэропорты, службы УВД), которые могут иметь разные измерения и масштабы. Возникает необходимость в нестандартных ситуациях решать задачу перепланирования скоординированных действий и использовать ряд мер, направленных на стабилизацию ситуаций. К их числу в данной работе относятся следующие действия.

1. Приоритетное осуществление вылета в случае тенденции к возникновению дефицита мест стоянок в конкретном аэропорту.

2. Первоочередной выпуск рейсов, имеющих большее время задержки.

3. Оперативное – в полете или до вылета изменение аэродрома назначения в случае невозможности посадки на нем по различным причинам (метеоусловия, технические и т. д.), когда время задержки вылета достигло критического значения. *Например, при закрытии а/д Внуково возможен прилет на а/д Домодедово. При этом пассажиров, имеющих «стыковочные» рейсы, доставят поездом-экспрессом на а/д Внуково, а ожидающих вылет с а/д Внуково аналогичным путем доставят на а/д Домодедово.*

4. Выбор типа ВС (средней вместимости или широкофюзеляжного) и варианта его заправки топливом «в один конец или туда и обратно» в зависимости от спроса пассажиров при вылете и обратном прилете.

5. Сезонное изменение расписания рейсов, в том числе в праздничные и выходные дни.

Подводя предварительный итог, нужно подчеркнуть, что в целом решаемая задача является многокритериальной [6], и каждая из пяти выбранных мер по-разному влияет на эффективность деятельности заинтересованных служб [1]. Для определения эффективности необходимо сформировать количественные оценки как для трех частных критериев, так и для общего критерия оптимального компромисса при принятии решения.

С учетом разнообразия этих действий и ряда негативных факторов введем ряд обозначений:

i – номер аэропорта ($i = 1 \dots N$);

i, g – номер аэропортов вылета и прилета соответственно;

n_i – общее число мест на летном поле i -го аэропорта;

x_i – число свободных мест в i -м аэропорту;

u_i – число базовых мест на летном поле для стоянки;

z_i – число ВС в воздухе, прибывающих в i -й аэропорт;

r – номер авиакомпании;

K – номер задержанного рейса ($K = 1, \dots, L$);

$l_{i,j}$ – число задержанных рейсов из аэропорта i в аэропорт j ;

$\Delta t_{i,j}$ – время задержки в вылете рейса i, j ;

$T_{i,j}$ – длительность выполнения рейса i, j ;

$S_{i,j}$ – число пассажиров в рейсе i, j ;

$S_{j,i}$ – число вылетающих пассажиров обратно;

$C_j = 0, 1$ – альтернатива летной погоды прилета в аэропорт j ;

Q_r – число ВС, принадлежащих авиакомпании r ;

M – общее число ВС во всех аэропортах;

$Q = 1, 2$ – тип воздушного судна ($q = 2$ – широкофюзеляжный);

$Ш_j$ – штрафная (или доходная) функция в зависимости от числа свободных мест на летном поле;

Δ_j – дополнительные расходы за счет проезда пассажирами части пути на поезде-экспрессе;

m_0 – число задержанных рейсов, вылет которых планируется на одном шаге решения задачи;

R – общее число шагов перепланирования задержанных вылетов в сутки;
 m_1, m_2, m_3 – масштабные коэффициенты в мультипликативной свертке частных критериев ранжирования, учитывающие разную значимость противоречивых интересов.

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

1. Задано число N взаимодействующих аэропортов, причем в текущей ситуации каждый i -й аэропорт характеризуется числом x_i свободных мест на летном поле, общим числом n_i всех мест арендуемых авиакомпаний, числом y_i «базовых» мест на летном поле и числом z_i ВС в воздухе, вылетевших в аэропорт, которое не должно превышать значения $(n_i - x_i)$. Все эти параметры определяют персональную значимость Π_1 первоочередного обслуживания.

2. Задано общее число r авиакомпаний. В данной работе $r = 1$.

3. Задано общее число M воздушных судов, в том числе и значение m_r судов, принадлежащих каждой авиакомпании, среди них при $q = 2$ широкофюзеляжные.

4. Задано общее число L невыполненных рейсов из-за задержки вылета во всех аэропортах, в частности число $l_{i,j}$ рейсов из аэропорта i в аэропорт j .

Каждый рейс i,j имеет свой номер K ($K = 1, \dots, L$) и характеризуется длительностью T_{ij} выполнения и сложившимися к текущему моменту времени Δt_{ij} задержкой обслуживания, а также числом S_{ij} пассажиров. Все эти параметры, влияющие на частный персональный приоритет Π_2 , можно представить в виде табл. 1, в том числе возможность отказа в посадке из-за метеословий.

Таблица 1
Table 1

Параметры определения персональной значимости первоочередного обслуживания
Options to specify the personal relevance of priority services

K	i	j	n_i	x_i	z_i	y_i	n_j	x_j	z_j	y_j	T_{ij}	S_{ij}	q	Δt_{ij}	C_j	S_{ji}
1	1	2	12	2	0	8	10	4	0	3	1	100	2	2	1	100
2	1	3	12	2	0	8	6	0	0	2	4	50	1	1.5	1	100
3	1	4	12	2	0	8	8	6	0	2	2	100	1	3	2	50
...
L	4	2	6	3	0	3	6	4	0	3	2	50	1	2	1	50

5. Существуют три соображения выбора оптимального плана использования авиационной техники для обеспечения рейсов, каждый из которых характеризуется 16-ю параметрами табл. 1:

- 1) в интересах двух аэропортов i и j ;
- 2) в интересах авиакомпании с учетом использования поезда-экспресса;
- 3) в интересах службы УВД, пассажиров, а точнее, с учетом штрафных функций при их неудачном обслуживании.

6. В качестве единого критерия I_0 общей эффективности планирования расписания в данной работе предложена следящая мультипликативная форма:

$$I_0 = \max \sum_{K=1}^L [\Pi_1(i) + m_1][\Pi_2(i, j) + m_2][\Pi_3(i, j, q) + m_3]. \quad (1)$$

Предложенный критерий обладает следующими преимуществами:

- произведение лучше суммы;
- любая физическая размерность сомножителей.

7. В качестве метода численной оптимизации решаемой многокритериальной задачи используется генетический алгоритм (ГА), состоящий из операций, которые являются предметом дальнейших исследований:

- операций скрещивания выбранных вариантов первоначальной «элиты»;
- операций мутации путем перестановки части рейсов местами по времени вылета.

Достоинством этого алгоритма является сокращенное число выбираемых вариантов при скрещивании и мутации по сравнению с полным перебором, хотя результат его работы является субоптимальным. Тем не менее количественная оценка частных критериев Π_1 , Π_2 , Π_3 обеспечивает возможность сравнения одних предложенных планов с другими.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИОРИТЕТОВ ДЛЯ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН

Рассмотрим вопрос назначения динамического приоритета $\Pi_i^{(i)}$ для каждого аэропорта с учетом двух обстоятельств [6]. Первым и главным из них является текущая ситуация, связанная с наличием свободных мест x_i , что хорошо для прилета, и занятых мест $(n_i - x_i)$. Чем меньше тех или других, тем хуже. Принимая как самую выгодную «седловую точку», равную $0,5n_i$, как для i -го аэропорта вылета, так и j -го аэропорта прилета, отсутствие факта близости состояния обоих аэропортов от «седловой точки» определяет приоритет пары i, j в улучшении этой ситуации, поскольку штрафные функции для каждого аэропорта имеют вид

$$\Pi_i = n_i - z_{x_i} - 1; \quad \Pi_j = 2x_j - n_j - 1, \quad (2)$$

а их сумма равна искомому значению

$$\Pi_i + \Pi_j = n_i - n_j + 2(x_j - x_i - 1). \quad (3)$$

В формуле (3) не учтен поток z_i прибытия к i -му аэродрому взлета, находящийся в воздухе, поэтому с учетом этого имеем сомножитель

$$\Pi_1 + \Pi_2 = n_i - n_j + 2(x_j - x_i + 0,5z_i - 1). \quad (4)$$

Второе обстоятельство должно учитывать число базовых мест для стоянки ВС на летных полях двух аэропортов, y_i и y_j , сдаваемых в аренду, чем их больше, тем лучше и приоритет выше.

Тогда по аналогии с критерием (1) получим свою мультипликативную форму Π_i для каждой пары i, j вылета и прилета при анализе любого рейса:

$$\Pi_i(i, j) = \max_{u_i(i, j)} [n_i - n_j + 2(x_j - x_i + 0,5z_i - 1 + m_1(1))] [y_i + m_2(1)], \quad (5)$$

где $m_1(1)$ и $m_2(1)$ – масштабные коэффициенты, учитывающие разную значимость частных сомножителей.

Можно отметить, что критерий $\Pi_i(i)$, конечно, учитывает интересы аэропортов, но косвенно и авиакомпании для рейса, обозначенного через i и j , и пассажиров этого рейса, правда в ущерб остальным пассажирам.

Рассмотрим теперь приоритет Π_2 каждого рейса K без учета аэропортов прилета и вылета на основе двух своих обстоятельств. Первым и главным обстоятельством является наличие времени Δt_k задержки выполнения рейса – чем оно больше, тем раньше нужно определить вылет. Также важны число пассажиров S_k и длительность полета T_k , что в целом приблизительно определяет цену $S_k \cdot T_k$ и ожидаемый доход. Поэтому получим произведение своих частных сомножителей

$$\Pi_2(K) = \max_{u_2=K} [\Delta t_K + m_1(2)] [S_K T_K + m_2(2)], \quad (6)$$

где $m_1(2)$ и $m_2(2)$ – масштабные множители, определяющие различную значимость для двух своих обстоятельств, учитывающих в первую очередь интересы службы УВД и пассажиров, а также авиакомпаний.

Третий случай назначения приоритета Π_3 состоит в поддержании расписания (в интересах всех заинтересованных), когда отсутствует возможность произвести посадку на аэродроме назначения крупного аэроузла. В этом случае авиакомпания терпит убытки из-за необходимости доставки пассажиров поездом-экспрессом.

Тогда первый сомножитель Π_{31} искомого приоритета в интересах авиакомпании можно представить следующим специфическим образом:

$$\Pi_{31}(j) = \max_{u_{31}=0,1} \left[1 - C_j \left(1 - u_3 \frac{\Pi_j - \Delta_j}{\Pi_i + \Pi_j} \right) \right], \quad (7)$$

где $C_j = 0, 1$ – признак исключения прилета в аэропорт j ($C_j = 1$) или его разрешение ($C_j = 0$); Π_j – штраф за отсутствие достаточного числа имеющихся судов в аэропорту j , вычисляемый по формуле (2); Π_i – штраф за отсутствие достаточного числа свободных мест в аэропорту i ; Δ_j – дополнительные затраты за железнодорожный (ж/д) проезд от места посадки до пункта j назначения; $u_3 = 0, 1$ – принятие решения об отказе ж/д проезда при $\Pi_j < \Delta_j$ или наоборот.

Эта формула дает простые ответы в следующих случаях:

- $C_j = 0$ – прилет разрешен;
- $\Pi_{31}(j) = 1$ – ни выгоды, ни убытков авиакомпания не несет;
- $C_j = 1$ – прилет в пункт j запрещен, но $\Pi_j < \Delta_j$, т. е. ситуация в аэропорту неплохая, тогда $u_3 = 0$, $\Pi_{31}(j) = 0$, т. е. никакого смысла вносить в список вылета рейса (i, j) не имеется;
- $C_j = 1$; $u_3 = 1$, если $\Pi_j > \Delta_j$, т. е. убытки авиакомпании при железнодорожном проезде явно меньше штрафов за ожидания пассажиров, тогда

$$\Pi_{31} = \frac{\Pi_j - \Delta_j}{\Pi_i + \Pi_j} > 0.$$

Таким образом, есть смысл пойти по пути нового варианта транспортировки пассажиров.

Наконец, последний довод в пользу авиакомпаний состоит в том, что если на рейс (i, j) есть достаточное число пассажиров туда и обратно, то имеет смысл по соображениям топливной эффективности произвести заправку топлива в оба конца один раз при вылете «туда». Поэтому другой сомножитель Π_{32} имеет вид

$$\Pi_{32} = \max(S_{ij} + S_{ji}).$$

В целом третий динамический приоритет P_3 можно определить по формуле

$$P_3(K) = \max_{u_3} \left[1 - C_j \left(1 - u_3 \frac{III_j - \Delta_j}{III_i + III_j} \right) + m_1(3) \right] [S_{ij} + S_{ji} + m_2(3)], \quad (8)$$

где $m_1(3)$, $m_2(3)$ – соответственно назначаемые коэффициенты значимости.

На основании формул (5), (6), (8) можно утверждать, что динамический приоритет Y_0 каждого рейса с учетом всех заинтересованных сторон оказывается зависящим от всех параметров, перечисленных в заголовочной строке табл. 1. Эти параметры в течение суток непрерывно меняются до тех пор, пока рейс не будет выполнен, и это справедливо для всех рейсов L , что указывает на высокую размерность задачи с многошаговым поиском оптимального решения по трем критериям. При вылете из одного аэропорта i это число должно быть соизмеримо с общим числом N аэропортов прилета, поэтому примем первое условие:

$$m_0 = N - 1. \quad (9)$$

Соответственно, число шагов решения в течение суток будет равно

$$R = \frac{L}{N - 1}. \quad (10)$$

Количество повторений при выборе числа m рейсов по трем критериям будет равно $3Q$. При их скрещивании с помощью генетического алгоритма получим $Q = 3^m$, а при мутации это число сочетаний $C_{m_0}^{2m} \approx 3^R$. В итоге оказывается, что генетический отбор на каждом шаге достигает 10^4 повторений расчетов при $R \approx 10$, что слишком трудоемко при вычислениях, даже для одного аэропорта.

Таковыми же трудностями обладает версия о скрещивании разных планов вылета между самими аэропортами, но если число $N > 10$, то обнаруживается тот же недостаток. Поэтому предпочтение того или иного способа генетического отбора при оптимизации требует дополнительного анализа.

Принимаем длительность шага общих расчетов 1 час, где участвует общее число m выбираемых рейсов [10].

Решение при возникшем обстоятельстве может быть таким.

1. Объединение нескольких рейсов, имеющих похожие характеристики.
2. Организация генетического отбора вариантов между соседними шагами расчета путем «переноса» ряда первоочередных рейсов на новом шаге в конец списка рейсов на предыдущем шаге, учитывая их принципиальную связь друг с другом, «разорванную» при искусственном разбиении решения на ряд независимых шагов.

Вопрос предпочтения того или иного способа генетического отбора при оптимизации требует дополнительного анализа.

В качестве примера рассмотрим условную картину задержанных рейсов между пятью аэропортами ($N = 5$), похожими на Москву (**М**), Санкт-Петербург (**СПб**), Париж (**П**), Екатеринбург (**Е**) и Симферополь (**С**), как показано на рис. 1.

Согласно условной версии рис. 1 всего в аэропортах расположено на стоянке 17 воздушных судов, равных $\sum_{i=1}^N m_i$, и два ВС находятся в воздухе ($z_1 = 2$), вылетов из **Е** и **С**, т. е. $M = 19$.

При этом одно ВС, используемое в рейсе $K = 2$ (показаны стрелками), находилось в неисправном состоянии, из-за чего вылет в **СПб** задержался на время $\Delta t_2 = 2$ часа.

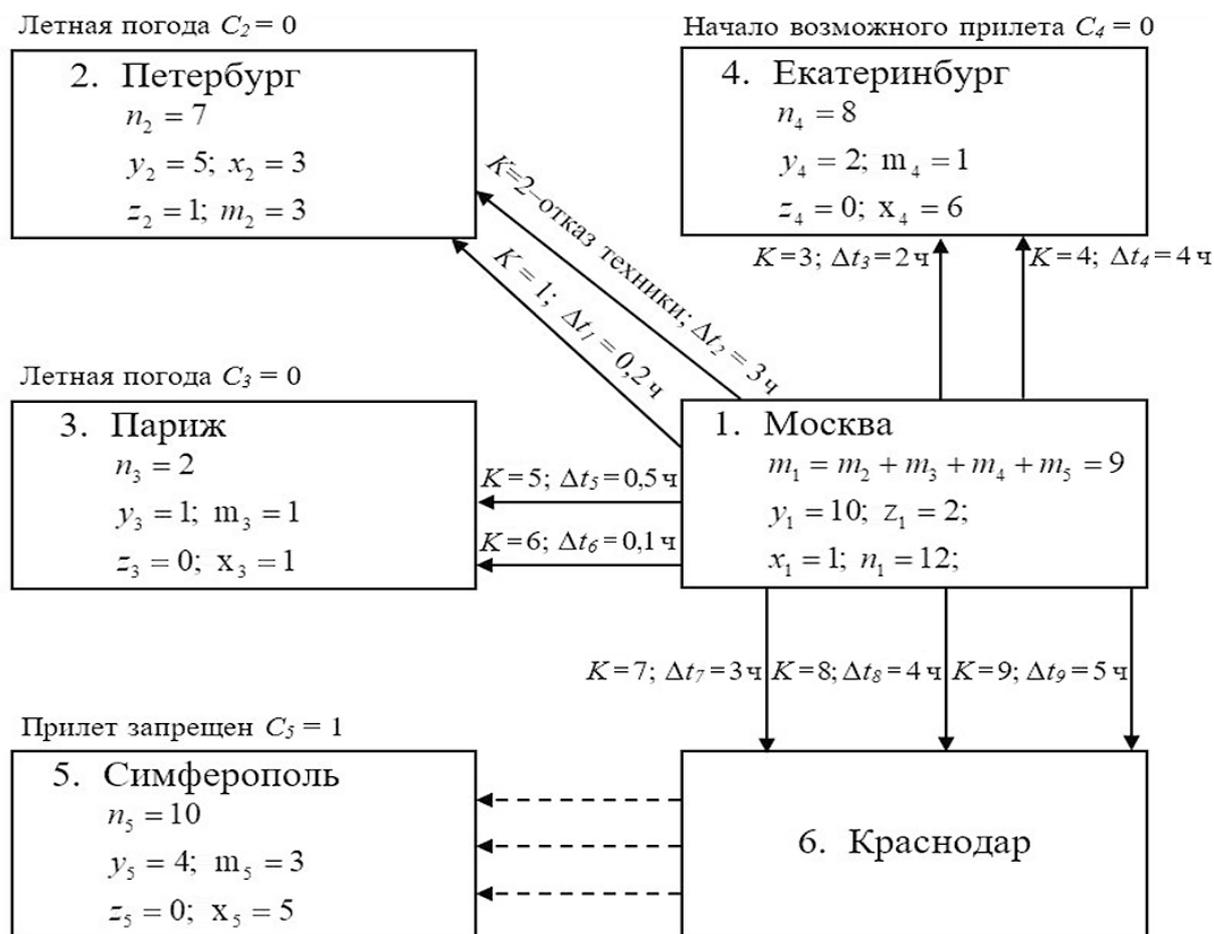


Рис. 1. Условная картина задержанных рейсов ($L = 9$) из M
Fig. 1. Conditional pattern of delayed flights ($L = 9$) from M

Ситуации при вылете из M в другие аэропорты выглядят следующим образом.

- Для полетов в **СПб** два средних и два широкофюзеляжных ВС, по-разному используемых в различные сезоны, при этом в штатном состоянии два судна стартуют из **СПб**, другие два – одновременно из M , и они обмениваются местами четыре раза в сутки. Однако, поскольку из-за отказа техники одно ВС ремонтируется в M , число свободных мест стоянок там уменьшилось, а приоритет рейса $K = 2$ из-за задержки повышается.
- Для полетов туристической компании в Π используется три ВС, причем в Π одно судно занимает одно место, а другое свободно ($n_3 = 2, m_3 = 1$), зато в M на перроне стоят два судна – широкофюзеляжное и среднее (одно – в резерве), поэтому по сравнению с Π число свободных мест в M на одно меньше, но в целом ситуация благоприятная ввиду летной погоды ($C_3 = 0$).
- Для полетов в E возможность прилета была исключена долгое время, поэтому происходило лишь убывание ВС с летного поля, а время задержки рейсов 3 и 4 из M достигало существенных значений ($\Delta t_3 = 2r, \Delta t_4 = 1r$), поэтому два ВС остались на летном поле M (не считая двух своих), а число свободных мест в E достигло критических значений ($x_4 = 6$).

- Наконец, наиболее сложная ситуация сложилась в C , из-за длительного отказа в приеме судов из остальных аэропортов ($C_5 = 1$). В частности, задержки вылета рейсов 7, 8, 9 достигли максимума ($\Delta t_7 = 3r$, $\Delta t_8 = 4r$, $\Delta t_9 = 5r$), и поэтому просматривается возможность выполнения этих рейсов в Краснодар, а затем – железной дорогой или автобусами. При этом улетевшие из C суда создают завышенное число $x_5 = 5$ свободных мест, а прилетевшие в Краснодар суда на это число никак не влияют.

Перечисленные условия должны быть учтены при назначении описанных выше динамических приоритетов P_1, P_2, P_3 на каждом шаге, перед этим в соответствии с приведенными соображениями определим число r шагов планирования, число рейсов m на одном шаге, имея следующие исходные данные:

$N = 5$; $L = 9$, тогда $m = 4$; $r = 2 \div 3$ шага.

Используя формулы (5)–(8) для вычисления значений P_1, P_2, P_3 , можно установить при специально выбранных масштабных коэффициентах m_1, m_2, m_3 , что номера первоочередных четырех рейсов (т. к. $m = 4$) для различных вариантов назначения приоритетов выглядят так:

- с учетом приоритетов P_1 и P_2 ($P_3 = 1$) получим код 3, 4, 2, 5;
- с учетом приоритетов P_1 и P_3 ($P_2 > 1$), $u_3 = 1$ – код 9, 8, 3, 2;
- с учетом приоритетов P_2 и P_3 ($P_1 > 1$) $u_3 = 1$ – код 3, 9, 4, 8;
- с учетом всех приоритетов – код 3, 2, 9, 4.

В итоге общий состав первоочередных рейсов, попавших во все планы, выглядит так и состоит из шести номеров: 2, 3, 4, 5, 8, 9.

Произведя различные сочетания этих номеров, число которых равно $C_4^6 = 15$ (число скрещиваний), и осуществив различные перетасовки каждого сочетания, число которых равно $4! = 24$, можно с помощью анализа $15 \cdot 24 = 360$ вариантов путем генетического отбора получить лучшие из них, используя для этого специальную функцию эффективного отбора «новой элиты» генетического алгоритма. Число этих вариантов невелико из-за малого числа N . На данный момент выполнение этой задачи в указанных допущениях соответствует коду 3, 2, 9, 4.

Можно перечислить дальнейшие действия перепланирования вылетов для данной задачи.

1. Полученный план выполнения задержанных рейсов совмещается с готовым планом предстоящих вылетов, исключая их совпадения по времени друг с другом. Этот технологический процесс, не представляющий научного интереса, в работе не рассматривается.

2. Далее аналогичным образом составляются планы вылета первоочередных задержанных рейсов для остальных $(N-1)$ аэропортов на том же шаге перепланирования – для **СПб, П, Е** и **С**.

3. Затем происходит переоценка нового текущего состояния всех аэропортов и оставшейся части задержанных рейсов для перепланирования на новом шаге. Это означает, что практически все параметры в табл. 1 пересчитываются, включая число строк (L уменьшается), а также число свободных и занятых мест в аэропортах с учетом летевших на посадку ВС и растущего времени задержки в обслуживании пассажиров для рейсов, не попавших в план на предыдущем шаге.

4. Производится перепланирование вылета других задержанных рейсов на новом шаге для всех аэропортов.

5. Осуществляется очередное совмещение нового плана с графиком еще не выполненных пока вылетов.

6. Дополнительно выполняется «состыковка» полученных двух планов на равных шагах перед их воссоединением путем другого генетического отбора ряда вариантов, полученных следующим образом. С целью повышения эффективности совместного использования результатов на соседних шагах предлагается перенести один или два первых номера рейса из списка на новом шаге в конец списка, полученного на предыдущем шаге, а номера рейсов в конце списка на предыдущем шаге отправить в список на новом шаге (т. е. поменять один или два рейса местами). Число

таких переносов будет невелико. Например, при четырех вариантах плана на каждом шаге и переносе как одного, так и двух рейсов получим $2 \cdot 4^2 = 32$ варианта состыковки.

7. Вычислительные операции на следующих шагах повторяют предыдущие действия до тех пор, пока оставшиеся задержанные рейсы не исчезнут $L \rightarrow 0$.

Необходимо заметить, что для генетического отбора вариантов как внутри каждого шага планирования, так и для совмещения между соседними шагами необходим еще один «объективный» критерий Y_1 эффективности любого плана в отличие от критерия Y_0 , предназначенного только для ранжирования рейсов [5]. Этот критерий должен стать интегральной оценкой для всех шагов в течение суток, учитывающей как доходы, так затраты и штрафные функции за некачественное обслуживание пассажиров и техники в воздухе и на земле в аэропортах. Этот критерий предстоит еще сформировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена мультипликативная форма назначения динамического приоритета для каждого задержанного рейса, которая оказалась лучше аддитивной формы вследствие одновременного учета противоречивых интересов участников производственного процесса.

2. В виде формул сформированы частные критерии для ранжирования рейсов на одном шаге перепланирования графиков вылета с учетом заинтересованных сторон.

3. Предложен механизм многошагового субоптимального отбора вариантов перепланирования с помощью генетического алгоритма.

4. Для выполнения главной операции генетического отбора при формировании «новой элиты» лучших вариантов необходимо дополнительно сформировать интегральный критерий эффективности с учетом доходов, затрат и штрафных функций за снижение качества обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо; под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. С. 351–415.

2. **Никулин А.О.** Система совместного принятия решений как эффективный инструмент организации работы аэропорта в условиях пиковых нагрузок // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55

3. **Никулин А.О., Попов А.А.** Внедрение процедур А-СДМ в аэропорту Шереметьево // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.

4. **Нечаев Е.Е., Никулин А.О.** Анализ работы системы «СИНХРОН» аэропорта Шереметьево в сложных метеорологических условиях // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42

5. **Жильцов И.Е., Митрофанов А.К., Рудельсон Л.Е.** Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95

6. **Луговая А.В., Коновалов А.Е.** Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87

7. **Соболь Е.М., Статников Р.Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.

8. **Рудельсон Л.Е.** Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Ч. 1. Системное программное обеспечение. Кн. 2. Операционные системы реального времени: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2008. 96 с.

9. Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л. Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многоагентной системы // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2008. № 7. С. 85–88.

10. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов // Труды ГосНИИ АС. Сер. Вопросы авионики. 2018. № 2. С. 39–53.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kaf301@mail.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, mbv898@ya.ru.

FORMATION OF PRIVATE PERFORMANCE CRITERIA A-CDM TAKING INTO ACCOUNT THE INTERESTS OF THE PARTICIPANTS IN THE DECISION-MAKING PROCESS IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Georgy N. Lebedev¹, Vyacheslav B. Malygin²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

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

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-08-00010

ABSTRACT

The article describes the process of collaborative management at airports A-CDM in dynamically changing conditions of the productive process, defined as the occurrence of emergency situations capable of altering the planned actions. In real operation, in this case, a large number of possible solutions for each emergency situation appears, the lower the level of recording for these options, the more their number. This paper focuses on external factors that significantly affect the activities of airlines and airports and to the relevant management retaliation formalized in the form of five points. The relevance of the choice is dictated by the presence of conflicting interests of stakeholders. Objective explanation in favor of a decision based on the minimization of the total losses from the outbreak of emergencies would significantly strengthen the position of each participant in the process. The authors have introduced a number of mathematical notations and assumptions, a list of which can be supplemented. Dynamic priorities for each participant in the process are formulated. The tool for optimization of joint decision-making is the genetic algorithm, which allows for a smaller number of iterations in the real time to get suboptimal decision that meets the requirements of the participants in the process. As an example, the article describes a situation that may occur in a real-world production. Based on the multiplicative form a dynamic priority for delayed flights is assigned, taking into account the conflicting interests of the participants in the process, private ranking criteria for flights during each step of the rescheduling are formed, a genetic algorithm is applied. As a result, a specific decision of the emergency situation, arising spontaneously from the impact of external factors is obtained. This mathematical apparatus has prospects of introduction into the productive process as any emergency can be built into the solving algorithm and taken into account.

Key words: collaborative decision making (CDM), flight safety, genetic algorithm, priority services.

REFERENCES

1. Borsoyev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozдушным движением*.

Metody i algoritmy [Decision making in air traffic management tasks. Methods and algorithms], in Nechaev Ye.Ye. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, pp. 351–415. (in Russian)

2. **Nikulin, A.O.** (2018). *The system of collaborative decision making as an effective tool for the organization of the airport operation in peak loads*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 5, pp. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55. (in Russian)

3. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Implementation procedures A-CDM at the airport Sheremetyevo*. Nauchnyi Vestnic MGTU GA [Civil Aviation High Technologies], no. 221, pp. 68–80. (in Russian)

4. **Nechaev, E.E. and Nikulin, A.O.** (2018). *The Analytical treatment of the system "SYNCHRON" at Sheremetyevo airport in adverse weather conditions*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 6, pp. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42. (in Russian)

5. **Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E.** (2018). *Air space capacity assessment regarding the problem of the collaborative management of air traffic flows*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95. (in Russian)

6. **Lugovaya, A.V. and Kononov, A.E.** (2017). *Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87. (in Russian)

7. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian)

8. **Rudelson L.E.** (2008). *Programmnoe obespechenie avtomatizirovannykh system upravleniya vozдушnym dvizheniem. Chast I. Sistemnoe programmnoe obespechenie. Kniga 2, Operatsyonnye sistemy realnogo vremeni. Matematicheskie modeli* [Software for automated air traffic control systems. Part I. System software. B2. Real-time operating systems. Mathematical models]. Uchebnoe posobie [Training manual]. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)

9. **Zaitsev, A.V. and Talimanchuk, L.L.** (2008). *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogoagentnoy sistemy* [Intellectual decision-making system for the evaluation of scientific activity based on a multi-agent system]. Journal Neurocomputers, no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

10. **Gabeydulin, R.Kh.** (2018). *The Dynamic Air Traffic Flow Management by Assigning Ground Flight Delays*. Trudy GosNII AS.[Proceedings of State Scientific Research Institute of Aviation Systems] Seriya: Voprosy avioniki [Series: Avionics Issues], no. 2, pp. 39–53. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Georgy N. Lebedev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Automatic and Intellectual Management Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), kaf301@mail.ru.

Vyacheslav B. Malygin, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

Поступила в редакцию 01.07.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 01.07.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 656.025.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-55-65

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЕВЕРА РОССИИ

Н.А. ФИЛИППОВА¹, В.М. ВЛАСОВ¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

Для развития экономики страны определяется перспективным развитие исследований в области использования разработанных теоретико-методологических положений и научных методов, имеющих универсальный характер, для решения важных вопросов доставки грузов потребителям всеми видами транспорта и повышения надежности перевозок за счет снижения рисков в условиях Севера России, что соответствует принятой правительством России научно-практической программе «Арктика». Использование современных средств мобильной связи, спутниковой навигации, геоинформатики, вычислительной техники является необходимым условием совершенствования управления производственно-хозяйственной деятельностью транспортных компаний, участвующих в доставке грузов для районов Севера России. В настоящее время управление процессом перевозок грузов в северные районы РФ находится на низком технологическом уровне, не используются современные технические средства и математические методы для оптимизации процесса, слабо изучено влияние особенностей климатических условий на процесс перевозки грузов северного завоза. На основе факторного анализа с использованием системного подхода и метода статистического моделирования определены меры по снижению рисков при организации и управлении перевозками грузов первой необходимости, возникающие в транспортно-технологическом процессе мультимодальных перевозок грузов для севера России с учетом требований ГОСТ Р 51901.1-2002. Это позволило повысить надежность процессов доставки грузов северного завоза на 10–15 %. Разработанная методика расчета верхней доверительной границы времени окончания и начала ледовых явлений при планировании перевозок грузов северного завоза позволила сократить время перевозки на 10–15 %, по оценкам специалистов предприятий ООО «Судоходная компания "Витим-Лес"» города Киренска.

Ключевые слова: мультимодальные транспортные системы, север России, навигация, геоинформатика, транспортно-технологическая система.

ВВЕДЕНИЕ

Доставка грузов конечному потребителю в районы севера России является сложной жизненнообеспечивающей задачей для населения этих районов, решаемой в большинстве случаев на основе мультимодального перевозочного процесса, конечный этап которого обеспечивается автомобильным транспортом. Особенностью перевозочного процесса является разнообразие грузов первой необходимости, которые требуется доставить конечному потребителю, но основными являются топливо и продукты питания. Сложность доставки определяется чрезвычайно суровым, экстремальным климатом севера РФ. На рис. 1 показаны возможные схемы перевозок различных грузов северного завоза.

Проведенное исследование существующей мультимодальной транспортной системы доставки грузов первой необходимости северного завоза позволило определить, что северным районам присущи следующие особенности: обширная территория, удаленная от экономически развитых районов страны; слабое развитие или полное отсутствие железнодорожного, авиационного и трубопроводного транспорта; слабо прогнозируемое по времени состояние участков транспортной сети, зависимое от природно-климатических условий; обязательный предварительный завоз грузов на накопительные склады железнодорожным транспортом; доставка грузов конечному потребителю автомобильным транспортом; использование перевалочных баз, где задействованы несколько видов транспорта; использование постоянных и временных путей

доставки грузов; доставка грузов первой необходимости речным транспортом в условиях жестких ограничений по срокам навигации и неопределенности начала и окончания ледовых явлений на судоходных участках рек [1].

Совокупность решаемых в работе задач является крупным научным достижением, имеющим важное социальное и хозяйственное значения для Российской Федерации¹.



Рис. 1. Основные схемы доставки грузов северного завоза конечному потребителю
Fig. 1. The main schemes of Northern goods delivery to the final consumer

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СЕВЕРА РОССИИ

Повышение эффективности и надежности функционирования транспортно-технологической мультимодальной системы северного завоза на основе оценки и управления значимыми рисками необходимо начинать с исследования и определения основных особенностей организации транспортного обслуживания; работы и взаимодействия всех видов транспорта, задействованных в доставке грузов первой необходимости для севера России [2].

¹ ГОСТ Р 54620-2011. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования. М., 2011.

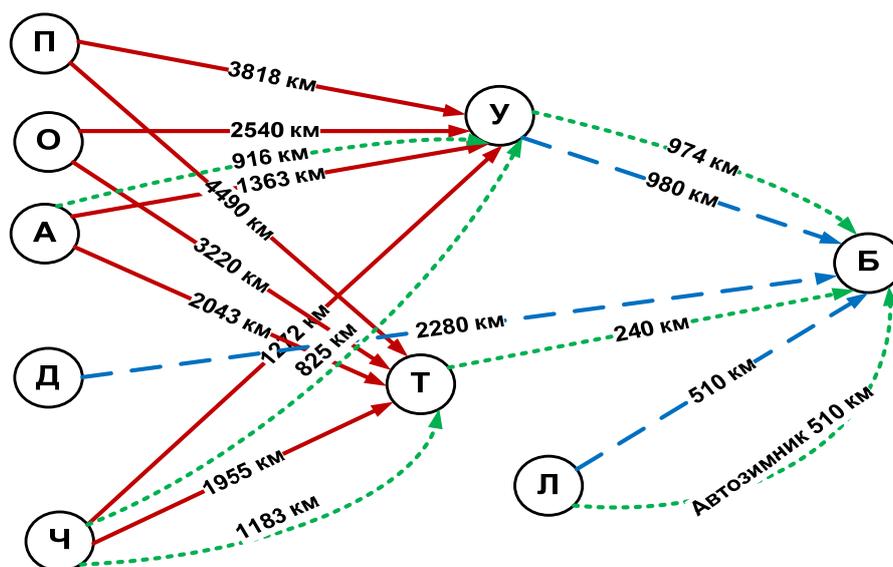


Рис. 2. Схема мультимодальной транспортной сети северного завода

(П – Пермь; О – Омск; А – Ангарск; Ч – Черемхово; Д – Джебарики-Хая; Л – Ленск; У – Усть-Кут; Т – Таксимо; Б – Бодайбо, __ – железнодорожный транспорт; __ – водный транспорт; – автомобильный транспорт)

Fig. 2. Northern delivery multimodal transport network scheme

(where: П – Perm; О – Omsk; А – Angarsk; Ч – Chermukhovo; Д – Djebariki-Haia; Л – Lensk; У – Usti-Kut; Т – Taksimo; Б – Bodaibo, __ – railway transport; __ – water transport; – automobile transport)

Проведенное исследование существующей мультимодальной транспортной системы (рис. 2) при перевозке грузов северного завода в северные районы Иркутской области позволило определить представленные в табл. 1 основные меры, принятие которых позволит уменьшить влияние выявленных факторов на возникновение неблагоприятных событий для планирования оптимального маршрута в мультимодально-транспортной системе [3].

Выявленные риски значимы для системы северного завода. На основании проведенного анализа и предложенных мероприятий сделан вывод, что такие мероприятия помогут снизить возможные риски как за счет снижения вероятности возникновения выявленных неблагоприятных событий, так и за счет снижения последствий в случае их возникновения.

Перевозки грузов северного завода автомобильным транспортом осуществляются как по постоянным, так и по временным автомобильным дорогам (автозимникам). Прогнозирование сроков начала и окончания перевозок грузов по автозимникам является отдельной научной задачей [4].

На сроки начала и окончания работы автозимников оказывают влияние природно-климатические явления, в результате действия которых продолжительность использования автозимников может колебаться в пределах 120–210 суток [5].

Для решения обозначенной проблемы разработан прикладной программный продукт на языке C++ для прогноза сроков начала и окончания ледовых явлений на основании обработки статических данных. В основу расчета сроков начала и окончания работы автозимников положена модель учета сезонных колебаний температуры воздуха (рис. 4), построенная на основании тригонометрической модели. Для прогнозирования сроков начала и окончания перевозок грузов по автозимникам разработана методика расчета доверительных границ этих сроков. Алгоритм расчета времени задействования автомобильного транспорта по результатам прогноза начала ледовых явлений на северных реках России показан на рис. 3.

Таблица 1
Table 1

Меры по снижению рисков при организации и управлении перевозками грузов первой необходимости
Measures to reduce risks in the organization and management of the transport of essential goods

Основные выявленные факторы	Меры по снижению рисков от влияния факторов
I группа. Внешние факторы	
1.1. Сложные природно-климатические условия	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка и использование методов прогноза возникновения сложных природно-климатических условий. 2. Использование ресурсов региональных отделений МЧС при возникновении чрезвычайных событий в процессе перевозки. 3. Использование государственных резервов в случае ЧС по причине климатических условий. 4. Использование резервных мощностей складских площадей для временного хранения грузов при невозможности завершения перевозки
1.2. Незрелость транспортной инфраструктуры	<ol style="list-style-type: none"> 1. Развитие транспортной инфраструктуры. 2. Восстановление разрушенных элементов транспортной инфраструктуры с привлечением ресурсов МЧС. 3. Использование альтернативных видов транспорта, в том числе ледоколов, грузовых судов ледового класса и автомобильных транспортных средств повышенной и высокой проходимости
1.3. Социальные	<ol style="list-style-type: none"> 1. Оповещение о ЧС. 2. Своевременное оказание различных видов помощи населению при возникновении ЧС по причине срыва северного завоза
II группа. Внутренние факторы	
2.1. Время перевозки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Использование подвижного состава с техническими характеристиками, соответствующими условиям перевозки. 2. Оперативное планирование процесса перевозки, включая проведение сопутствующих мероприятий. 3. Использование ресурсов МЧС при возникновении экстремальных ситуаций. 4. Формирование резерва финансовых средств для использования альтернативных видов транспорта в случае срыва запланированного процесса перевозки
2.2. Техническое состояние транспортных средств в процессе перевозки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контроль технического состояния транспортных средств. 2. Соблюдение регламента технического обслуживания транспортных средств, разработанного с учетом специфики региона. 3. Использование дополнительного оборудования, позволяющего оперативно устранять неполадки транспортных средств. 4. Проведение инструктажа водителей по особенностям маршрута перевозки грузов
2.3. Недостаточная квалификация специалистов организаций, обеспечивающих северный завоз	<ol style="list-style-type: none"> 1. Квалификационный отбор персонала. 2. Обучение персонала. 3. Повышение квалификации. 4. Ежедневный инструктаж + мониторинг интерактивной обстановки. 5. Подготовка должностных инструкций для персонала, участвующего в организации и осуществлении северного завоза

Также разработана программа и проведен расчет верхних и нижних границ сроков окончания и начала навигации. На рис. 4 показана форма представления исходных данных в программе на примере реки Витим [6].

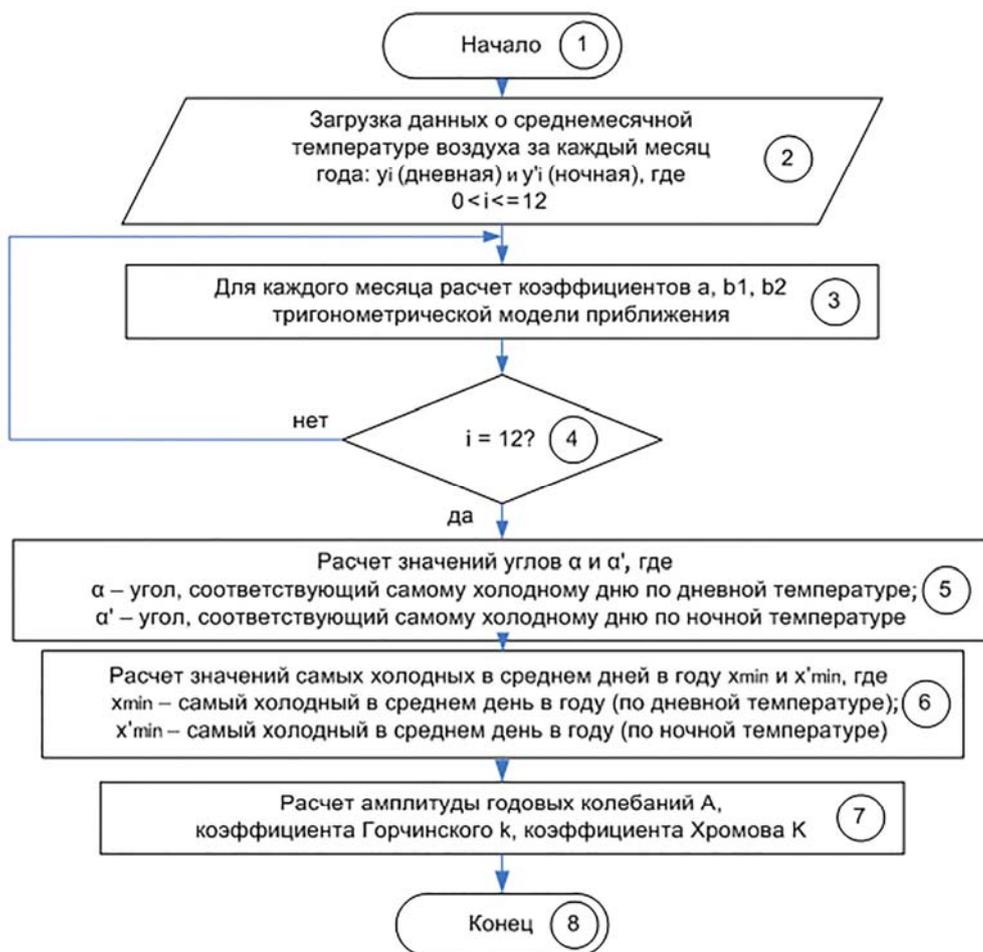


Рис. 3. Алгоритм расчета времени задействования автомобильного транспорта по результатам прогноза начала ледовых явлений на северных реках России

Fig. 3. The motor transport involvement calculation time algorithm according to the beginning of the ice phenomena on the Northern rivers of Russia forecast results

Номер	Дата начала	Дата окончания
40		21.05.1914
41	24.10.1915	21.05.1915
42	14.10.1916	23.05.1916
43	23.10.1917	17.05.1917
44	16.10.1918	26.05.1918
45	17.10.1919	01.06.1919
46	19.10.1920	11.05.1920
47		01.06.1921
48	14.10.1922	29.05.1922
49	16.10.1923	23.05.1923

17	Май	17	7
18	Май	18	7
19	Май	19	3
20	Май	20	10
21	Май	21	6
22	Май	22	6
23	Май	23	8
24	Май	24	8
25	Май	25	5
26	Май	26	8
27	Май	27	2
28	Май	28	3
29	Май	29	3
30	Май	30	1
31	Май	31	1
01	Июнь	32	2
02	Июнь	33	1

Интервалы (начало)
(13,5; 14,5) (14,5; 15,5) (15,5; 16,5) (16,5; 17,5) (17,5; 19,5) (19,5; 21,5)

Интервалы (конец)
(15,5; 17,5) (17,5; 19,5) (19,5; 20,5) (20,5; 22,5) (22,5; 23,5) (23,5; 24,5)

Мат. ожидание (начало/конец)
19,0103092783505 / 21,265306122449

Ср. кв. отклонение (начало/конец)
4,93774614756054 / 5,16769995892493

Значение критерия Пирсона (начало/конец)
15,9926952509545 / 3,44907902992177

Предполагаемая дата начала навигации
2 июня

Предполагаемая дата окончания навигации
8 октября

Рис. 4. Форма представления исходных данных о ледовых явлениях на р. Витим

Fig. 4. The form of initial ice phenomena presentation on the Vitim River



Рис. 5. Сезонные колебания температуры воздуха на основании тригонометрической модели
Fig. 5. Seasonal air temperature fluctuations data based on the trigonometric model

На рис. 6 представлен алгоритм работы программы прогнозирования сроков начала и окончания работы автозимников, построенной на основе учета сезонных колебаний температуры воздуха по статистическим данным, собранным более чем за 100 лет. Эти данные получены автором в ФГБУ «Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», г. Обнинск и затем обработаны².

Разработанные программы начала и окончания ледовых явлений на северных реках и прогноза начала и окончания работы автозимников могут использоваться на всех предприятиях, работающих в аналогичных условиях севера РФ. На разработанные программы получены авторские свидетельства [12].

Разработанное программное обеспечение автоматизированной навигационной системы диспетчерского контроля и учета работы грузового автомобильного транспорта для Севера России служит не только совершенствованию и повышению эффективности и надежности перевозок грузов, но является одним из важных факторов, обеспечивающих выживание людей в суровых условиях [8].

На рис. 7 приведена схема обмена информацией участников транспортных процессов перевозок грузов северного завоза.

² Комплексное решение. Доставка Just-in-time под контролем [Электронный ресурс] // OMNICOMM. URL: <https://www.omnicomm.ru/case/db-schenker/> (дата обращения 17.07.2019).

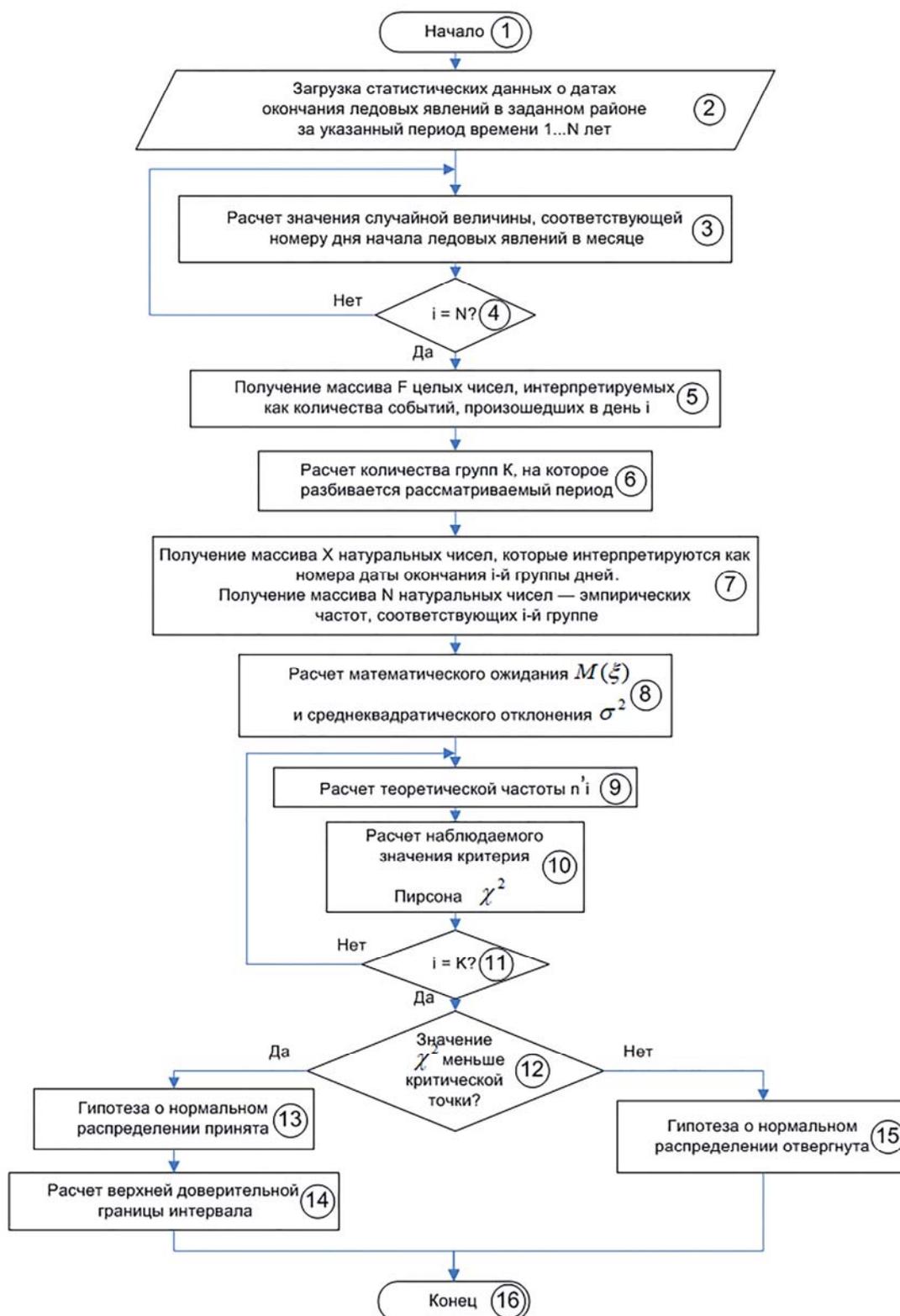


Рис. 6. Алгоритм работы программы прогнозирования сроков начала и окончания работы автозимников
Fig. 6. The program work forecasting the starting and final dates of auto-winter works algorithm

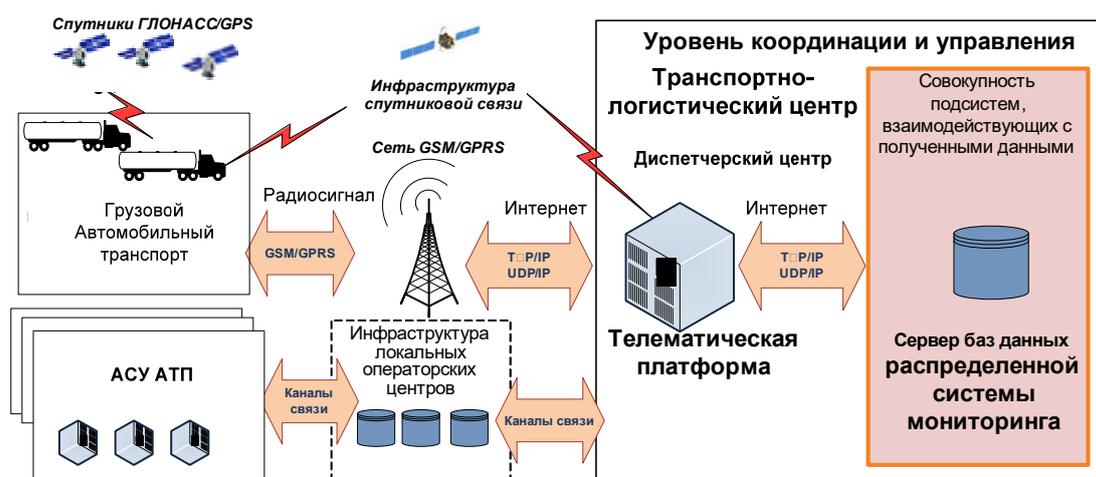


Рис. 7. Схема информационного обмена навигационной системы учета и контроля работы автомобильных транспортных средств

Fig. 7. The scheme of informational exchange for navigation system of motor vehicles record and control

Разработанный алгоритм представляет собой формальную основу для создания специализированного программного обеспечения автоматизированных диспетчерских систем контроля перевозок грузов АТ [9, 10].

Количество участников мультимодальной транспортной системы северного завоза может достигать нескольких тысяч, включая водителей транспортных средств, грузоотправителей, грузополучателей, портовые службы, железнодорожные станции и т. д. Разработка предложенной навигационной системы учета и контроля работы автомобильных транспортных средств предполагает, что все участники будут иметь возможность в любой момент подключаться к системе за счет абонентских терминалов. Навигационно-связной блок (глобальное навигационное устройство и спутниковый телефон) будет размещаться в кабине транспортного средства и с заданной периодичностью передавать навигационные данные, а при необходимости и голосовую связь). Оперативная информация непрерывно будет поступать на сервер системы от контролируемых транспортных средств.

Разработанная универсальная архитектура в сочетании с простыми алгоритмами работы и высокая пропускная способность телематического сервера позволяет подключать к системе до нескольких тысяч абонентских терминалов, для надежности данные дублируются на резервный сервер [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования на основе факторного анализа с использованием системного подхода и метода статистического моделирования определены меры по снижению рисков при организации перевозок и управлении перевозками грузов первой необходимости в транспортно-технологическом процессе мультимодальных перевозок грузов для севера России с учетом требований ГОСТ Р 51901.1-2002. Это позволило повысить надежность процессов доставки грузов северного завоза на 10–15 %.

Разработанная методика расчета верхней доверительной границы времени окончания и начала ледовых явлений при планировании перевозок грузов северного завоза позволила сократить время перевозки на 10–15 %, по оценкам специалистов предприятий ООО «Судоходная компания "Витим-Лес"» города Киренска.

Использование результатов программы прогнозирования сроков начала и окончания работы автозимников позволяет спланировать сроки своевременного переключения процессов перевозок с постоянных дорог на автозимники и обратно. Разработанный алгоритм работы программы был внедрен на автопредприятиях в ЗАО «ЗДК "ЛЕНЗОЛОТО"» города Бодайбо, ООО «Усинское АТП» города Усинска и др. По оценкам специалистов предприятий, на которых использовались предлагаемые программные продукты, это позволило увеличить объем перевозок грузов по автозимникам на 10–20 %. Правильное определение сроков допустимой эксплуатации автозимников позволит снизить транспортные риски, повысить надежность поставок жизненно важных продовольственных товаров [13], а также обеспечит эффективное использование всей полифункциональной транспортной системы северных регионов России [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Филиппова Н.А.** Методология организации и функционирования систем доставки грузов в северные регионы: Монография / Под. ред. Беляева В.М. М.: Техполиграфцентр, 2015. 208 с.
2. **Коноплянко В.И., Кочерга В.Г., Зырянов В.В.** Использование навигационных спутниковых систем при управлении дорожным движением // «Современные проблемы дорожно-транспортного комплекса»: сборник трудов международной научно-технической конференции. Ростов-на-Дону, 1998. 108 с.
3. **Ларин О.Н.** Методология организации и функционирования транспортных систем регионов: монография / Под ред. Л.Б. Миротина. Челябинск: ЮУрГУ, 2007. 205 с.
4. **Свириденко С.С.** Совершенствованные информационные технологии. М.: Радио и Связь, 1989. 132 с.
5. **Filippova N.A.** The analytical test of methodological approaches to the increasing the level of automation of the basic functions of the car dispatching of the cargo delivery to Northern regions of the Russian Federation / V.M. Belyaev, M.V. Shilimov, P.P. Koshkarev, I.V. Odinkova // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2017. Vol. 12, no. 21. Pp. 11532–11535.
6. **Efimenko D.B., Karelina M. Y.** Technology of monitoring and control algorithm design for earth-moving machine / O.I. Maksimychev, A.V. Ostroukh, P.Yu. Zbavitel, A.M. Ivakhnenko, M.Y. Karelina // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11, no. 9. Pp. 6430–6434.
7. **Vogumil V., Efimenko D.** Urban transport dispatch control system helps to increase intelligent transport systems effectiveness // 11th European transport congress, Prague, September 19–20. 2013. Pp. 20–25.
8. **Баскин А.С., Москвин Г.И.** Береговые системы управления движением судов. М.: Транспорт, 1986. 160 с.
9. **Vogumil V. N., Kudryavcev A. A., Duque-Sarango María José** Analysis of the possibility of using telematics tools for the collection and processing of data on the dynamics of passenger traffic in the Bus Rapid Transit system (for example, Quito, Ecuador) // The Revista Facultad de Ingeniería (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), 49–55 pp.
10. **Vogumil V., Vlasov V.** Intelligent transportation systems for road users and public transport. Saarbrücken: LAP Lamdert Academic Publishing, 2015. 153 p.
11. **Полешкина И.О.** Оценка эффективности продовольственного обеспечения районов Крайнего Севера России // Экономика региона. 2018. Т. 14, №3. С. 820–835.
12. **Полешкина И.О.** Полифункциональность транспортной системы северных регионов // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 2 (81). С.104–116.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филиппова Надежда Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильных перевозок Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), umen@bk.ru.

Власов Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспортной телематики Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), tr-madi@inbox.ru.

METHODOLOGY OF THE NORTH OF RUSSIA TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MULTIMODAL SYSTEM EFFICIENCY AND RELIABILITY IMPROVEMENT

Nadezhda A. Filippova¹, Vladimir M. Vlasov¹

¹*Moscow Automobile and Road State Technical University, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Research in the field of the developed theoretical and methodological provisions and scientific methods application which have a universal character in the cargo delivery by all means of transport and improving the reliability of transportation by reducing risks in the North of Russia is being carried out. This research corresponds to the "Arctic" program which was adopted by the government of Russia. The application of the modern means of mobile communication, satellite navigation, Geo-informatics, information technology is an important condition for the improvement of economic activities production management of transport companies involved in the delivery of goods to the Northern regions of Russia. Currently, process management of the cargo transportation to the Northern regions of the Russian Federation is at a low technological level, modern technical means and mathematical methods for optimizing the process are not used, the influence of climatic conditions on the process of Northern delivery goods transportation is poorly studied. On the basis of factor analysis with the use of systematic approach and the method of statistical modeling, measures for reducing risks in the essential goods transportation organization and management which appear in multimodal goods transportation and technological process to the North of Russia according to the requirements of GOST R 51901.1-2002 are determined. This made it possible to increase the reliability of the Northern delivery processes by 10–15 percent. According to the experts of the LLC "Shipping company "Vitim-Les" of Kirensk the developed method of calculating the upper beginning and ending ice phenomena confidence time limit while planning the transportation of goods of Northern delivery allowed to reduce the transportation time by 10–15%.

Key words: multimodal transport systems, the North of Russia, navigation, Geo-informatics, transport and technological system.

1. Filippova, N.A. (2015). *Metodologiya organizatsii i funktsionirovaniya sistem dostavki gruzov v severnyye regiony: Monografiya* [Northern regions cargo delivery systems organization and functioning Methodology. Monograph], in Belyaev V.M. (Ed.). Moscow: publishing House Techpol-igraftsentr, 208 p. (in Russian)

2. Konoplyanko, V.I., Kocherga, V.G. and Zyryanov, V.V. (1998). *Ispolzovaniye navigatsionnykh sputnikovykh sistem pri upravlenii dorozhnym dvizheniyem* [Use of navigation satellite systems for traffic control]. Proceedings of international scientific and technical conference. "Modern problems of road-transport complex". Rostov on Don, p.108. (in Russian)

3. Larin, O.N. (2007). *Metodologiya organizatsii i funktsionirovaniya transportnykh sistem regionov: Monografiya* [Regional transport systems organization and functioning. Monograph], in Mirotin L.B. (Ed.). Chelyabinsk: SUSU, 205 p. (in Russian)

4. Sviridenko, S.S. (1989). *Sovershenstvovannyye informatsionnyye tekhnologii* [Updated information technologies]. Moscow: Radio i svyaz, 132 p. (in Russian)

5. **Filippova, N.A., Belyaev, V.M., Shilimov, M.V., Koshkarev, P.P. and Odinkova I.V.** (2017). *The analytical test of methodological approaches to the increasing the level of automation of the basic functions of the car dispatching of the cargo delivery to Northern regions of the Russian Federation*. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER), vol. 12, no. 21, pp. 11532-11535.
6. **Efimenko, D.B., Maksimych, O.I., Ostroukh, A.V., Zbavitel, P.Yu., Ivakhnenko, A.M. and Karelina, M.Y.** (2016). *Technology of monitoring and control algorithm design for earth-moving machine*. International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, no. 9, pp. 6430–6434.
7. **Bogumil, V. and Efimenko, D.** (2013). *Urban transport dispatch control system helps to increase intelligent transport systems effectiveness*. 11th European transport congress, Prague, September 19–20, pp. 20–25.
8. **Baskin, A.S. and Moskvina, G.I.** (1986). *Beregovyye sistemy upravleniya dvizheniyem sudov* [Coastal ship traffic control systems]. Moscow: Transport, 160 p. (in Russian)
9. **Bogumil V. N., Kudryavcev A. A. and Duque-Sarango María José** Analysis of the possibility of using telematics tools for the collection and processing of data on the dynamics of passenger traffic in the Bus Rapid Transit system (for example, Quito, Ecuador // The Revista Facultad de Ingeniería (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), 49–55 pp.
10. **Bogumil, V. and Vlasov, V.** (2015). *Intelligent transportation systems for road users and public transport*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 153 p.
11. **Poleshkina, I.O.** (2018). *Food supply efficiency assessment of the Russia Far North Regions*. Economy of Region, vol. 14, no. 3, pp. 820–835. (in Russian)
12. **Poleshkina, I.O.** (2019). *Polyfunctionality of the Transport System of Northern Regions*. World of Transport and Transportation, vol. 17, no. 2 (81), pp. 104–116. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Filippova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Road Transport Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. E-mail: umen@bk.ru.

Vladimir M. Vlasov, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Head of Transport Telematics Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. E-mail: ttr_madi@inbox.ru.

Поступила в редакцию 23.07.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 23.07.2019
Accepted for publication 14.11.2019

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
05.07.05 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;
05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов;
05.07.10 – Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности

УДК 629.735.45

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-66-74

**MULTI-ROTOR HELICOPTER TYPE PLATFORM
CAPACITIES RESEARCH**

V.I. BUZULUK¹, K.G. KOSUSHKIN¹, V.I. MAVRITSKIY¹

¹Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

The development of multi-rotor helicopter concepts, driven by the active introduction of brushless electric motors, leads to the necessity of assessing the multi-rotor scheme main advantages implementing possibility and determining the rational areas of its application. The article analyzes the concept of a multi-rotor platform with a distributed power plant. Parametric study of characteristics depending on the number of rotors for a line of multi-propeller aircraft with take-off weight from 0.5 to 120 tons was carried out. Evaluation of weight and dimensional characteristics of blades, main rotor heads, gear boxes, as well as power wires of electric motors and structure beams connecting the elements of the distributed power plant is obtained. Evaluation of drag and thrust losses on blowing, as well as power requirements for typical flight modes was carried out. Estimation of the required number of rotors for the implementation of the gearless condition and flight safety with one engine failed are obtained. Rational areas of multi-rotor scheme application are defined.

Key words: multi-rotor helicopter, bearing system, distributed power plant, electric engines, drag power.

INTRODUCTION

In order to increase the weight of the cargo, economically lifted by vertical take-off and landing helicopters, it is necessary to increase the rotor disk area. Because of the difficulties connected with the construction of propellers with a very big diameter, the increase of rotor disk area can be reached by constructing multi-rotor bearing systems.

Initially, this possibility was pointed out by N.E. Zhukovsky in his work "About the payload lifted by helicopters" in 1904 [1].

The development of multi-rotor helicopter concept is currently conditioned by the active application of brushless electric engines, with a high specific capacity (up to 5 kW / kg), and lithium-ion batteries. Currently unmanned aircraft with electric or hybrid power plant as well as brushless electric engines with specific capacity up to 0.5 MW are in mass production, which allows us to create aircraft for general aviation and also aircraft for individual use [2]. The advantages of brushless electric engines are realized through reducing the amount of noise and harmful emissions as well as through increasing the reliability and simplification of the design by means of eliminating gearboxes, transmissions, as well as swash plates, due to the separate rotation control of brushless electric engine frequency and main rotor speed.

The use of a distributed power plant architecture which consists of several (usually six or more) electric motors and controllers connected by means of a common tire with backup batteries allows to

avoid the problems of sudden engine failure due to the power reserved in the power plant. Engine failure may lead to speed reduction or vice versa, to a climb, but still the absolute control of the aircraft in the operating range is maintained. Improvements in this area are expected to lead to the further reduction in plane crashes.

But the increase in the number of rotors leads to the increase in the dimensions of the units which mount the rotors. The length of the wiring which links the source of electrical energy (battery or electric generators) with the electric engine also changes in case the energy source is located in the fuselage. It is necessary to find a compromise which will be shaped by the particular aircraft performance capabilities layout.

Thus, there is a need to assess the main advantages of implementation possibility and the rational areas of application for a multi-rotor circuit with an electric or hybrid distributed power plant.

METHODS AND METHODOLOGY OF RESEARCH

The research methodology is based on a complex approach to helicopter design, having taken into account the main features of the multi-rotor carrier system. One of the main advantages of the multi-rotor scheme is the increase in load capacity, by means of reducing the total weight of the airscrews and their assemblies, since several airscrews have less weight than one airscrew of the same total area. So, while maintaining the total area of the screws

$$S_{\Sigma} = n \cdot S_B$$

and increasing their number n the radius of the screws r will be determined through the radius of the original screw unit R , as

$$r = \frac{R}{\sqrt{n}}.$$

The load on the rotor disk area is related to the take-off weight by the following dependence [3]:

$$p = 2,05 \cdot m_0^{0,314},$$

where p is the load on the rotor disk area, kg / m^2 , and m_0 is the take-off weight, kg . Thus, having a number of p values, it is possible to determine the corresponding value of m_0 and the area of the propellers S_B .

Taking the number of propellers into account we can calculate the mass of blades, barrels and gearboxes using the engineering methods outlined in [3, 4]. In order to estimate the mass of the structure we analyzed a beam structural-and-power scheme, in which the beams connecting the modules with the main rotor and brushless electric engine work only on bending (figure 1). We examined tubular section beams which are made of fiberglass prepreg adhesive grade KMKS-2M.120. T64 [5] with the wall thickness of 2,5 mm.

One of the characteristic features of helicopter loading is a maneuvering flight which means the helicopter recovery from the planning [6]. In this case, it is considered that the maximum operational overload is $n_{\max}^3 = 3$; safety coefficient is $f = 1,5$; the number of revolutions of a single main rotor is $n = 1,2(n)_{\text{nom}}$; speed is $V = 1,15 V_{\max}$; thrust of the main rotor is $T = n_{\max}^3 G$; longitudinal force is

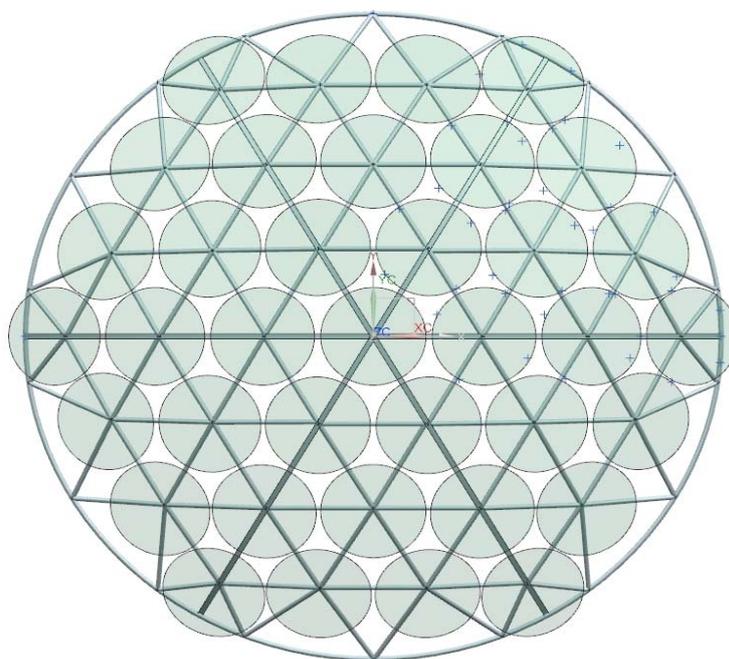


Fig. 1. The multi-rotor bearing system

$H^3 = 0,15T^3$ and lateral force is $S^3 = 0,075T^3$. Accordingly, the estimated thrust of each screw was defined as $T_i^p = f \cdot n_{\max}^3 \cdot G/n$.

The main power factor which the frame perceives is the bending moment of $M_{bending}$. Thus, there is tension in the beam:

$$\sigma = \frac{M_{bending}}{W}$$

The geometric moment of bending resistance is [7]:

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot D^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$$

where D and d are- outer and inner diameter of the tubular section. So, having known the wall thickness:

$$\delta = D - d,$$

and having the material of the structure, you can calculate the diameter and weight of the beam.

The mass of the beam structure which connects the elements of the distributed power plant (brushless electric engine with main rotor) will be defined by the rigidity requirements in order to eliminate self-oscillations of the rotor on an elastic foundation of the "earth resonance" type. Therefore, when calculating the beam structure, the mass obtained for the case of static loading was multiplied by the weighting coefficient $K_y = 2$.

In order to determine the mass of the motor power wires, based on the structural-and-constructional scheme, we can determine their total length with the different number of main rotors, as well as the thrust and power available for each rotor. It was supposed that the source of electrical energy is located in the fuselage of the aircraft. Besides, it is necessary to determine the required wiring section, which depends on the current amperage and is determined according to electrical standards from the wiring thermal mode operating conditions [8].

For alternating current (AC) lighter wires are required; as the voltage increases, the specific gravity of the wires decreases.

The designed maximum current can be defined as:

$$I_{\max} = \frac{N}{U \times \eta},$$

where N is – the maximum available capacity, η is – the efficiency of the electric engine performance, U_{\max} is – the maximum operating voltage. Correspondingly, according to the known characteristics of the electric cables, the cable with the necessary sectional area is selected; the weight of the linear meter cable with polyvinyl chloride and rubber insulation is determined according to the reference table¹.

One of the possible advantages of the multi-rotor scheme is the improvement of flight safety in case of engine failure. In order to assess the feasibility of this advantage, it is necessary to estimate the drag power required for different flight modes, depending on the number of rotors.

The typical flight modes of helicopters are [4]: flying at maximum speed at an altitude of $H = 500 \text{ m}$; hovering on a static ceiling; continued take-off when one engine failed and the other one is operating at extreme power; flying on a dynamic ceiling. Each mode has its own parameters of altitude, airspeed, drag power for the main rotor drive and power loss. Thus, the capacity of the helicopter power plant is determined by the maximum value of the flight modes drag power.

Taking into account the interference of rotors in a multi-rotor carrying system the algorithms for calculating drag power, are thoroughly described in works [9, 10].

RESULTS OF THE RESEARCH

Performance predictions of flight characteristics dependency on the number of rotors (from 1 to 120) were made for the family of multi-rotor aircraft with take-off mass from 0.5 t to 120 t and the load on rotor disk area from 15 to 80 kg/m². Assessments of weight characteristics for blades and air-screw bosses, gear boxes and electric engines actuators as well as construction beams connecting elements of distributed power plant are given in Figure 2.

When the number of rotors increases, the mass of the construction components connecting the modules of the distributed power plant (main rotor + brushless electric engine) also grows.

The total weight of the beam construction including the weight of rotors, gearboxes and wiring begins to decrease when the number of rotors only for heavy and super heavy aircraft increases at p over 60 kg/m² (G_0 over 60 t). At the same time, it should be pointed out that currently the construction of a large diameter propeller and a gearbox for it is a difficult task and presently the largest propeller and gearbox are created for the Mi-26 helicopter with $G_0 = 56 \text{ t}$ [11].

Thus, for a number of aircraft under consideration with a G_0 of more than 60 t, the construction of a single-rotor arrangement at a given level of technical perfection is problematic, and therefore it is advisable to use several lifting airscrews.

It should also be noted that for small values of $p = 15...30 \text{ kg/m}^2$ with the increased number of screws the wiring makes a significant contribution to the total weight.

¹ The hand book of power-engineering constructor. Kiev, 1973. 248 p.

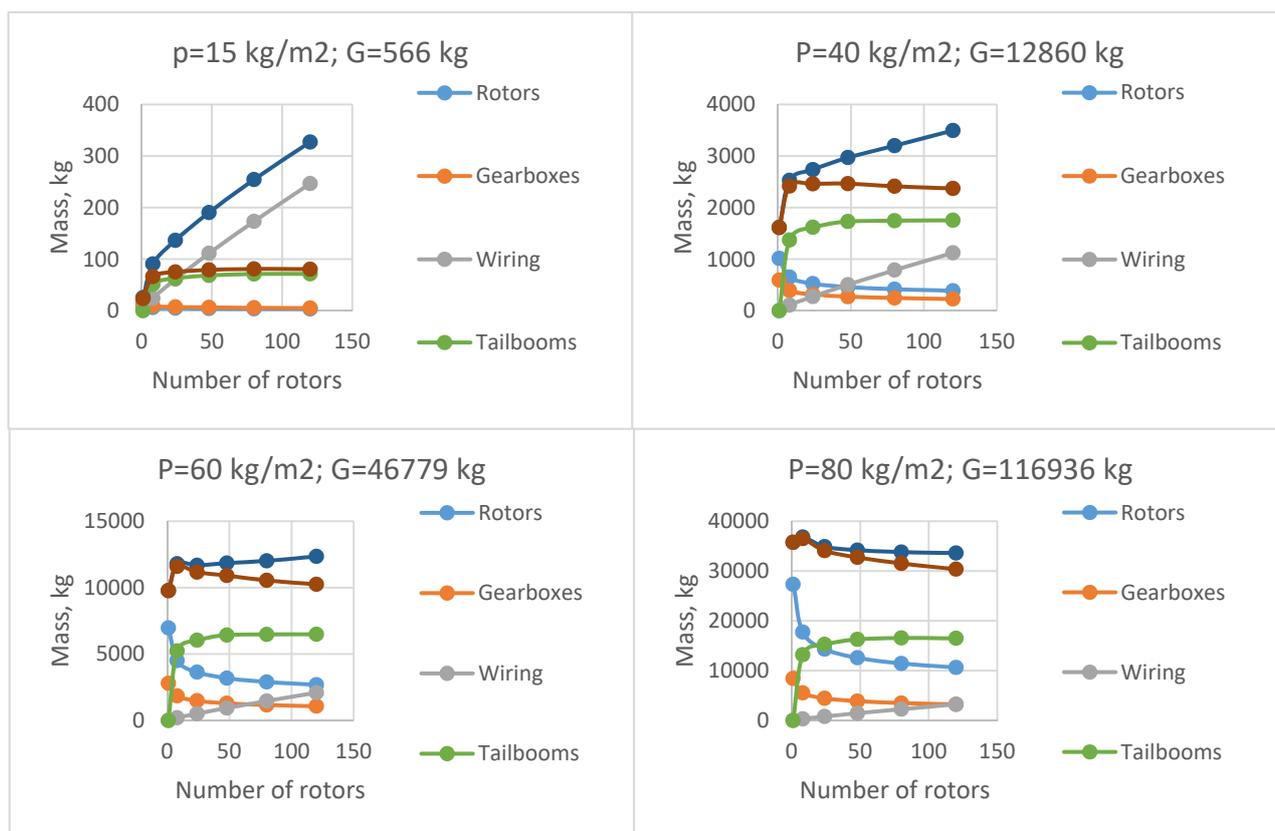


Fig. 2. Main units mass dependency on the number of rotors and take-off mass

One of the advantages of the brushless electric engine operation is the possibility to increase the reliability and the power plant service life by means of simplifying the design of construction and eliminating a number of complex mechanical devices (gearbox, transmission, etc.). In order to exclude the gear box from the scheme of the power plant, we need such type of conformity of the main rotor diameter to the brushless electric engine revolutions that the speed at the ends of the blades did not exceed the critical number of M .

As it is shown by the analysis of modern electric engines characteristics [12, 13], the starting number of their rotational speed is mainly 2000 revolutions per minute (rpm). Hence, it can be figured out that the required radius of the main rotor should not exceed 1.2–1.5 m.

Table 1 shows the requirements for the quantity of screws which are necessary for the gearless helicopters with different take-off weight, as well as the possible gain in weight after the refusal of gearboxes.

Table 1

Gear renunciation capability assessment

Rotor disk area loading kg/m ²	Take-off weight kg	The number of screws needed for gear renunciation	Gear box mass
15	566	8...10	10
20	1414	12...15	20
30	5144	30...40	100
40	12860	60	250...270
60	46799	More than 120	1000
80	116936	–	Up to 5500

We can see that in order to renunciate of gearboxes with the increased take-off weight we either need to increase the number of main rotors in case we use ordinary electric engines with speed from 2000 rpm or start using low-speed superconductive electric engines.

Drag power for typical flight modes with different number of propellers are shown in Figure 3.

The Figures show that along with the increase in the number of screws we can see a moderate increase in the drag power necessary for the flight at maximum speed and on the dynamic ceiling, which is due to the increase of drag and to the increase in the number of beams connecting the distributed power plant modules. It should also be noted that with the increase in the number of screws, the drag power needed for hovering on a static ceiling also increases. It happens because of the increase in thrust losses for blowing the increased number of beams.

At the same time, the drag power for the continued take-off mode decreases and its dependence on the number of propellers takes a flat form when the number of propellers n_{prop} is over 14–16. As it can be seen, when the number of propellers is more than 4, the drag power is determined by the hovering power and has the drag power continued takeoff margin, which admits the failure of more than one engine under the condition of a fully electric distributed power plant or distributed power plant with modules consisting of the main rotor and gas turbine engines, which is more typical for super-heavy multi-propeller helicopter projects. Thus, the flight safety significantly increases, which is especially important when using a multi-rotor scheme with an electric power plant for the aircraft family with a take-off weight of up to 1.5 tons, since the helicopters of this class are usually equipped with only one engine.

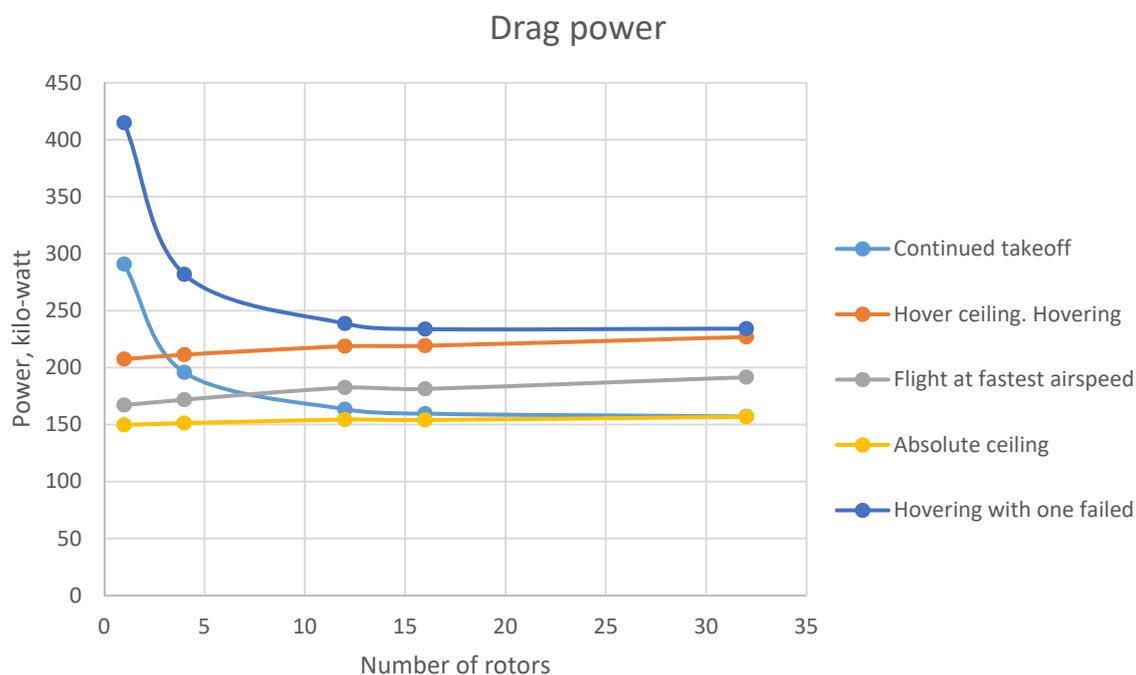


Fig. 3. The drag power at rotor disk loading $p = 40 \text{ kg/m}^2$

The drag power for the one engine failed hovering mode of flight was also determined and presented in the Figures. The pictures demonstrate that with the increase in the number of rotors over 14–16, the drag power for hovering with one engine failed exceeds the drag power for hovering with all engines running by only 3.5%, which can be very actual for helicopters designed for crane installation work.

CONCLUSION

The analysis of the multi-rotor scheme performance main advantages which was made according to the adopted methodology revealed the following results:

– the increase in the load capacity by reducing the total weight of the main rotors and their assemblies is possible when the take-off weight is more than 60 tons and the rotor disk area is more than 60 kg/m^2 , which is appropriate for super-heavy helicopters;

– with the increase in the number of propellers for more than 4, the drag power is determined by the hovering mode and has the drag power continued takeoff margin, which admits the failure of more than one engine under the condition of a fully electric distributed power plant or distributed power plant with modules consisting of the main rotor and gas turbine engines. Thus, the flight safety significantly increases, which is especially important when using a multi-rotor scheme with an electric power plant for the aircraft family with a take-off weight up to 1.5 tons, since the helicopters of this class are usually equipped with only one engine.

– with the increase in the number of rotors over 14–16, the drag power for hovering with one engine failed exceeds the drag power for hovering with all engines running by not more than 3.5%, which can be very relevant for helicopters designed for crane installation work.

Thus, we can conclude that the efficient application areas of a multi-rotor scheme with a distributed power plant are: super-heavy great load capacity helicopters for crane installation work and light helicopters with the load capacity up to 1.5 tons.

REFERENCES

1. **Zhukovsky, N.E.** *O poleznom gruze, podnimaemom gelikopterom* [On the payload lifted by helicopter]. *Vozdukhoplavatel* [Balloonist], 1904, no. 2. (in Russian)
2. **Hepperle, M.** *Electric Flight – Potential and Limitations. Energy Efficient Technologies and Concepts of Operation*, Lisbon, Portugal, 22–24 October 2012.
3. **Kosushkin, K.G. and Mashkova, E.N.** *Razrabotka algoritmov i programy opredeleniya parametrov vertoleta, vpolniayushchego zadannyye trebovaniya po gruzopodemnosti i dalnosti perezovok* [Algorithms and program development for helicopter fulfilling the specific requirements for load capacity and range]. *Materialy XXII nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po aerodinamike* [Proceedings of the twelfth scientific and technical conference on aerodynamics]. 2011, p. 89. (in Russian)
4. **Tishchenko, M.N., Nekrasov, A.V. and Radin, A.S.** (1976). *Vertolety. Vubor parametrov pri proektirovanii* [Helicopters. Design parameters selection]. Moscow: *Mashinostroenie*, 366 p. (in Russian)
5. **Dementeva, L.A., Serezhnikov, A.A., Bocharova, L.I., Lukina, N.F., Kutsevich, K.E. and Petrova, A.P.** (2012). *Svoystva kompozitsionnykh materialov na osnove kleevykh prepregov* [Adhesive prepregs composite materials properties]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Glues. Sealants. Technologies], no. 6, pp. 19–24. (in Russian)
6. **Voskoboynik, M.S., Lagosyuk, G.S., Milenkiy, Yu.D., Mirtov, K.D., Chernenko, Zh.S., Osokin, D.P., Skripka, M.L. and Ushakov, V.S.** (1972). *Konstruksiya I prochnost samoletov I vertoletov* [Aircraft and helicopters constructional strength], in Mirtov K.D. and Chernenko Zh.S. (Ed.). Moscow: Transport, 440 p. (in Russian)
7. **Shalashilin, V.I., Gorshkov, A.G. and Troshin, V.N.** (2000). *Soprotivlenie materialov* [Materials resistance]. Moscow: Izdatelstvo MAI, 615 p. (in Russian)
8. **Kosushkin, K.G. and Mavritsky, V.I.** (2017). *Razrabotka kontseptsii mnogovintovoy platformy s raspredelennoy silovoy ustanovkoy* [The distributed power plant multiple platform concept]

development]. *Materialy XXVII nauchno-tekhnikeskoi konferentsii po aerodinamike* [Proceedings of the twelfth scientific and technical conference on aerodynamics], pp.149–150. (in Russian)

9. **Vildgrube, L.S.** (1977). *Vertolety. Raschet integralnykh aerodinamicheskikh kharakteristik i letno-tekhnikeskikh dannykh* [Helicopters. Integral aerodynamic characteristics and flight performance data calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 152 p. (in Russian)

10. **Yuryev, B.N.** (1961). *Vozdushnyye vinty. Vertolety: Izbrannyye Trudy* [Aircraft propellers. Helicopters. Selected Works]. Moscow: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, vol. 1, 553 p. (in Russian)

11. **Mikheyev, V.P.** (1998). MIL Moscow Helicopter Plant, 50 Years. Moscow: Lyubimaya Kniga, 272 p.

12. **Frank, A.** (2018). *Hybrid-electric propulsion systems for aircraft. Siemens AG eAircraft*. Electric & hybrid aerospace technology symposium, Cologne, November 8th, 2018.

13. **Anghel, C.** (2015) *Hybrid electric propulsion technologies 1mw high efficiency generator*. Technology Fellow, Oct 18, 2015.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin I. Buzuluk, Doctor of Technical Sciences, Head of Research Department Division № 10, Central Aerohydrodynamic Institute, vbuzuluk@yandex.ru.

Konstantin G. Kosushkin, Head of Research Department Sector № 10, Central Aerohydrodynamic Institute, kostinen@mail.ru.

Vladimir I. Mavritsky, Candidate of Technical Sciences, Research Department № 10 Chief Research Engineer, Central Aerohydrodynamic Institute, mavritsky@tsagi.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МНОГОВИНТОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

В.И. Бузулук¹, К.Г. Косушкин¹, В.И. Маврицкий¹
¹Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

Развитие концепций многовинтовых вертолетов, обусловленное активным внедрением бесколлекторных электрических двигателей, приводит к необходимости оценки возможности реализации основных достоинств многовинтовой схемы и определения рациональных областей ее применения. В работе проведен анализ концепции многовинтовой платформы с распределенной силовой установкой. Для линейки многовинтовых летательных аппаратов с взлетной массой от 0,5 до 120 т проведено параметрическое исследование характеристик в зависимости от числа несущих винтов. Получены оценки весовых и габаритных характеристик лопастей и втулок несущих винтов, редукторов, а также проводов питания электрических двигателей и балок конструкции, соединяющей элементы распределенной силовой установки. Проведены оценки лобового сопротивления и потерь тяги на обдувку, а также потребных мощностей для характерных режимов полета. Получены оценки потребного числа несущих винтов для реализации условия безредукторности и безопасности полета с одним отказавшим двигателем. Определены рациональные области применения многовинтовой схемы.

Ключевые слова: многовинтовой вертолет, несущая система, распределенная силовая установка, электрические двигатели, потребная и располагаемая мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жуковский Н.Е.** О полезном грузе, поднимаемом геликоптером // Воздухоплавание. 1904. № 2.

2. **Hepperle M.** Electric Flight – Potential and Limitations. Energy Efficient Technologies and Concepts of Operation, 22–24 October 2012, Lisbon, Portugal.

3. **Косушкин К.Г., Машкова Е.Н.** Разработка алгоритмов и программы определения параметров вертолета, выполняющего заданные требования по грузоподъемности и дальности перевозок // Материалы XXII научно-технической конференции по аэродинамике. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2011. С. 89.
4. **Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С.** Вертолеты. Выбор параметров при проектировании. М.: Машиностроение, 1976. 366 с.
5. **Дементьева Л.А.** Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов / А.А. Сережников, Л.И. Бочарова, Н.Ф.Лукина, К.Е. Куцевич, А.П. Петров // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С 19-24.
6. **Воскобойник М.С.** Конструкция и прочность самолетов и вертолетов / Г.С. Лагосюк, Ю.Д. Миленский, К.Д. Миртов, Ж.С. Черненко, Д.П. Осокин, М.Л. Скрипка, В.С.Ушаков / Под ред. проф. К.Д. Миртова, Ж.С. Черненко. М.: Транспорт, 1972. 440 с.
7. **Шалашилин В.И., Горшков А.Г., Трошин В.Н.,** Соппротивление материалов. М: Издательство МАИ, 2000. 615 с.
8. **Косушкин К.Г., Маврицкий В.И.,** Разработка концепции многовинтовой платформы с распределенной силовой установкой // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. 2017. С. 149–150.
9. **Вильдгрубе Л.С.** Вертолеты. Расчет интегральных аэродинамических характеристик и летно-технических данных. М.: «Машиностроение», 1977. 152 с.
10. **Юрьев Б.Н.** Воздушные винты. Вертолеты: избранные труды. М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. Т. I. 553 с.
11. **Михеев В.Р.** МВЗ им. М.Л. Миля 50 лет. М.: «Любимая книга», 1998. 272 с.
12. **Frank A.** Hybrid-electric propulsion systems for aircraft. Siemens AG eAircraft // Electric & hybrid aerospace technology symposium, Cologne, November 8th, 2018.
13. **Anghel, C.** Hybrid electric propulsion technologies 1mw high efficiency generator // Technology Fellow, Oct 18 2015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бузулук Валентин Иванович, доктор технических наук, начальник отдела научно-исследовательского отделения № 10 ФГУП ЦАГИ, vbuzuluk@yandex.ru.

Косушкин Константин Геннадьевич, начальник сектора научно-исследовательского отделения № 10 ФГУП ЦАГИ, kostinen@mail.ru.

Маврицкий Владимир Иванович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского отделения № 10 ФГУП ЦАГИ, mavritsky@tsagi.ru.

Поступила в редакцию 24.06.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 24.06.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 656

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Д.Д. ГАБРИЭЛЬЯН¹, П.И. КОСТЕНКО², О.А. САФАРЬЯН³

¹*Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

²*Ростовский филиал МГТУ ГА, г. Ростов-на-Дону, Россия*

³*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-01-00151

В статье рассмотрены вопросы стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах на основе использования метода статической стабилизации частоты. Приведены примеры таких систем и отмечена необходимость обеспечения высокой стабильности частоты формируемых абонентами сигналов для повышения эффективности функционирования указанных систем. Отмечены две основные особенности применения метода статистической стабилизации частоты. Первая определяется задержкой поступления сигнала в устройство оценивания частотно-временных параметров сигнала по отношению к интервалу измерения фазы сигнала. Вторая особенность связана с задержкой прихода сформированного управляющего сигнала коррекции частоты генератора. Показано, что отмеченные особенности приводят к несовпадению текущего отклонения частоты генератора и корректируемого значения, полученного с учетом задержки. Предложено описание информационных сигналов, позволяющих уточнить математическую модель процесса формирования оценки отклонения частоты информационного сигнала с учетом указанных факторов. Показано, что возможность использования статистического метода стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах определяется не только значениями номинальных частот и относительных нестабильностей генераторов, входящих в состав информационно-измерительной системы, но и автокорреляционной функцией случайного процесса, описывающего изменение частоты информационного сигнала. При малых временных задержках между оцениванием частоты информационного сигнала и стабилизацией частоты использование рассматриваемого метода позволяет уменьшить относительную нестабильность частоты информационного сигнала. При временных задержках больше интервала корреляции использование статистического метода не приводит к изменению относительной нестабильности частоты информационного сигнала. В пределах интервала корреляции использование статистического метода стабилизации частоты может приводить в зависимости от значений автокорреляционной функции как к уменьшению, так и увеличению относительной нестабильности частоты информационного сигнала.

Ключевые слова: распределенная информационно-измерительная система, информационный сигнал, стабильность частоты, интервал запаздывания, случайный процесс, корреляционная функция случайного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития фундаментальных и прикладных разделов науки, внедрения новых прорывных технологий во все сферы деятельности общества неразрывно связан с дальнейшим ростом требований к показателям функционирования распределенных инфокоммуникационных систем. В подтверждение широкого развития и использования таких систем можно выделить спутниковые системы связи, глобальные навигационные спутниковые системы, геодезические системы, пункты измерения в составе которых распределены по всей территории Земного шара, инфокоммуникационные системы, абоненты которых могут быть рассредоточены на обширной территории, радиотехнические системы наблюдения за дальним космосом и т. д. Устойчивое и эффективное функционирование таких систем и решение посредством их применения целевых задач связано с возможностью быстрой передачи, а во многих случаях в реальном масштабе времени, больших объемов цифровых потоков между абонентами.

Технической основой устойчивого обмена большим объемом данных является стабильность частотно-временных параметров формируемых информационных сигналов. Вопросы необходимости повышения стабильности указанных параметров и взаимосвязи стабильности частоты с вероятностно-временными характеристиками передачи информации рассмотрены в большом количестве работ, например [1–5]. К одному из современных методов стабилизации частотно-временных параметров информационных сигналов можно отнести метод статистической стабилизации частоты, основанный на одновременном измерении отклонений фаз данных сигналов от номинальных значений на некотором измерительном интервале и формировании оценок текущей частоты сигналов для последующего уменьшения указанных отклонений [6, 7]. В указанных работах также рассмотрены вопросы технической реализации устройства оценивания частотно-временных параметров сигналов и моделирования его функционирования.

Распределенные информационно-измерительные системы включают большое число устройств, формирующих сигналы, что потенциально определяет достижение высокой точности получаемых оценок текущего значения частоты всех генераторов и соответственно возможности их стабилизации [6, 7]. В то же время распределение таких устройств на большой территории приводит к появлению эффектов, связанных с запаздыванием получения оценки отклонения частоты по отношению к временному интервалу, на котором возникло данное отклонение частоты и последующего формирования сигнала управления частотно-временными параметрами сигнала [8, 9]. Такое запаздывание может в ряде случаев не только уменьшить компенсацию возникшего отклонения частоты, но и, наоборот, привести к ее увеличению. Однако указанные эффекты, которые могут проявляться именно в распределенных системах, в известных работах, посвященных методу статистической стабилизации частоты, не рассматривались.

С учетом отмеченных выше особенностей цель статьи заключается в анализе применения метода статистической стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах.

Представим структурную схему распределенной информационно-измерительной системы, как и в работе [6] (рис. 1). В соответствии с методом статистической стабилизации частоты информационные сигналы N абонентов, циркулирующие в распределенной информационно-измерительной системе, подаются на дополнительно введенное устройство оценивания частотно-временных параметров сигналов. Элементы τ_1, τ_2, τ_N описывают задержку, учитывающую как время прохождения сигнала от абонента до устройства оценивания частотно-временных параметров в распределенной информационно-измерительной системе, так и время последующего прохождения управляющего сигнала для корректировки частоты информационного сигнала от данного устройства до абонента.

Информационно-измерительный сигнал, формируемый n -м абонентом в распределенной информационно-измерительной системе (сигнал вида КАМ, ФМ), может быть представлен с использованием следующего соотношения:

$$u_n(t) = U_n^{(0)}(t) \cos(2\pi \cdot \Psi_n(t)), \quad (n = 1, \dots, N), \quad (1)$$

в котором $\Psi_n(t) = \int_0^T f_n(\tau) \cdot d\tau + \psi_{0,n}(t)$ – модулированная фаза радиосигнала, $U_n^{(0)}(t)$ – модулированная амплитуда радиосигнала; $f_n(\bullet)$ – несущая частота радиосигнала; $\psi_{0,n}(t)$ – модулированная фаза радиосигнала; T – длительность сигнала.



Рис. 1. Структурная схема распределенной информационно-измерительной системы
Fig. 1. The block-diagram of the distributed information-measuring system

Отклонение несущей частоты $f_n(t)$ сигнала устройства формирования и обработки от соответствующего номинального значения $f_{0,n}$ приводит к изменению амплитуды главного пика автокорреляционной функции (АКФ) $R_n(\Delta\tau, \Delta f_n)$, которая при полной синхронизации сигналов ($\Delta\tau = 0$) определяется выражением [2]

$$R_n(0, \Delta f_n) = \frac{\sin(\pi \cdot \Delta f_n \cdot T)}{\pi \cdot \Delta f_n \cdot T}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (2)$$

где $\Delta f_n = f_n - f_{0,n}$.

На рис. 2 на примере генератора, управляемого напряжением, ГК-77 УН приведена возможная временная зависимость номинальной $f_{0,n}$ и текущей $f_n(t)$ частоты сигнала устройства формирования и обработки n -го абонента.

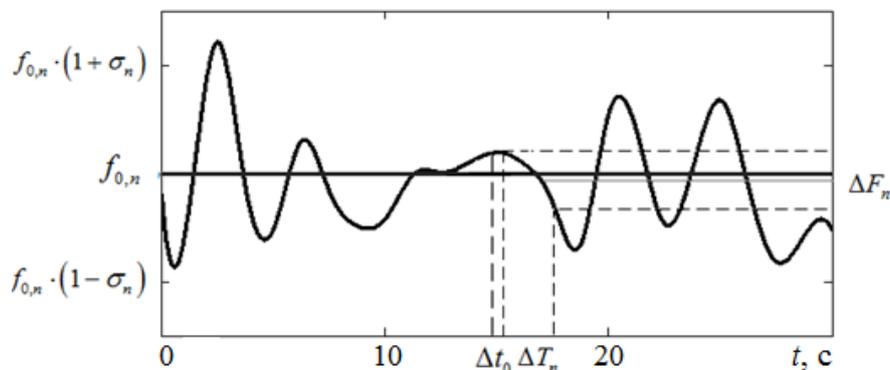


Рис. 2. Соотношения между текущими значениями частоты сигнала в различные моменты времени:

номинальная частота $f_{0,n} = 5 \cdot 10^7$ Гц, относительная нестабильность $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$

Fig. 2. Relations between the current values of the signal frequency at different time moments:

nominal value of frequency $f_{0,n} = 5 \cdot 10^7$ Hz, relative instability of frequency $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$

На рис. 2 также показаны временные интервалы: интервал измерений фазы сигналов номинальной длительностью Δt_0 , характерный интервал длительностью T_n , в течение которого частота сигнала n -го абонента на интервале измерений Δt_0 изменится на величину большую, чем ΔF_n , определяемую требованиями к стабильности частоты информационного сигнала данного абонента.

Проанализируем возможность использования статистического метода стабилизации частоты. Для измерительного интервала $\Delta t_m = [T_m - \Delta t_m/2, T_m + \Delta t_m/2]$, длительность которого задается в устройстве оценивания частотно-временных параметров сигналов и отличается от номинального значения Δt_0 , на основе результатов [6, 7] запишем оценки текущих значений частоты сигнала n -го абонента с помощью следующего соотношения:

$$\Delta \hat{f}_{n,m} = \Delta t_0^{-1} \left(\Delta \varphi_{n,m} - 2\pi f_{0,n} \left(\sum_{p=1}^N \sigma_p^{-2} \right)^{-1} \sum_{p=1}^N (\Delta \varphi_{p,m} - 2\pi f_{0,p} \Delta t_0) \sigma_p^{-2} f_{0,p}^{-1} \right), \quad (n=1, \dots, N), \quad (3)$$

где $\Delta \hat{f}_{n,m}$ – оценка отклонения частоты n -го информационного сигнала на m -м измерительном интервале, длительность которого Δt_m отличается от номинальной Δt_0 ; σ_n – относительная нестабильность устройства формирования и обработки n -го абонента; $\Delta \varphi_{n,m}$ – измеренное значение фазы n -го информационного сигнала на m -м измерительном интервале, показанное на рис. 3.

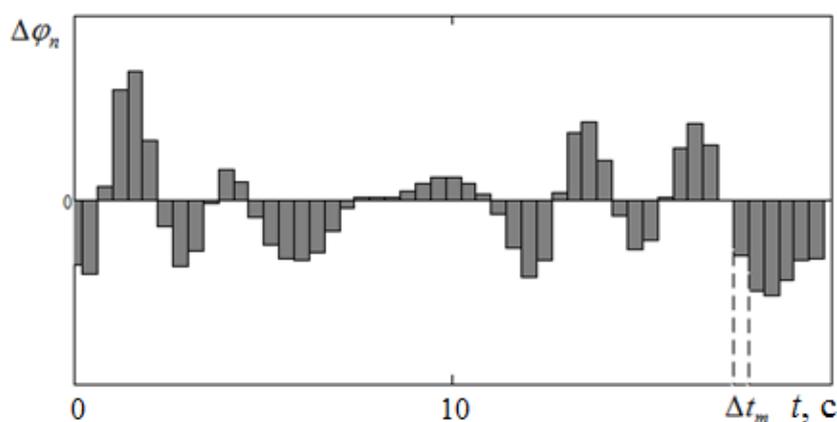


Рис. 3. Распределение измеряемых значений фаз информационного сигнала
Fig. 3. The distribution of the measured phase values of the information signal

Полученные значения оценок используются для формирования управляющего сигнала, пропорционального $\Delta \hat{f}_{n,m}$, для компенсации уходов частоты n -го информационного сигнала. Однако полученная для интервала Δt_m оценка отклонения частоты $\Delta \hat{f}_{n,m}$ не будет соответствовать текущему значению частоты $f_n(T_m + \tau_n)$ через время τ_n , и, соответственно, сформированный на основании $\Delta \hat{f}_{n,m}$ управляющий сигнал не обеспечит стабилизацию частоты через время τ_n .

Отклонение частоты от номинального значения в момент времени $T_m + \tau_n$ после компенсации может быть представлено следующим соотношением:

$$\delta f_n(T_m + \tau_n) = \Delta f_n(T_m + \tau_n) - \Delta \hat{f}_n(T_m), \quad (n=1, \dots, N). \quad (4)$$

Величина $\delta f_n(T_m + \tau_n)$ представляет собой дополнительно возникающее отклонение частоты в устройстве формирования и обработки сигнала n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе, обусловленное запаздыванием формирования управляющего сигнала для стабилизации частоты.

Проанализируем статистическое распределение отклонения частоты $\delta f_n(T_m + \tau_n)$. Математическое ожидание $M\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ равно нулю, что может быть доказано следующим образом [10]:

$$M\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = M\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} - M\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (5)$$

где учтены представленные в [6, 7] результаты $M\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} = 0$ и $M\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\} = 0$. Дисперсия $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ может быть представлена соотношением [10]

$$D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = D\{\Delta f_n(T_m + \tau_n)\} + D\{\Delta \hat{f}_n(T_m)\} - 2\rho\{\Delta f_n(T_m + \tau_n) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\}, \quad (n = 1, \dots, N), \quad (6)$$

в котором $\rho\{\bullet\}$ обозначает автокорреляционную функцию случайного процесса – временную зависимость отклонения частоты от номинального значения.

Величина $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ определяет дисперсию дополнительно возникающего отклонения частоты в устройстве формирования и обработки сигнала n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе, обусловленного запаздыванием формирования управляющего сигнала для стабилизации частоты. При $\tau_n = 0$ с учетом свойств автокорреляционной функции и результатов работ [6, 7] получаем

$$\rho\{\Delta f_n(T_m + \tau_n) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\} = \rho\{\Delta f_n(T_m) \cdot \Delta \hat{f}_n(T_m)\} = \sigma_n^2 \cdot (N-1)/N, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (7)$$

В этом случае $D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\} = \sigma_n^2 \cdot (N-1)/N$, что полностью согласуется с результатами, приведенными в [6, 7].

На рис. 4 на интервале корреляции T_n значений случайного процесса приведены зависимости $D_1(\tau_n) = D\{\delta f_n(T_m + \tau_n)\}$ от τ_n/T_n при различных значениях относительной нестабильности частоты n -го информационного сигнала. Используемые значения относительной нестабильности связаны с возможными изменениями температуры окружающей среды и напряжения питания на примере генератора ГК-77 УН. Длительность интервала измерений Δt_0 выбрана равной $0,01 \cdot \Delta T_n$. Как следует из приведенных зависимостей, существующая корреляция между отклонениями частоты в устройстве формирования и обработки сигнала от номинального значения в различные моменты времени обуславливает немонотонный характер изменения величины дополнительно возникающего отклонения частоты n -го абонента в распределенной информационно-измерительной системе ($n = 1, \dots, N$).

Приведенные зависимости D_1/σ_n от τ_n/T_n позволяют исследовать изменение амплитуды главного пика АКФ от τ_n/T_n , непосредственно определяющего отношение сигнал/шум на входе демодулятора и, соответственно, изменение вероятности ошибки приема бита информации в принимаемом сообщении. Для получения указанной зависимости представим с учетом разло-

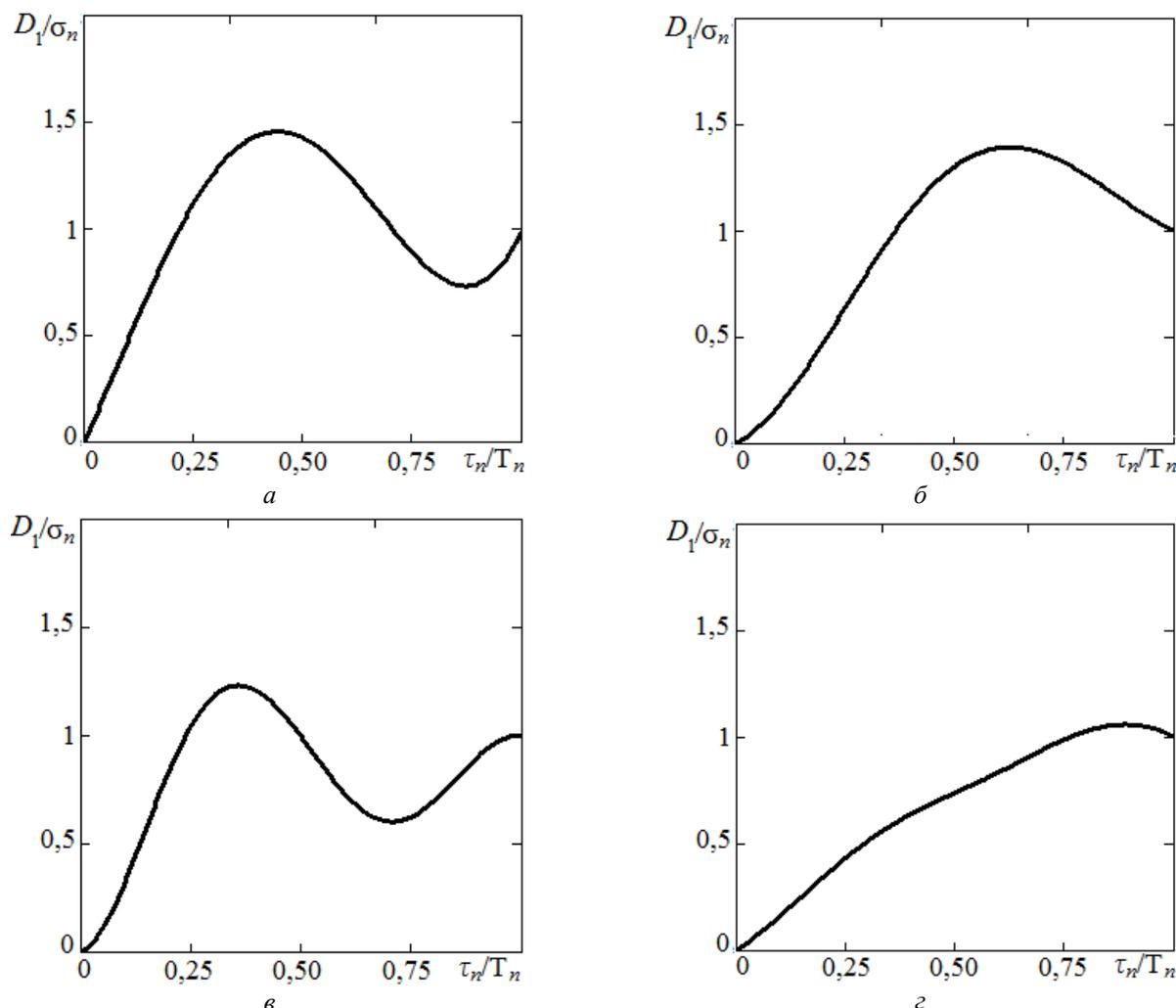


Рис. 4. Зависимость изменения относительной нестабильности частоты информационного сигнала от задержки τ_n : а – $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}$; б – $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}$; в – $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$; г – $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$

Fig. 4. The dependence of the change of the relative instability of information signal frequency on the delay τ_n : а – $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}$; б – $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}$; в – $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}$; г – $\sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$

жения функции $\sin x = x - x^3/6$ [10], являющегося достаточным при относительных нестабильностях современных генераторов, АКФ в области главного пика выражением

$$R_n(0, \Delta f_n) = 1 - (\pi \cdot \Delta f_n \cdot T)^2 / 6, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (8)$$

С учетом выражений (2) и (8) значение главного пика АКФ равно

$$\bar{R}_n = 1 - (\pi \cdot D_1(\tau_n) \cdot T)^2 / 6, \quad (n = 1, \dots, N). \quad (9)$$

Зависимости, иллюстрирующие изменение \bar{R}_n от τ_n , приведены на рис. 5.

Допустимое снижение уровня главного пика АКФ определяется допустимым увеличением вероятности битовой ошибки. В частности, для систем связи и передачи данных, использующих сложные сигналы, как показывают результаты исследований, приведенные в ряде работ, например

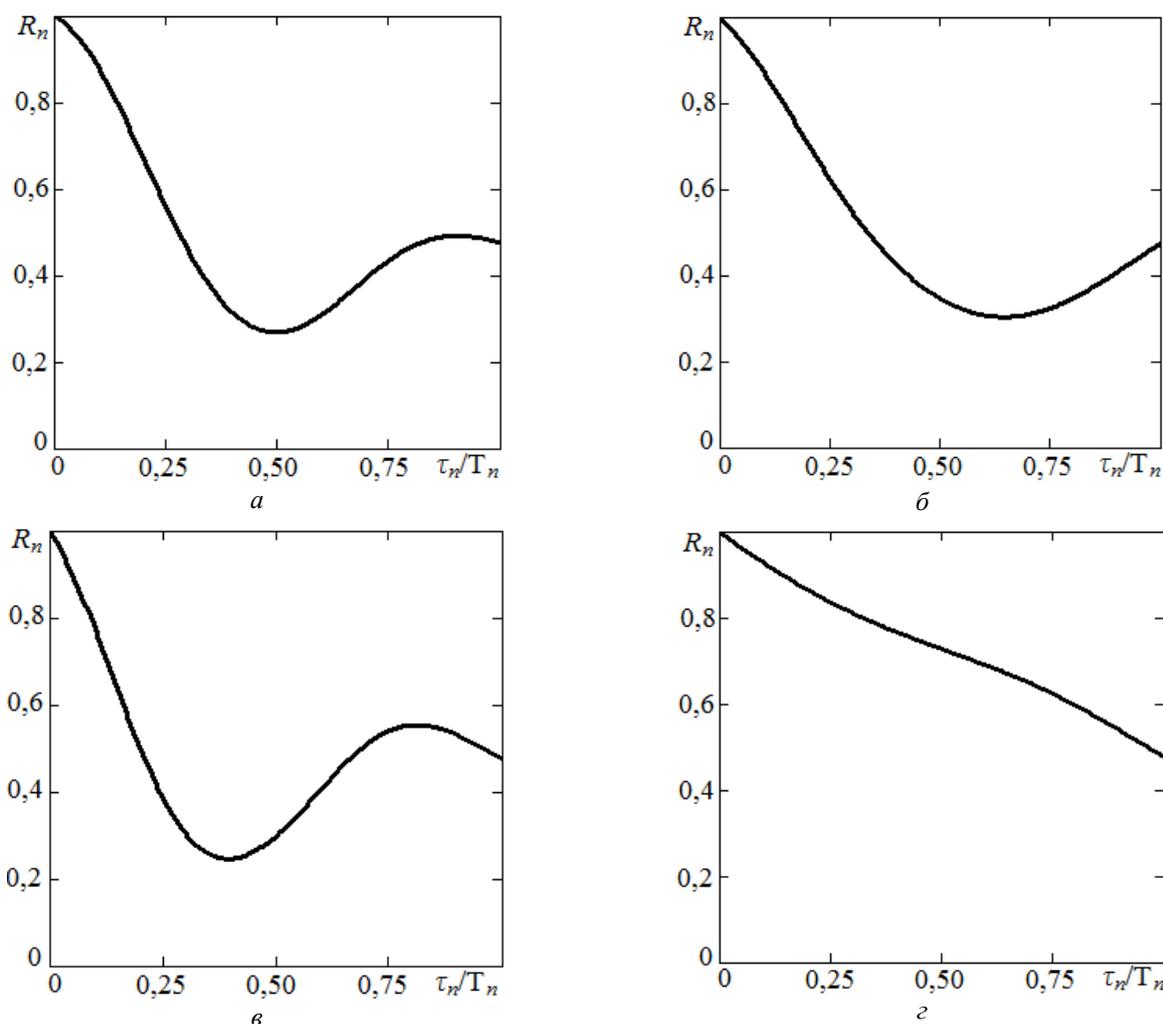


Рис. 5. Зависимость изменения амплитуды главного пика АКФ от задержки τ_n :

$$a - \sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}; \quad б - \sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}; \quad в - \sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}; \quad г - \sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$$

Fig. 5. The dependence of the change of the main peak of the autocorrelation function amplitude on the delay τ_n :

$$a - \sigma_n = 4 \cdot 10^{-7}; \quad б - \sigma_n = 3 \cdot 10^{-7}; \quad в - \sigma_n = 2 \cdot 10^{-7}; \quad г - \sigma_n = 1 \cdot 10^{-7}$$

в [11], уровень нормированной АКФ не должен снижаться ниже 0,7. Это позволяет определить допустимые относительные задержки времени формирования сигнала управления, а при известном характерном времени изменения частоты сигнала получить абсолютное значение.

Для рассматриваемого в работе типа генератора ГК-77 УН допустимое время задержки τ_n , при котором значение пика АКФ не уменьшится ниже заданного значения, составляет в зависимости от внешних условий порядка $(0,12 \dots 0,5) \cdot T_n$.

Анализ приведенных результатов показывает, что использование статистического метода стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах позволяет при $\tau_n \approx 0$ ($n = 1, \dots, N$) формировать сигналы управления, обеспечивающие практически полное исключение отклонения частоты, что соответственно позволяет использовать данный метод в распределенных информационно-измерительных системах. При этом для использования в составе распределенных информационно-измерительных систем предпочтительными являются устройства формирования и обработки сигналов с большим характерным временем изменения частоты сигнала T_n .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают следующее.

1. Полученные результаты обобщают выполненные ранее исследования достигаемой стабильности частоты и основных закономерностей, связывающих параметры (частота и относительная нестабильность) устройств формирования и обработки сигналов с учетом возможных задержек формирования сигналов для стабилизации частоты, которые возникают в распределенных информационно-измерительных системах.

2. Возникающие задержки формирования сигналов приводят к повышению относительной нестабильности частоты и снижению уровня АКФ по сравнению со случаем $\tau_n = 0$. Однако снижение указанных характеристик определяется не только абсолютным значением τ_n , а отношением времени задержки τ_n к характерному времени изменения частоты сигнала T_n . Допустимое значение τ_n , при котором возможно использование метода статистической стабилизации частоты в распределенных информационно-измерительных системах, зависит от относительной нестабильности самого генератора и составляет при различных значениях исходной относительной нестабильности $(0,12...0,5) \cdot T_n$.

3. При малых временных задержках между оцениванием частоты информационного сигнала и стабилизацией частоты использование рассматриваемого метода позволяет уменьшить относительную нестабильность частоты информационного сигнала. При временных задержках больше интервала корреляции использование статистического метода не приводит к изменению относительной нестабильности частоты информационного сигнала. В пределах интервала характерного изменения частоты использование статистического метода стабилизации частоты имеет немонотонный характер в зависимости от значений автокорреляционной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров Н.М., Романов С.К., Леньшин А.В. Формирование ЧМ-сигналов в синтезаторах с автоподстройкой. М.: Радио и связь, 2004. 210 с.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с широкополосными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Пестряков А.В., Хасьянова Е.Р. Компенсация сдвига постоянной составляющей с применением метода временного усреднения // СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии: материалы докладов 25-й Международной конференции (КРЫМИКО'2015), Севастополь, Россия. Сентябрь 6–12. 2015. Т. 1. С. 351–353.
4. Fortier T.M., Nelson C.W., Hati A. Sub-femtosecond absolute timing jitter with a 10 GHz hybrid photonic-microwave oscillator // Appl. Phys. Letters. 2012. Vol. 100, Iss.23. Pp. 197–200. DOI: 10.1063/1.4726122
5. Hati A., Nelson C.W., Howe, D.A. Howe. Reduction oscillator PM noise from AM-PM noise correlation // Electronic Letters. 2014. Vol. 50, no. 17. Pp. 1195–1197. DOI: 10.1049/el.2014.2210
6. Габриэльян Д.Д. Метод оценки частот в системе генераторов / А.А. Прыгунов, А.Г. Прыгунов, О.А. Сафарьян // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 2 (3). С. 72–77.
7. Safaryan O.A. Method of Reducing Phase Noise in the System Simultaneously and Independently Operating the High-Frequency Signal Generators / I.A. Sakharov, N.V. Boldyrikhin, I.A. Yengibaryan // Engineering Computations. Emerald Group Publishing Ltd. 2017. Vol. 34, no. 8. Pp. 2586–2594.
8. Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В. Исследование локальной динамики контура ФАПЧ // СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии: материалы докладов

26-й Международной конференции (КРЫМИКО'2016). Севастополь, Россия. Сентябрь 4–10. 2016. С. 449–455.

9. **Zucca C., Tavella P.** The clock model and its relationship with the Allan and related variances // IEEE Trans. on UFFC. February. 2005. Vol. 52, iss. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1406554

10. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Изд-во Наука, 1974. 832 с.

11. **Скляр Б.** Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Издательский дом «Вильямс», 2007. 1104 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Габриэлян Дмитрий Давидович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника НТК по науке ФГУП «РНИИРС», d.gabrielyan2011@yandex.ru.

Костенко Петр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационного электрорадиоприборного оборудования Ростовского филиала МГТУ ГА, pit.kostenko.73@mail.ru.

Сафарьян Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета, safari_2006@mail.ru.

FEATURES OF THE USE OF THE STATISTICAL METHOD OF FREQUENCY STABILIZATION OF GENERATORS IN DISTRIBUTED INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

Dmitriy D. Gabrielyan¹, Petr I. Kostenko², Olga A. Safaryan³

¹ *Rostov-on-Don Research Institution of Radio Communication,
Rostov-on-Don, Russia*

² *Rostov Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Rostov-on-Don, Russia*

³ *Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

The research was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-01-00151

ABSTRACT

The article deals with the problems of frequency stabilization of generators in distributed information-measuring systems on the basis of the static frequency stabilization method. The examples of similar systems are given. The necessity to ensure high stability of signal frequency generated by subscribers to improve the efficiency of the stated systems is noted. Two main features of applying the static frequency stabilization method are stated. The first one is determined with a delay in signal input into the device for estimating the frequency-time signal parameters in relation to the signal phase measurement interval. The second feature involves the entry delay of the formed control signal of generator frequency correction. It is shown that the mentioned features lead to divergence of the current variation of generator frequency and the value under correction, obtained considering the delay. The description of information signals enabling to specify a mathematical model of the process of assessment forming of the information signal frequency variation, taking into account the mentioned factors, is offered. It is shown that the possibility of using a statistical method to stabilize the frequency of generators in distributed information-measuring systems is determined not only with the values of nominal frequencies and relative instabilities of generators included into the information-measuring system, but also by the autocorrelation function of a random process describing the change of information signal frequency. In case of small time delays between the evaluation of information process signal frequency and frequency stabilization, the use of the method to be considered allows to reduce the relative instability of information signal frequency. When time delays are greater than the correlation interval, the use of the statistical method does not lead to

the change of relative instability of information signal frequency. Within the correlation interval, the use of the statistical method of frequency stabilization can cause depending on the autocorrelation function values both decrease and increase of the relative information signal frequency instability.

Key words: distributed information-measuring system, information signal, frequency stability, delay interval, random process, correlation function of a random process.

REFERENCES

1. **Tikhomirov, N.M., Romanov, S.K. and Lenshin, A.V.** (2004). *Formirovanie FM-signalov v sintezatorakh s avtopodstroykoy* [FM signals forming in synthesizers with auto-tuning]. Moscow: Radio and Communication, 210 p. (in Russian)
2. **Varakin, L.E.** (1985). *Sistemy svyazi s shirokopolosnymi signalami*. [Communication systems with broadband signals]. Moscow: Radio and Communication, 384 p. (in Russian)
3. **Pestryakov, A.V. and Khasyanova, E.R.** (2015). *Compensation of the constant component shift using the time averaging method*. Microwave Engineering and Telecommunication Technology: Proceedings of the 25th International Conference (CriMiCo'2015), Sevastopol, the Russian Federation, September 6–12, pp. 349–351 (in Russian)
4. **Fortier, T.M., Nelson, C.W. and Hati, A.** (2012). *Sub-femtosecond absolute timing jitter with a 10 GHz hybrid photonic-microwave oscillator* // Appl. Phys. Letters. 2012, vol. 100, issue. 23, pp. 197–200. DOI: 10.1063/1.4726122
5. **Hati, A., Nelson, C.W. and Howe, D.A.** (2014). *Reduction oscillator PM noise from AM-PM noise correlation* // Electronic Letters, vol. 50, no. 17, pp. 1195-1197. DOI: 10.1049/el.2014.2210
6. **Gabrielyan, D.D., Prygunov, A.A., Prygunov, A.G. and Safaryan, O.A.** (2012). *Method of Estimating Frequency in Generator System*. Physical Bases of Instrumentation, vol. 1, no. 2 (3), pp. 72–77. (in Russian)
7. **Safaryan, O.A., Sakharov, I.A., Boldyrikhin, N.V. and Yengibaryan, I.A.** (2017). *Method of Reducing Phase Noise in the System Simultaneously and Independently Operating the High-Frequency Signal Generators*. Engineering Computations. Emerald Group Publishing Ltd. 2017, vol. 34, no. 8, pp. 2586–2594.
8. **Gelozhe, Ju.A., Klimenko, P.P. and Maksimov, A.V.** (2016). *Research of local dynamics of the Phase-locked loop*. Microwave Engineering and Telecommunication Technology: Proceedings of the 26th International Conference (CriMiCo'2016), Sevastopol, the Russian Federation, September 4–10, pp. 449–455 (in Russian)
9. **Zucca, C. and Tavella, P.** (2005). *The clock model and its relationship with the Allan and related variances* // IEEE Trans. on UFFC. February, vol. 52, issue. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2005.1406554
10. **Korn, G. and Korn, T.** (1977). *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. [Manual on Mathematics for Researchers and Engineers]. Moscow: Publishing House "Nauka", 832 p.
11. **Sklyar, B.** (2007). *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye*. [Digital communication. Theoretical basic principles and practical application]. Publishing House "Williams", 1104 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy D. Gabrielyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head for Science of the Scientific and Technological Complex, FSUE Rostov-on-Don Research Institution of Radio Communication, d.gabrieljan2011@yandex.ru.

Petr I. Kostenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aeronautical Electronic Radio Equipment Chair, Rostov Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, pit.kostenko.73@mail.ru.

Olga A. Safarian, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Cyber-Security of Information Systems Chair, the Don State Technical University, safari_2006@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.06.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 04.06.2019
Accepted for publication 14.11.2019

УДК 629.735.083.004.58
DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-86-99

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ПО УСЛОВИЯМ ВИЗУАЛЬНОЙ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

С.В. ДУБИНСКИЙ¹, Ю.М. ФЕЙГЕНБАУМ², В.Я. СЕНИК¹

¹Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

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

Одним из основных критериев прочности композитной авиационной конструкции по условиям допускаемых повреждений является минимальный размер дефекта от случайного ударного повреждения, который гарантированно обнаруживается при стандартных формах технического обслуживания самолета. Прочность конструкции, имеющей такие (называемые BVID – Barely Visible Impact Damage) и меньшие повреждения должна быть обеспечена при расчетной нагрузке. В работе выполнен анализ эксплуатационных факторов, влияющих на величину этого критерия. Исследовано влияние квалификации персонала, цвета поверхности, уровня загрязненности, расстояния до объекта, а также явления изменения размера дефекта во времени вследствие релаксации внутренних напряжений в поврежденной конструкции. Исследования проводились с использованием 90 углепластиковых трехстрингерных панелей различного цвета и степени чистоты, на которые 25-миллиметровым сферическим бойком были нанесены ударные повреждения. Всего было нанесено 80 ударов с энергией в диапазоне 3–107 Дж. В эксперименте по визуальной обнаруживаемости повреждений в различных условиях участвовали 42 специалиста, в том числе 25 сотрудников авиакомпаний. При статистической обработке экспериментальных данных и определении зависимости вероятности обнаружения повреждения от его размера использовалась функция Вейбулла. Оценка размера BVID по критерию «90/95» (95 % проверяющих должны обнаружить не менее 90 % дефектов с размером не меньше BVID) выполнялась с помощью технологии бутстреп-моделирования. Результаты проведенного исследования позволили оценить степень влияния различных эксплуатационных факторов на надежность выявления повреждений при визуальном эксплуатационном контроле и определить значения BVID в зависимости от комбинации этих факторов. В частности, показано, что на синей поверхности повреждения в ПКМ видны лучше, чем на красной или серой, при любом расстоянии до объекта. Выполненные исследования продемонстрировали существенное влияние релаксации (эффекта уменьшения со временем под воздействием различных факторов размеров поверхностного дефекта в композитной панели) на возможность выявления дефекта в эксплуатации. При этом критическое по сравнению с другими факторами влияние на релаксацию повреждений в ПКМ оказывает режим влагонасыщения конструкции при повышенных температурах.

Полученные результаты хорошо согласуются с опубликованными в иностранных источниках данными, существенно их дополняя и конкретизируя. На основе проведенных исследований сформулирован ряд рекомендаций для разработчиков и эксплуатантов авиационных конструкций из композиционных материалов.

Ключевые слова: композитная конструкция, малозаметное ударное повреждение (BVID), осмотр, релаксация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общепринятым подходом при проведении работ по обеспечению прочности композитных конструкций по условиям эксплуатационной живучести является классификация ожидаемых повреждений по пяти категориям по степени повреждения и надежности его обнаружения при визуальном контроле [1]. Степень серьезности повреждения определяется в зависимости от времени или наработки, в течение которой данное повреждение будет обнаружено и устранено с учетом принятой программы технического обслуживания. Для каждой категории установлены требования по статическим и усталостным нагрузкам, которые должна выдерживать конструкция в эксплуатации вплоть до момента обнаружения повреждения. Ключевым требованием является то, что любое повреждение в композитной конструкции должно либо быть обнаружено, либо не должно снижать прочность конструкции ниже расчетной

нагрузки [1]. Для того чтобы обосновать соответствие конструкции этому требованию, необходимо определить порог визуальной контролепригодности, также известный как едва видимое ударное повреждение или BVID (BVID – Barely Visible Impact Damage).

Основы современной методологии обеспечения прочности по условиям допустимости повреждений, принятой сертифицирующими органами и применяемой ведущими мировыми разработчиками, были заложены в 90-х годах XX века. Значительный объем данных, собранных при эксплуатации самолетов военно-воздушных [2] и военно-морских [3] сил США, позволили установить практический критерий порогового значения обнаруживаемости для композитной панели крыла $\delta_{\text{BVID}} = 0,25$ мм.

Большой вклад в изучение этого вопроса внесли разработчики первого поколения пассажирских самолетов с композитными элементами планера Aerospatiale [4], Boeing [5] и Airbus [6], которые собрали и обработали огромное количество эмпирических данных в обоснование критерия визуальной обнаруживаемости. К сожалению, этих данных не найти в открытых источниках. Среди доступных публикаций можно упомянуть работы, выполненные в США под эгидой FAA, [7] и [8], а также два отчета по проектам, выполненным в Европе, [9] и [10]. Результаты, приведенные в них, в целом подтвердили надежность принятого критерия BVID, а также позволили охарактеризовать влияние на визуальную обнаруживаемость эксплуатационных факторов.

Пожалуй, наиболее критическим фактором среди них является эффект изменения размеров во времени, или «релаксация» повреждения. Это явление может привести к тому, что повреждение, хорошо видимое сразу после удара, становится труднообнаруживаемым со временем, притом что разрушения внутренней структуры в полимерном композиционном материале (ПКМ) сохраняются на том же уровне. Работ в открытой печати на эту тему также известно мало, можно только упомянуть публикации [11–12], в которых изучение релаксации ударных повреждений проводилось сначала на элементарных образцах, а затем было продолжено на композитных панелях, подкрепленных Ω -стрингерами. Значимые данные по влиянию некоторых эксплуатационных факторов на релаксацию вмятин в ПКМ приведены в докладе Airbus [6], посвященном обеспечению прочности по условиям допускаемых повреждений.

Результаты, полученные в рамках этих работ, обладают несомненной ценностью и могут быть использованы в качестве референтных значений BVID, однако область их применения не безгранична. Как известно, наиболее надежным источником данных для обоснования прочности самолета является накопленный опыт эксплуатации, и в этой связи для сертификации самолета МС-21 необходим отдельный анализ, учитывающий специфику отечественных условий, технического обслуживания, квалификации персонала и других факторов, влияющих на рассматриваемый критерий прочности [13]. Для анализа влияния этих факторов на BVID было проведено настоящее исследование, основная цель которого состояла в том, чтобы оптимизировать программу технического обслуживания композитного крыла путем обоснования адекватного критерия прочности.

МЕТОДОЛОГИЯ

Экспериментальные образцы. Программа экспериментальных исследований была разработана в соответствии с оригинальной методологией [14], ориентированной на учет ключевых аспектов в области проектирования, изготовления испытаний и эксплуатации, которые могут потенциально повлиять на определение BVID. Ее схема приведена на рис. 1, она предполагает максимальную представительность применяемых методов с точки зрения их соответствия типовой конструкции.



Рис. 1. Общая схема эксперимента по определению BVID
Fig. 1. The general scheme of BVID experimental evaluation

В частности, образцы для испытаний должны быть изготовлены и окрашены по серийной технологии, сценарии и методика нанесения ударных воздействий должны быть обоснованы опытом эксплуатации, осмотр должны проводить эксперты, аттестованные в соответствии с действующей системой подготовки персонала, и т. д.

Для эксперимента было изготовлено 90 углепластиковых панелей, подкрепленных т-образными стрингерами, с размером $320 \times 320 \times 3,2$ мм, полностью аналогичных панелям, применяемым в хвостовом оперении (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид образца
Fig. 2. The specimen

Обшивка и стрингер панелей состоят из девяти слоев препрега HexPly на основе углеродного (M21/34%/UD194/IMA) и стеклянного (M21/45%/120) волокна. После покраски образцов на серийном заводе на панели 25-миллиметровым сферическим бойком были нанесены ударные повреждения с передачей энергии в диапазоне 3–107 Дж. Измерения повреждений выполнялись контактным глубиномером, установленным на штативе. Глубины вмятин, образовавшихся в результате, оказались в интервале 0,01–1,68 мм. Все панели, как с ударами, так и без, были скомпонованы в планшеты 3 × 3 штуки площадью 1,1 м², после чего производился их осмотр экспертами.

Описание эксперимента. В ходе эксперимента отрабатывалось два типа эксплуатационного контроля авиационных конструкций, применяемых в условиях аэродромного обслуживания: общий осмотр (GVI) и детальный осмотр (DET). Общий осмотр выполнялся с расстояния 3 и 5 м, детальный – с расстояния 0,7 м. При проведении общего осмотра специалистам давалось 20 секунд на каждый планшет, не разрешалось вставать из-за стола и значительно изменять угол обзора. При детальном осмотре время было ограничено 40 секундами, разрешалось ходить вокруг планшета и осматривать панели под различными углами. Все осмотры выполнялись при естественном освещении.

На первом этапе 42 специалиста, в том числе 25 сотрудников авиакомпаний, обладающих опытом в данной области, и 17 человек без квалификации, участвовали в эксперименте по проверке влияния на визуальную обнаруживаемость расстояния до объекта, квалификации контролера и цвета поверхности. Для этого осматривались чистые (незагрязненные) панели серого, красного и синего цветов, содержавшие в общей сложности 80 ударных повреждений. Выбор такой цветовой гаммы связан с особенностями ливреи основного ожидаемого заказчика МС-21 – компании «Аэрофлот».

На втором этапе изучалось влияние загрязнения поверхности. Все панели были покрыты слоем гуаши, имитирующей грязь. В опытах с загрязненными панелями участвовало 16 человек, в том числе 10 экспертов и 6 человек без опыта.

Модель статистической обработки результатов. В математической модели, используемой для анализа, обнаружение повреждения рассматривалось как случайное событие, которое может происходить с вероятностью p или не происходить с вероятностью $q = 1 - p$. Предполагалось, что вероятность обнаружения зависит от размера повреждения (глубины вмятины), квалификации специалистов, цвета краски и уровня загрязнения поверхности. Истинная вероятность обнаружения повреждения определенного размера специалистами равной квалификации в одинаковых условиях считалась неизвестной постоянной, которая должна быть определена в ходе испытаний. Число обнаружений повреждения определенного размера μ в n независимых исследованиях считалось случайной величиной, которая может принимать только дискретные целые значения 0, 1, 2, ..., n и подчиняется биномиальному распределению с параметрами p и n . Вероятность обнаружения повреждения k раз в n испытаниях может быть выражена как [15]

$$F(\mu = k|n, p) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}, \quad (1)$$

где $\binom{n}{k} = n!/k!(n-k)!$ – биномиальный коэффициент или количество комбинаций, в которых k специалистов из n , участвующих в эксперименте, обнаруживают повреждение. Ожидаемая величина в данном случае:

$$E(\mu) = np. \quad (2)$$

Вероятность обнаружения повреждения k либо больше раз во время визуальной проверки n специалистами будет суммой вероятностей (1) для всех величин μ , для которых $k \leq \mu \leq n$:

$$F(\mu \geq k | n, p) = \sum_{\mu=k}^n \binom{n}{\mu} p^{\mu} q^{n-\mu}. \quad (3)$$

Согласно (2) точечная оценка ожидаемого значения вероятности обнаружения повреждения определенного размера может быть определена из экспериментальных данных как отношение μ (количество обнаружений) и n (общее количество испытаний): $\bar{p} = \mu/n$.

Чтобы приблизить соотношение между вероятностью обнаружения повреждения и его размером, были рассмотрены три функции: экспоненциальная, логистическая и Вейбулла. Они были использованы для согласования экспериментальных данных, полученных в разных условиях и при разном количестве испытаний. В дальнейшем отказались от экспоненциальной функции из-за противоречий в области крупных повреждений: во многих случаях она дала нереальные вероятности, $p > 1$. Аппроксимации Вейбулла и логистическая функция показали согласованность в области малых вероятностей и расхождение в области вероятностей $p > 0,7$. Численное моделирование, выполненное с помощью метода Монте-Карло [16], показало, что сумма квадратов остатков между точками теоретических и экспериментальных данных Q была меньше для уравнения Вейбулла, чем для логистического уравнения. Для проверенного набора данных $Q_{Weibull} = 1,38$ и $Q_{Logistic} = 1,58$. Таким образом, для дальнейшего анализа была выбрана функция Вейбулла

$$p = 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^b\right). \quad (4)$$

Параметры функции Вейбулла a и b могут быть определены методом наименьших квадратов:

$$Q = \sum_{i=1}^m \left(\bar{p}_i - \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{h_i}{a}\right)^b\right) \right) \right)^2 = \min, \quad (5)$$

где \bar{p}_i – экспериментально определенная вероятность обнаружения повреждения размером h_i . Поскольку функция (5) гладкая и одномодальная, ее минимум может быть определен, к примеру, методом покоординатного спуска [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количественные характеристики значимости эксплуатационных факторов для визуальной обнаруживаемости определялись с использованием непараметрических методов математической статистики. Для проверки однородности данных, то есть гипотезы о принадлежности выборок к одной и той же генеральной совокупности, для двух выборок при отсутствии в них совпадающих значений использовался критерий Манна – Уитни [18]. В случае трех или более выборок или в случае двух выборок с совпадающими значениями использовался k -выборочный критерий согласия Андерсона – Дарлинга [19].

Влияние квалификации персонала. Влияние квалификации персонала на обнаруживаемость ударных повреждений изучалось на чистых образцах трех выбранных цветов путем проведения эксперимента с двумя группами: группой экспертов с опытом соответствующих работ и группой без специальной подготовки. Для сравнения эффективности этих групп для каждого размера повреждения определялись разности между вычисленными средними значениями вероятности его

обнаружения. Оказалось, что за исключением небольшой группы данных (детальный осмотр вмятин глубиной свыше 0,4 мм), для всего остального диапазона размеров повреждений и типов осмотра разности вероятностей между двумя группами $p_i - p_{nq}$ проявляют заметную нестабильность. С учетом того, что средние значения этих разностей приближаются к нулю (в табл. 1 это проиллюстрировано для синих незагрязненных образцов), можно заключить, что в условиях данного эксперимента квалификация специалиста не оказала существенного влияния на вероятность обнаружения повреждений. В целях дальнейшего анализа, сосредоточенного на других эксплуатационных факторах, статистические данные из двух групп были объединены.

Таблица 1
Table 1

Вероятности обнаружения вмятин для синих незагрязненных образцов
The probabilities of detecting dents for clean blue specimens

№	h, mm	0,7 m			3 m			5 m		
		p_i	p_{nq}	$p_i - p_{nq}$	p_i	p_{nq}	$p_i - p_{nq}$	p_i	p_{nq}	$p_i - p_{nq}$
1	0,04	0,95	1,00	-0,05	0,25	0,00	0,25	0,10	0,00	0,10
2	0,05	0,55	0,31	0,24	0,05	0,15	-0,10	0,05	0,08	-0,03
3	0,07	0,95	0,85	0,10	0,15	0,39	-0,24	0,05	0,23	-0,18
4	0,08	0,95	1,00	-0,05	0,00	0,08	-0,08	0,05	0,00	0,05
5	0,11	0,95	0,77	0,18	0,20	0,15	0,05	0,15	0,00	0,15
6	0,12	0,65	0,54	0,11	0,05	0,00	0,05	0,05	0,00	0,05
7	0,12	0,80	0,85	-0,05	0,10	0,08	0,02	0,05	0,08	-0,03
8	0,20	0,65	0,77	-0,12	0,35	0,39	-0,04	0,05	0,08	-0,03
9	0,21	1,00	1,00	0,00	0,85	0,92	-0,07	0,60	0,77	-0,17
10	0,31	1,00	1,00	0,00	0,85	0,85	0,00	0,80	0,85	-0,05
11	0,34	0,95	1,00	-0,05	0,90	1,00	-0,10	0,85	1,00	-0,15
12	0,34	1,00	0,92	0,08	0,80	1,00	-0,20	0,55	0,85	-0,30
13	0,39	1,00	1,00	0,00	1,00	0,92	0,08	0,95	1,00	-0,05
14	0,39	1,00	1,00	0,00	0,85	1,00	-0,15	0,90	1,00	-0,10
15	0,72	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,92	0,08
16	0,95	1,00	1,00	0,00	0,95	1,00	-0,05	0,90	0,92	-0,02
17	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
18	1,08	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,95	0,85	0,10
19	1,10	1,00	1,00	0,00	0,95	1,00	-0,05	1,00	1,00	0,00
20	1,12	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,90	1,00	-0,10

Влияние цвета. Для оценки значимости влияния цветовой гаммы на обнаруживаемость повреждений использовалась величина относительного числа обнаруженных вмятин μ каждым из 42-х специалистов. С целью корректного сравнения, данные по серым, красным и синим образцам были взяты с одинаковым диапазоном размеров, а именно от 0,5 до 1,1 мм. Этот диапазон включал 33 вмятины на серых образцах, 17 вмятин на красных и 18 вмятин на синих.

Для всех изучаемых расстояний обзора для синих панелей средние значения относительного числа обнаруженных вмятин были больше, а коэффициенты вариации почти в два раза меньше, чем для серых и красных. Проверка на однородность данных для трех выборок, которые включали по 42 результата, показала, что все значения статистики k -выборочного критерия Андерсона – Дарлинга много больше критического значения, поэтому вероятность обнаружения значимо зависит от цвета образца. Средние значения относительной обнаруживаемости, определенные для красной и серой панелей, были очень близки друг к другу при расстоянии осмотра 3 и 5 м с почти одинаковым разбросом. Тест Манна – Уитни использовался для проверки однородности данных, получен-

ных на красных и серых образцах. Оказалось, что для расстояния обзора 3 и 5 м может быть принята гипотеза о том, что обе выборки принадлежат к одной и той же популяции с уровнем значимости 5 %, а для расстояния осмотра 0,7 м – с уровнем значимости 1,2 %.

Полученные значения вероятности обнаружения повреждений на серых и красных образцах с расстояния 0,7 м как функции размеров повреждения показали, что экспериментальные точки равномерно перемешаны, за исключением трех значений для образцов красного цвета, которые выпали из общей полосы разброса и повлияли на уровень значимости критерия. Поскольку систематического расхождения между экспериментальными точками не наблюдалось, можно предположить, что значения вероятности обнаружения на серой и красной поверхностях одинаковы, и эмпирические данные, полученные для этих двух цветов, также могут быть объединены.

Влияние расстояния. Эксперименты с красными и серыми образцами показали, что увеличение расстояния осмотра с 0,7 до 3 и до 5 м приводит к уменьшению количества обнаруженных вмятин в 2 и 3 раза соответственно. Для синих образцов наблюдалось уменьшение количества обнаруженных вмятин в 1,4 раза для расстояния осмотра 3 м и в 1,6 раза для расстояния осмотра 5 м.

Влияние загрязнения. Для оценки влияния загрязнения поверхности на визуальную обнаруживаемость композитные панели были покрыты черной гуашью, имитирующей сажевую пленку, по аналогии с наблюдавшимся в эксплуатации состоянием закрылка самолета Ту-204. Для выборок значений относительного числа вмятин, обнаруженных каждым экспертом на чистых и загрязненных образцах, проверялась гипотеза об их принадлежности к одной генеральной совокупности. Тест на однородность по Андерсону – Дарлингу для двух выборок, включающих 42 значения на чистых и 16 на загрязненных образцах, показал, что в трех случаях (красно-серый 0,7 м / синий 3 м / синий 5 м) влияние состояния поверхности на обнаруживаемость было значительным, а в других трех случаях (красно-серый 3 м / красно-серый 5 м / синий 0,7 м) влияния выявлено не было. Сделать однозначный вывод о влиянии загрязнения на основании этих данных довольно трудно, однако с уверенностью можно сказать о следующем.

Во-первых, вероятность обнаружения дефектов при загрязнении понижается, о чем свидетельствуют аппроксимирующие зависимости, приведенные на рис. 3.

Во-вторых, загрязнение поверхности привело к существенному повышению рассеяния результатов визуального контроля, то есть в некоторых случаях дефект на загрязненной поверхности может оказаться более заметным.

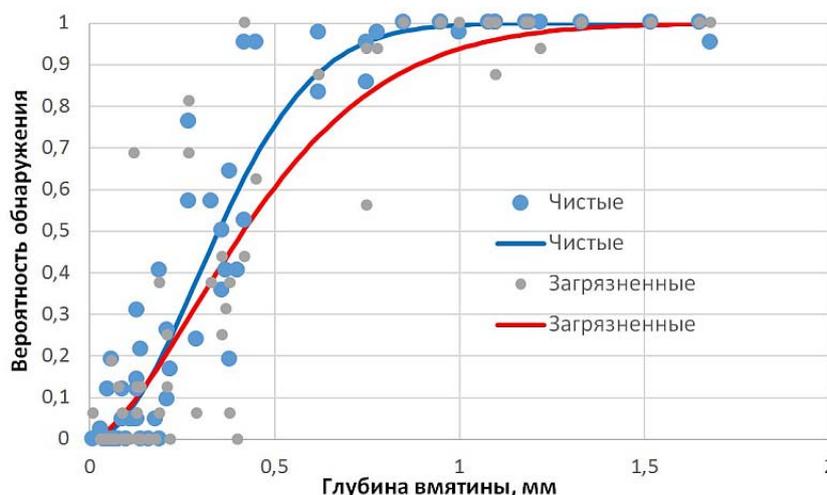


Рис. 3. Вероятность обнаружения как функция размера повреждения для красных и серых образцов при расстоянии осмотра 3 м

Fig. 3. The probability of detection as a function of damage size for red and gray specimens from viewing distance of 3 m

Методика вычисления BVID. В соответствии с практикой, принятой в авиастроении [4–6], размер BVID для композитных конструкций устанавливается по критерию «90/95»: 95 % проверяющих должны обнаружить не менее 90 % дефектов с размером не меньше BVID. Оценка этого размера выполнялась с помощью технологии бутстреп-моделирования [20], которая представляет собой непараметрический метод обработки случайных данных. Этот метод не требует предположений о законе распределения и использует только эмпирические результаты, генерируя из доступного набора случайных данных набор «фантомных» выборок. Предполагается, что имеющиеся n значений образуют генеральную совокупность, из которой случайным образом извлекаются с возвращением n значений с равными вероятностями ($1/n$) извлечения каждого, которые образуют бутстреп-выборку. Всего генерируется N выборок, и для каждой производится оценка рассматриваемой случайной величины. Затем анализируется распределение полученных оценок. Результаты экспериментов по визуальному контролю можно представить в виде таблицы, в каждой клетке которой содержится результат осмотра конкретным экспертом образца с конкретным размером повреждения. В таблице событию обнаружения повреждения соответствует цифра 1, необнаружению – цифра 0. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты осмотров загрязненных образцов синего цвета с расстояния 3 м. Таблица включает 20 строк и 16 колонок по числу повреждений и экспертов соответственно. Строки таблицы являются выборками объема n результатов осмотров образцов с повреждениями определенных размеров.

Для каждой строки таблицы (размер повреждения) генерируются n цифр, равномерно распределенных в диапазоне $[1, n]$. Каждая цифра определяет номер ячейки в строке, используемой для извлечения значения с помещением его в новую выборку. Для новой выборки с использованием соотношений (4)–(5) строится функция Вейбулла и определяется максимальный размер повреждения, который может быть обнаружен с вероятностью 90 % (h_{90}).

Таблица 2
Table 2

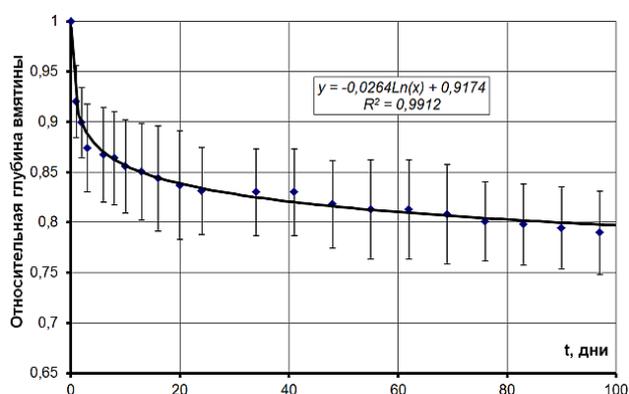
Результаты контроля загрязненных синих образцов с расстояния 3 м
The inspection results for contaminated blue specimens from viewing distance of 3 m

Глубина вмятины, мм	Номер эксперта															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,07	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0,08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0,21	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1
0,31	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
0,34	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0,34	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0,39	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0,39	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
0,72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

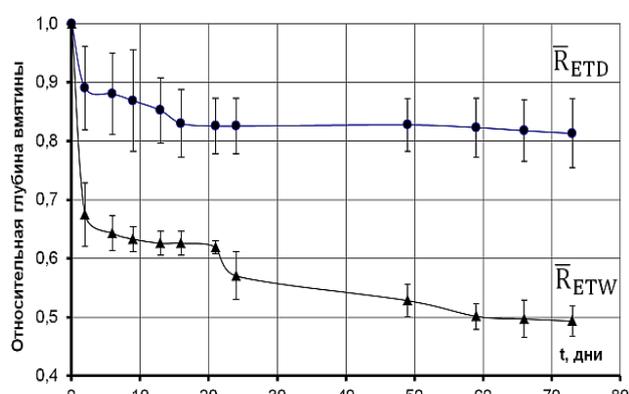
Генерация выборок и анализ Вейбулла продолжаютя N раз. Полученный массив, содержащий N оценок h_{90} , выстраивается в вариационный ряд в порядке возрастания величин. В соответствии с приведенным выше определением 95 % значений массива должны быть ниже размера малозаметного ударного повреждения. Таким образом, оценкой размера малозаметного ударного повреждения $h_{90/95}$ является значение h_{90} с порядковым номером $0,95N$. Число повторений «эксперимента» N выбирается из условия стабилизации значения BVID. Проведенные исследования показали, что стабилизация указанного процесса наступает после 700–800 циклов, а при объеме моделирования более 800 диапазон колебания оценки BVID не превышает $\pm 0,2\%$. Таким образом, число повторений «эксперимента» $N = 1000$ можно считать достаточным.

Полученные значения малозаметных ударных повреждений представлены в сводной табл. 2.

Влияние релаксации. После экспериментов по изучению эффективности визуального контроля работы были продолжены в направлении исследования явления релаксации. Под релаксацией здесь понимается эффект уменьшения со временем размеров поверхностного дефекта в композитной панели. Исследование проводилось на двух панелях, содержащих девять вмятин. На первом этапе релаксация исследовалась при комнатной температуре (ниже RT – Room Temperature), с регулярными измерениями в течение 97 дней. На втором этапе те же панели были помещены в климатическую камеру на 73 дня для оценки воздействия окружающей среды: одна панель влагонасыщалась при температуре 80 °C и относительной влажности 90–95 % (ниже ETW – Elevated Temperature Wet), а вторая высушивалась при температуре 70 °C и влажности 10 % (ETD – Elevated Temperature Dry). На рис. 4 представлены значения относительного коэффициента релаксации $R = \delta_R / \delta_{init}$ (отношение конечного и начального размеров вмятины) в зависимости от времени с доверительным интервалом 90 %.



а
Долговременная релаксация при комнатной температуре
The long-term relaxation in RT conditions



б
Релаксация в условиях повышенной температуры и влажности
The relaxation in ETD and ETW conditions

Рис. 4. Релаксации размера вмятины при различных условиях
Fig. 4. The relaxation of dent size under different conditions

Как можно видеть, наиболее значимое влияние на релаксацию оказывает комбинация повышенной температуры и влажности. К концу эксперимента средние значения коэффициентов релаксации в нормальных условиях и в комбинированном режиме «нормальный + температура-влажность» составили $\bar{R}_{RT} \approx 0,2$ и $\bar{R}_{RT+ETW} \approx 0,6$ соответственно. Следует упомянуть, что факт критического влияния влаги на релаксацию и соответствующий коэффициент снижения размера видимого дефекта хорошо согласуются с данными Airbus [6].

Критерии прочности. В табл. 3 представлена сводная информация по полученным оценкам BVID с учетом рассмотренных эксплуатационных факторов. В столбце 4 показаны результаты статистического анализа данных эксперимента по визуальному обнаружению ударных повреждений при различных условиях, в столбцах 5 и 6 те же величины приведены с учетом коэффициентов релаксации при комнатной температуре \bar{R}_{RT} и в условиях повышенного термовлажностного старения \bar{R}_{RT+ETW} .

Таблица 3
Table 3

Влияние эксплуатационных факторов на критерий BVID
Operational effects on BVID criterion

Условия для поверхности	Цвет	Расстояние осмотра	BVID, мм	BVID _{RT} , мм	BVID _{RT+ETW} , мм
Чистая поверхность	Серый и красный	0,7 м	0,30	0,4	0,5
		3,0 м	0,69	0,8	1,1
		5,0 м	1,02	1,2	1,6
	Синий	0,7 м	0,24	0,3	0,4
		3,0 м	0,34	0,4	0,5
		5,0 м	0,41	0,5	0,7
Загрязненная поверхность	Серый и красный	0,7 м	0,91	1,1	1,5
		3,0 м	1,17	1,4	1,9
		5,0 м	1,71	2,1	2,7
	Синий	0,7 м	0,59	0,7	0,9
		3,0 м	0,83	1,0	1,3
		5,0 м	0,88	1,1	1,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты и результаты анализа полученных данных позволили оценить, как эксплуатационные факторы влияют на визуальную обнаруживаемость повреждений в авиационных конструкциях из ПКМ.

Тот факт, что квалификация специалистов не оказала существенного влияния на вероятность обнаружения повреждений, позволяет сделать вывод, что квалификация и навыки эксплуатационного контроля, отработанные на парках металлических конструкций, могут оказаться неэффективными при контроле конструкций из композиционных материалов. Для решения этой проблемы необходима разработка специализированных руководящих материалов и организация учебных курсов по обслуживанию композитных конструкций.

Было установлено, что вероятность обнаружения сильно зависит от цвета. На синей поверхности повреждения в ПКМ видны лучше, чем на красной или серой при любом расстоянии до объекта. Более общая интерпретация этого результата состоит в том, что следы от ударов в ПКМ более заметны на темных покрытиях.

Однако это справедливо только при условии, что поверхность элемента чистая, поскольку загрязнение является одним из определяющих факторов и оказывает очень неоднозначное влияние на обнаруживаемость. В большинстве случаев загрязнение скрывает вмятины, но в некоторых случаях может подчеркивать их; в терминах статистики это выражается в значительном рассеянии полученных эмпирических данных. Авиакомпаниям, эксплуатирующим компо-

зитные самолеты, можно порекомендовать окрашивать внешние поверхности силовых элементов в темные цвета и содержать их в чистоте.

Выполненные исследования подтвердили критическое по сравнению с другими факторами влияние на релаксацию повреждений в ПКМ режима влагонасыщения при повышенных температурах. При наихудшей комбинации условий окружающей среды в течение относительно небольшого промежутка времени, сравнимого с интервалами между легкими формами обслуживания, глубина вмятины может уменьшиться более чем вдвое.

Таким образом, полученные результаты показывают, что эксплуатационные факторы могут оказывать существенное влияние на визуальную контролепригодность повреждений в ПКМ и для обеспечения должного уровня безопасности композитного самолета программа его технического обслуживания обязательно должна учитывать соответствующие сценарии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Horton, R., Whitehead, R.** Damage tolerance of composites: final report, Rept. AFWAL-TR-87-3030, Wright-Patterson AFB, OH, 1988.
2. **Kan, H.P., Cordero, R., Whitehead, R.S.** Advanced certification methodology for composite structures, Rept. DOT/FAA/AR-96/111, Naval Air Warfare Center-Aircraft Division Department of the Navy, Patuxent River, MD, 1997.
3. **Tropis A.** Certification of the composite outer wing of the ATR72 / A. Tropis, M. Thomas, J. Bounie, P. Lafon // Proceedings of the Institution of mechanical Engineers Part G. 1995. Vol. 209, issue, 4. Pp.327–339 DOI: 10.1243 / PIME_PROC_1995_209_307_02
4. **Fawcett, A.J., Oaks, G.D.** Boeing composite airframe damage tolerance and service experience, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #2 of Session 1. National Institute for Aviation Research. Chicago. IL, 2006.
5. **Morteau, E., Fualdes, C.** Airbus composites damage tolerance methodology, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #1 of Session 1. National Institute for Aviation Research. Chicago. IL, 2006.
6. **Spencer F.W.** Visual inspection: Research Project Report on Benchmark Inspections // Technical Report No DOT/FAA/AR-96/65, U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. Washington, D.C., 1996. 59 p. DOI: 10.21949/1403546
7. **Erhart, D., Ostrom, L.T., Wilhelmsen, C.A.** Visual detectability of dents on a composite aircraft inspection specimen: an initial study // International Journal of Applied Aviation Studies. 2004. Vol. 4, no. 2. Pp. 111–122. FAA Academy, Oklahoma City.
8. **Baaran J.** Visual inspection of composite structures: EASA-Research Project/2007/3. Final Report. Braunschweig. Germany, 2009.
9. **Cook L.** Reliability of damage detection in advanced composite aircraft structures / L. Cook, A. Boulic, D. Harris, P. Bellamy, P.E. Irving // CAA Paper 2013/03. West Sussex. UK, 2013.
10. **Komorowski, J.K., Gould, R.W., Marincak, A.** Study of the effect of time and load on impact damage visibility // Proceedings of the Second Canadian International Composites Conference and Exhibition (CANCOM 93); in W. Wallace, R. Gauvin and S. V. Hoa (Ed.). Ottawa, Ont. 1993. Pp. 441–446.
11. **Komorowski, J.P., Gould, R.W., Simpson, D.L.** Synergy between advanced composites and new NDI methods // Advanced Performance Materials. 1998. 5, 1/2. Pp. 137–151.
12. **Дубинский С.В** Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолёта / С.В. Дубинский, Ю.М. Фейгенбаум, А.А. Селихов, С.А. Гвоздев, В.М. Ордынцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–3. С. 604–611.

13. Фейгенбаум Ю.М. Опыт проведения и основные результаты экспериментальных исследований надежности выявления поверхностных дефектов композитной конструкции при проведении визуального контроля / Ю.М. Фейгенбаум, Е.С. Метелкин, Ю.А. Миколайчук, В.Я. Сеник, С.В. Дубинский, С.А. Гвоздев, И.Г. Хлебников // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 14. С. 75–89.

14. Seber G., Lee A. Linear regression analysis. 2. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. 582 с.

15. Fishman G.S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. New York: Springer, 1996. 698 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-2553-7

16. Wright Stephen J. Coordinate descent algorithms // Mathematical Programming. 2015. Vol. 151, iss. 1. Pp. 3–34. DOI: 10.1007/s10107-015-0892-3

17. Himmelblau D.M. Process analysis by statistical methods. New York: John Wiley & Sons, 1970. 463 p. DOI: 10.1002/aic.690170103

18. Lawless J.F. Statistical models and methods for lifetime data. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. Pp. 478–481.

19. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, no. 1. Pp. 1–26.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубинский Станислав Вячеславович, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отделения Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), nio18@tsagi.ru.

Фейгенбаум Юрий Моисеевич, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ГосНИИ ГА)», feigenbaum_ym@ncplg.ru.

Сеник Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ)», vitaly.senik@tsagi.ru.

DETERMINATION OF STRENGTH CRITERIA ON CONDITIONS OF VISUAL TESTABILITY OF IMPACT DAMAGE IN COMPOSITE AIRCRAFT CONSTRUCTIONS

Stanislav V. Dubinskiy¹, Yury M. Feygenbaum², Vitali Ya. Senik¹

¹*Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Russia*

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

ABSTRACT

One of the principal criteria of aircraft composite design strength on the conditions of damage tolerance is the minimum defect size of accidental impact damage that is sure to be located during regular maintenance checks. Construction strength with similar (BVID – Barely Visible Impact Damage) and smaller damages must be ensured under design load. The analysis of operational factors affecting the criterion value is conducted in the paper. The effects of personnel qualification, surface color, level of contamination, distance to the object as well as defect size variations during the time due to relaxation of inner strains in the damaged construction were studied.

Research was carried out using 90 carbon fiber three stinger panels of different color and contamination levels which were subject to impact damages by a 25 mm spherical striker. Totally 80 blows were struck when applying energy within the range of 3–107 J. In the visual damage detectability test under different conditions 42 experts were participated including 25 airlines inspectors. For

the statistical analysis of empirical data and determination of dependence for the damage detection probability on its size, the Weibull function was utilized. Determination of BVID size using "90/95" criterion was performed by means of the bootstrap method (95% of inspectors must detect not less than 90% of defects with the size not smaller than BVID). The results obtained in this study enabled to access the degree of various operational factors impact on reliability of damage detectability during the visual inspection and determine BVID values depending on the combination of the given factors. In particular, it was demonstrated that from all the viewing distances the defects in polymer composite materials are more detectable on the blue surface than on the gray and red ones. Conducted research demonstrated a significant effect of relaxation (the reduction effect of the surface defect sizes in the composite panel affected by different factors during time span) on the probability of defect detectability during operation. Also water saturation of the construction under excessive temperatures has the critical compared with other factors impact on relaxation of damages in polymer composite materials. The obtained results accord with the data in foreign publications making them more supplement and specific. On the basis of conducted research the entire range of recommendations for aircraft designers and operators utilizing composite constructions is formulated.

Key words: composite construction, Barely Visible Impact Damage (BVID), inspection, relaxation.

REFERENCES

1. Horton, R., and Whitehead, R. (1988). Damage tolerance of composites: final report, Rept. AFWAL-TR-87-3030, Wright-Patterson AFB, OH.
2. Kan, H. P., Cordero, R., and Whitehead, R.S. (1997). Advanced certification methodology for composite structures, Rept. DOT/FAA/AR-96/111, Naval Air Warfare Center-Aircraft Division Department of the Navy, Patuxent River, MD.
3. Tropis, A. Thomas, M. Bounie, J. and Lafon, P. (1995). *Certification of the composite outer wing of the ATR72*. Proceedings of the Institution of mechanical Engineers Part G, vol. 209, issue, 4, Pp.327–339. DOI: 10.1243 / PIME_PROC_1995_209_307_02
4. Fawcett, A.J., and Oaks, G.D. (2006). Boeing composite airframe damage tolerance and service experience, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #2 of Session 1, National Institute for Aviation Research, Chicago, IL.
5. Morteau, E., and Fualdes, C. (2006). *Airbus composite airframe damage tolerance methodology, workshop for composite damage tolerance and maintenance: Presentation #1 of Session 1*, National Institute for Aviation Research, Chicago, IL.
6. Spencer F.W. (1996). Visual inspection: Research Project Report on Benchmark Inspections. Technical Report No DOT/FAA/AR-96/65, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., 59 p. DOI: 10.21949/1403546
7. Erhart, D., Ostrom, L.T. and Wilhelmsen, C.A. (2004). *Visual detectability of dents on a composite aircraft inspection specimen: an initial study*. // International Journal of Applied Aviation Studies, FAA Academy, Oklahoma City, vol. 4, no. 2, pp. 111–122.
8. Baaran J. (2009). *Visual inspection of composite structures*. EASA-Research Project/2007/3 Final Report, Braunschweig, Germany.
9. Cook, L., Boulic, A., Harris, D., Bellamy, P. and Irving, P.E. (2013). *Reliability of damage detection in advanced composite aircraft structures*. CAA Paper 2013/03, West Sussex, UK.
10. Komorowski, J. K., Gould, R. W. and Marincak, A. (1993). *Study of the effect of time and load on impact damage visibility*. Proceedings of the Second Canadian International Composites Conference and Exhibition (CANCOM 93), in W. Wallace, R. Gauvin and S. V. Hoa (Ed.). Ottawa, Ont., pp. 441–446.
11. Komorowski, J.P., Gould, R.W. and Simpson, D.L. (1998). *Synergy between advanced composites and new NDI methods*. //Advanced Performance Materials, 5, 1/2, pp. 137–151.
12. Dubinskiy, S.V., Feygenbaum, Yu.M., Selikhov, A.A., Gvozdev, S.A. and Ordynstev, V.M. (2016) *Study of in-service accidental impacts on the wing construction of a commercial aircraft*. Izvestia of Samara Scientific Center of The Russian Academy of Sciences, vol. 18, no. 4–3, pp. 604–611. (in Russian).

13. Feygenbaum, Yu.M., Metelkin, E.S., Mikolaychuk, Yu.A., Senik, V.Ya., Dubinskiy, S.V., Gvozdev, S.A. and Khlebnikov, I.G. (2016) *Experience and principal results of analytical and experimental studies focused on evaluation of composite skin defect visual detection reliability*. Scientific Herald of The State Research Institute of Civil Aviation, no. 14, pp. 75–89. (In Russian)

14. Seber, G. and Lee, A. (2003). *Linear regression analysis*. 2nd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 582 p.

15. Fishman G.S. (1996). *Monte Carlo: concepts, algorithms and applications*. New York: Springer, 698 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-2553-7

16. Wright Stephen J. (2015). *Coordinate descent algorithms*. //Mathematical Programming, vol. 151, issue1, pp. 3–34. DOI: 10.1007/s10107-015-0892-3

17. Himmelblau D.M. (1970). *Process analysis by statistical methods*. New York: John Wiley & Sons, 463 p. DOI: 10.1002/aic.690170103

18. Lawless J. F. *Statistical models and methods for lifetime data*. 2nd edition, New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 478–481.

19. Efron B. (1979). *Bootstrap methods: another look at the jackknife*. The Annals of Statistics, vol. 7, no. 1, pp. 1–26.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stanislav V. Dubinskiy, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department of the Central Aerohydrodynamic Institute, nio18@tsagi.ru.

Yury M. Feygenbaum, Candidate of Technical Sciences, Chief Research Scientist of FGUP the State Scientific Research Institute of Civil Aviation, feygenbaum_ym@ncplg.ru.

Vitali Ya. Senik, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist of FGUP the Central Aerohydrodynamic Institute, vitaly.senik @tsagi.ru.

Поступила в редакцию 28.05.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 28.05.2019
Accepted for publication 14.11.2019

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
05.02.22 – Организация производства

УДК 004.056.52

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-100-111

ИЗОЛЯЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛИЗАЦИИ СЕРВЕРОВ

А.К. БЛАГОРАЗУМОВ¹, И.Г. КИРПИЧЕВ², Д.В. ПЕТРОВ³

¹*Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

³*ПАО «Научно-производственное предприятие «Аэросила», г. Ступино, Россия*

Режимные предприятия имеют локальные вычислительные сети (ЛВС), в которых хранятся и циркулируют данные, утечка которых вовне недопустима. В то же время ни одно современное предприятие не может полноценно функционировать без ЛВС, имеющей доступ в Интернет и объединяющей компьютеры отдела продаж, технической службы поддержки и сервер электронной почты. В целях обеспечения информационной безопасности эти две ЛВС изолируются друг от друга физически – исключением любых связывающих их кабелей. Предприятия, на которых к безотказности работы серверного оборудования предъявляются повышенные требования, используют виртуализацию серверов, требующую подключения физических серверов к дисковому хранилищу файловых образов виртуальных серверов. Если высоконадежные серверы необходимы только в одной из двух независимых ЛВС предприятия, то затраты на создание такого серверного кластера обоснованы и окупаемы. Но когда предприятие сталкивается с необходимостью установить в другой ЛВС один, хоть и малопроизводительный, но высоконадежный сервер, то возникает проблема: требуемую надежность может обеспечить только серверный кластер с дорогостоящими компонентами, но для решения возлагаемых на новый сервер задач вычислительная мощность кластера окажется многократно завышенной, и его построение окажется крайне затратным и экономически необоснованным. В то же время необходимые для нового сервера вычислительные мощности могут быть безболезненно позаимствованы у уже имеющегося серверного кластера предприятия путем добавления в него нового виртуального сервера, и это не потребует никаких материальных затрат. Однако для этого необходимо обеспечить изоляцию нового виртуального сервера от ЛВС, к которой подключены те физические серверы, на которых планируется разместить виртуальный сервер. В статье исследуются методы конфигурирования ЛВС, обеспечивающие изоляцию виртуальных и физических серверов на сетевом уровне, позволяющие решить эту задачу. Также рассматривается случай, когда требуется обеспечить передачу файлов между двумя компьютерами, находящимися в разных, изолированных друг от друга ЛВС, и предлагается соответствующее решение.

Ключевые слова: локальные вычислительные сети, ЛВС, виртуализация, Hyper-V, VirtualBox.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически ни одно предприятие, производственные процессы которого зависят от безотказности функционирования серверного оборудования, не может обойтись без ИТ-инфраструктуры, основанной на виртуализации серверов. Суть виртуализации заключается в том, что на одном физическом сервере, называемом хостом (или хост-сервере), выполняется параллельно несколько операционных систем (ОС) с приложениями, называемых гостевыми виртуальными машинами (или виртуальными серверами), причем эти ОС могут быть разных типов (Windows, Linux, macOS и т. п.). Виртуализации свойственно множество преимуществ:

- надежность – выход из строя физического сервера не повлечет простоя служб и приложений на время его ремонта (или подготовки нового сервера с установкой на него ОС и всех необходимых приложений), поскольку образы виртуальных машин могут

быть в считанные минуты запущены на других хостах (при соответствующей настройке виртуальные машины переносятся и запускаются автоматически);

- эффективность использования ресурсов – оперативную и дисковую память хоста можно перераспределять между виртуальными машинами, а сами виртуальные машины можно распределять по хостам для балансировки загрузки последних;
- легкость наращивания ресурсов – после исчерпания возможности аппаратной модернизации физических серверов можно добавить новый сервер, перенеся на него часть виртуальных машин с одновременным выделением последним дополнительных ресурсов;
- простота резервного копирования – образ виртуальной машины хранится в единственном файле, копирование которого при остановленной виртуальной машине гарантирует полноту и консистентность копии.

Наиболее полно реализует все преимущества виртуализации архитектура серверного кластера, состоящего из нескольких серверов и одного дискового хранилища, в которых дублируются контроллеры и кабели, соединяющие контроллеры хранилища и серверов. Высоконадежное дисковое хранилище, в свою очередь, строится на объединенных в отказоустойчивый дисковый массив (RAID) двухпортовых (имеющих продублированные контроллеры) жестких дисках. Пример реализации такой архитектуры описан в [1]. За полученную таким образом высокую отказоустойчивость приходится расплачиваться очень высокой стоимостью аппаратных средств.

Из соображений безопасности локальную вычислительную сеть (ЛВС) предприятия часто разделяют на два полностью изолированных друг от друга сегмента:

- сегмент с доступом в интернет, содержащий веб-сервер, сервер электронной почты, рабочие станции менеджеров по продажам, инженеров технической поддержки и т. п.;
- внутренний сегмент, содержащий ПО автоматизации бухгалтерии, отдела кадров; внутренний документооборот, конструкторское ПО, архив документов ДСП.

Чтобы полностью исключить утечки секретной информации вследствие хакерских атак и ошибок в настройке межсетевых экранов, на режимных предприятиях изоляция сетей обеспечивается радикальным путем: исключением любых кабелей между двумя сегментами ЛВС предприятия.

При этом не возникает проблем, если высоконадежные серверы либо требуются только в одном из двух сегментов сети, либо если в каждом сегменте сети необходимо наличие достаточного количества серверов, чтобы оправдать большие расходы на построение сразу двух независимых серверных кластеров.

Гораздо сложнее оказывается ситуация, когда в одном сегменте сети присутствие серверного кластера полностью оправдано, а в другом сегменте требуется установить лишь единственный сервер, обладающий, однако, высокой надежностью, обеспечить которую может только виртуализация на дорогостоящем кластере.

Для оптимального разрешения этой ситуации авторами было проведено исследование возможности выноса во второй сегмент сети единичных виртуальных серверов, физически размещаемых в кластере первого сегмента сети. Также исследована проблема передачи файлов между компьютерами, находящимися в изолированных подсетях, встающая при необходимости обеспечения обмена данными между информационной системой предприятия и информационными системами клиентов предприятия, и предложены комплексные решения этих проблем.

РАЗДЕЛЕНИЕ СЕТЕЙ ВИРТУАЛЬНЫХ МАШИН НА ПРИМЕРЕ HYPER-V

Microsoft Hyper-V – это система аппаратной виртуализации, позиционируемая как промышленное решение для параллельной работы нескольких ОС на одном хост-сервере без потери производительности. Она основана на гипервизоре – программном обеспечении нижнего

уровня, напрямую взаимодействующем с аппаратными ресурсами и распределяющего их между гостевыми ОС, а также обеспечивающем изоляцию ОС друг от друга¹.

Популярности Hyper-V способствует ее бесплатность и высокая надежность – авторы этой статьи с 2011 года эксплуатируют в дата-центре Информационно-аналитического центра ФГУП ГосНИИ ГА отказоустойчивый кластер на основе Hyper-V [1] с гостевыми машинами на Windows Server 2018; Windows 7, 8, 10; Ubuntu Server и Debian Linux, и за восемь лет не сталкивались с какими-либо проблемами.

Система Hyper-V может быть развернута на хост-сервере в двух вариантах:

1) как отдельная система с интерфейсом командной строки, позволяющим произвести первоначальную настройку. Для последующего конфигурирования и администрирования требуется сторонний компьютер с ОС Windows и графической оболочкой;

2) как роль Windows Server 2008 (и более старших версий) или Windows 8 (и более старших версий, семейств Pro и Enterprise).

В статье описаны настройки и приведены снимки экрана Hyper-V, интегрированной в Windows Server 2008 и Windows 10. В этих версиях Hyper-V поддерживает три варианта подключения виртуальной машины к сети [2]:

- 1) внешняя сеть (External network);
- 2) внутренняя сеть (Internal network);
- 3) частная сеть (Private network).

Из перечисленных вариантов для решения поставленной задачи интересен только первый (*внешняя сеть*), поскольку *внутренняя сеть* предназначена для соединения виртуальных машин с хостом и не предусматривает подключения с физическими сетями, а *частная сеть* только связывает между собой виртуальные машины, изолируя их от хоста и физических сетей.

При выборе варианта *внешняя сеть* к физическому сетевому адаптеру хоста подключается драйвер, называемый виртуальным коммутатором [2], а в виртуальные машины и в управляющую операционную систему хоста устанавливаются виртуальные сетевые адаптеры, подключаемые к этому виртуальному коммутатору. С помощью стандартных интерфейсов ОС виртуальным сетевым адаптерам хоста и гостевых машин можно присвоить индивидуальные IP-адреса, маски подсетей и адреса шлюзов так, что эти адаптеры смогут работать в различных подсетях. При этом один порт физического сетевого адаптера хоста может по одному кабелю передавать TCP/IP-пакеты логически изолированных подсетей.

С выходом Windows Server 2012 в Hyper-V была добавлена поддержка технологии виртуализации сетей *Hyper-V Network Virtualization (HNV)* [3], обеспечивающей инкапсуляции сетевых пакетов виртуальных машин в сетевые пакеты хоста. Подобно технологии VPN (англ. *Virtual Private Network* – виртуальная частная сеть), HNV логически отделяет подсети виртуальных машин от подсетей хост-серверов. Это позволяет не только объединять в общую сеть виртуальные машины, физически размещаемые в разных дата-центрах, но и совершать динамическую миграцию работающей виртуальной машины из одного дата-центра в другой.

В Windows Server 2012 R2 технология виртуализации сетей была расширена возможностью передачи широковещательного (broadcast) и группового (multicast) трафика [4], позволившей использовать в виртуальных сетях серверы DHCP (англ. *Dynamic Host Configuration Protocol* – протокол динамической настройки узла), в результате чего виртуальная сеть своей функциональностью перестала уступать физической сети.

¹ Hyper-V – Википедия [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Hyper-V> (дата обращения: 03.03.2019).

Однако чем сложнее становится технология, тем больше потенциальных уязвимостей можно создать некорректной настройкой сети, если не знать в совершенстве тонкости настройки всего оборудования, задействованного при виртуализации сети. К тому же ряд инструментов, например свободно распространяемый корпорацией Microsoft программный анализатор сети *Microsoft Message Analyzer*², позволяет в случае получения потенциальными взломщиками доступа к узлу физической сети получить также доступ к трафику виртуальной сети [4].

Задача надежной изоляции подсетей виртуальной машины и хоста значительно упрощается, если один из физических сетевых адаптеров хоста напрямую привязать к виртуальной машине, задав требуемую конфигурацию сетевых протоколов и соединив разъем адаптера кабелем с коммутатором требуемой ЛВС. При таком подключении не потребуются перенастраивать коммутаторы и маршрутизатор, добавляя в них поддержку дополнительных технологий типа VPN и VLAN (англ. *Virtual Local Area Network* – виртуальная локальная компьютерная сеть, представляющая собой группу хостов, взаимодействующих так, как если бы они были подключены к широковебическому домену, независимо от их физического местонахождения).

Как правило, даже серверы начального уровня поставляются с двумя адаптерами, но если все адаптеры сервера уже задействованы в системе, то дополнительный несложно установить как плату расширения. Hyper-V поддерживает до 12 сетевых адаптеров на каждую виртуальную машину [5], поэтому со стороны программного обеспечения ограничений на количество адаптеров быть не должно.

На рис. 1 изображена схема сети предприятия, в которой виртуальный сервер, имеющий IP-адрес из диапазона адресов внешней (имеющей доступ в интернет через маршрутизатор) подсети ЛВС-1, физически размещен на хост-сервере внутренней (изолированной от интернета) подсети ЛВС-2.

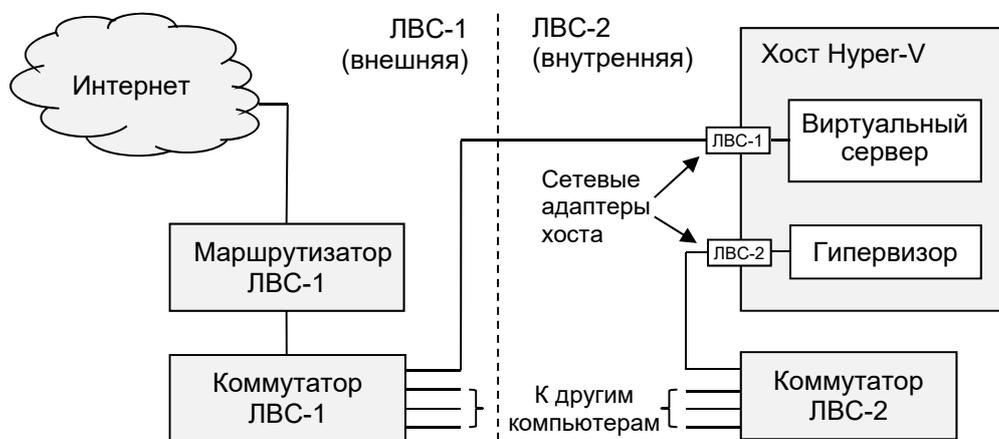


Рис. 1. Топология сети с виртуальным сервером Hyper-V
Fig. 1. Hyper-V virtual server network topology

В современных версиях Hyper-V виртуальные машины подключаются к сети через *виртуальные коммутаторы*, которые, в свою очередь, связываются гипервизором с физическими сетевыми адаптерами. Изображенную на рис. 1 архитектуру можно реализовать с помощью Hyper-V, выбрав режим *внешняя сеть* и создав виртуальный коммутатор согласно инструкции [6] с помощью интерфейса диспетчера виртуальных коммутаторов (рис. 2).

² Microsoft Message Analyzer Operating Guide [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/message-analyzer/microsoft-message-analyzer-operating-guide> (дата обращения: 03.03.2019).

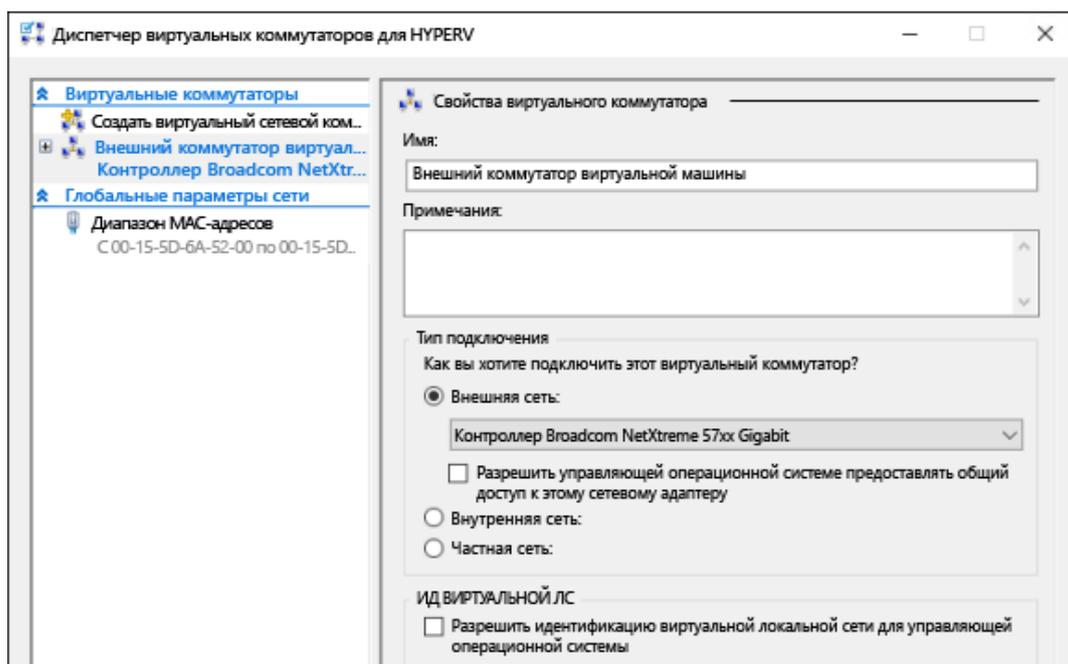


Рис. 2. Диспетчер виртуальных коммутаторов Hyper-V
Fig. 2. Hyper-V virtual switch manager

Условием для изоляции подсети виртуальной машины от подсети хоста является снятие флага «Разрешить управляющей ОС предоставлять доступ к этому сетевому адаптеру» (рис. 2).

В первых версиях Hyper-V (Windows Server 2008) настройка сети была организована иначе. Менеджер виртуальных сетей позволял создать виртуальную сеть (Virtual Network) и назначить ее выбранному сетевому адаптеру (рис. 3) посредством привязки к нему протокола *Microsoft Virtual Network Switch Protocol* (рис. 4). Полностью отвязать сетевой адаптер от хоста можно посредством снятия всех галочек напротив сетевых протоколов и служб в интерфейсе свойств сетевого адаптера (рис. 4).

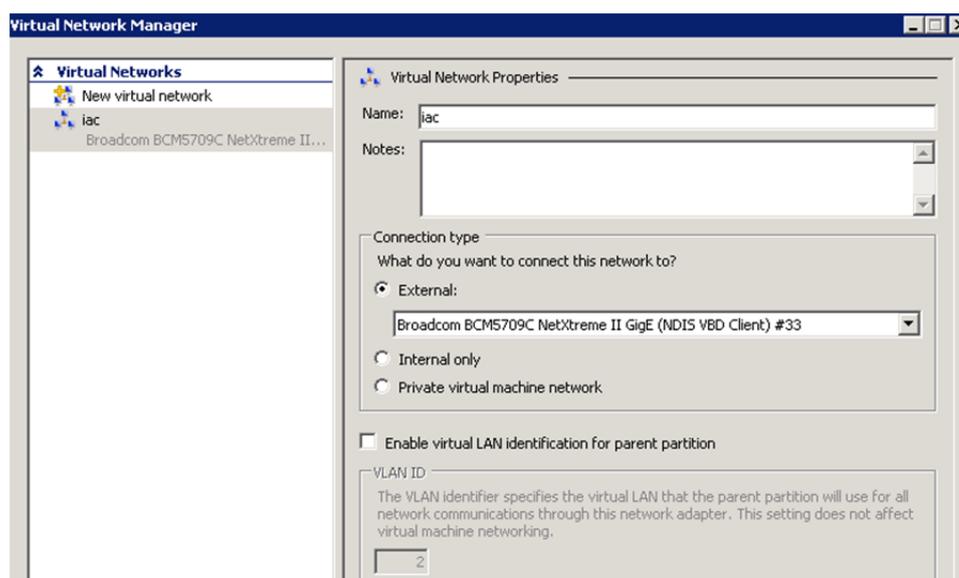


Рис. 3. Менеджер виртуальных сетей Windows Server 2008
Fig. 3. Virtual network manager of Windows Server 2008

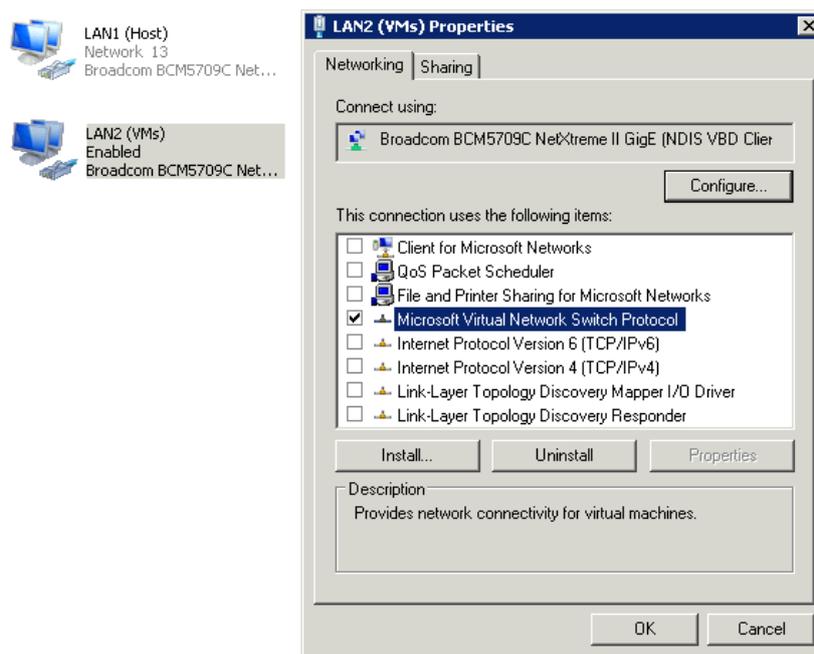


Рис. 4. Привязка протоколов и служб к сетевому адаптеру в Windows Server 2008
Fig. 4. Binding of protocols and services to a network adapter in Windows Server 2008

ПЕРЕДАЧА ФАЙЛОВ МЕЖДУ ХОСТОМ И ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНОЙ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТИ

На предприятиях, имеющих разделение сети на два изолированных сегмента, может возникнуть необходимость передачи данных между внешним миром и сервером, расположенным во внутренней, изолированной от интернета сети. Такой случай возможен, если информационная система предприятия, развернутая на сервере внутренней сети, не может функционировать без данных, регулярно предоставляемых информационными системами клиентов предприятия.

С помощью криптографических средств можно обеспечить достаточную надежность идентификации отправителя и получателя, а также защитить передаваемые данные от перехвата и подмены. В частности, авторами статьи была разработана система автоматизированной передачи данных по защищенному каналу между несколькими информационными системами [7]. Однако в рассматриваемой архитектуре сети предприятия проблематична передача данных между внешней и внутренней ЛВС при условии соблюдения требования изоляции ЛВС на сетевом уровне.

Пропуск сетевых пакетов между ЛВС чреват тем, что потенциальные взломщики могут сгенерировать такие пакеты, которые могут:

- помочь злоумышленникам определить топологию внутренней сети;
- использовать уязвимости типа переполнения буфера;
- нести в себе команды, интерпретируемые и исполняемые сетевыми устройствами;
- нести в себе несанкционированно извлекаемые из внутренней сети данные.

Поскольку рассматриваемые информационные системы должны обмениваться исключительно файлами (а не командами), то решить задачу их безопасной передачи между сегментами сети можно, отказавшись от сетевых пакетов в качестве носителей данных и передавая непосредственно файлы через внутреннюю шину системы виртуализации.

Возможность двухсторонней передачи файлов между виртуальными машинами и хостом реализована для систем виртуализации, ориентированных на рабочие станции (настольные компьютеры, ноутбуки). В промышленных системах виртуализации такие решения не востребованы, поскольку гостевым виртуальным машинам нет необходимости обмениваться файлами с хостом, и такой обмен нарушил бы концепцию разграничения доступа к файлам с контролем учетных записей пользователей и списков доступа прав файлов, особенно если виртуальная машина и хост работают на разных платформах (Windows, Linux). Поэтому в промышленных решениях виртуализации передача файлов базируется на встроенных в операционные системы сетевых протоколах прикладного уровня для удаленного доступа к файлам:

- CIFS (Common Internet File System);
- SMB (Server Message Block);
- NFS (Network File System).

Справедливости ради, следует отметить, что Hyper-V способна передавать файлы с хоста внутрь виртуальной машины, используя сервисы интеграции Linux (англ. Linux Integration Services, LIS) [8], но невозможность передачи файлов из виртуальной машины на хост не позволяет решить поставленную задачу.

Передача и обработка данных, описанная в [7], выполняется автоматизированно, без участия операторов, гарантируя, что обменные файлы никогда не будут переданы на выполнение командному интерпретатору. Содержимое полученных обменных файлов будет рассматриваться обрабатывающими программами исключительно как структурированные данные, извлекаемые из файла по заранее определенным шаблонам. Даже если в обменный файл попадет тело вируса, то оно не будет извлечено, так как не будет соответствовать шаблону. При таких условиях отсутствие контроля прав доступа для файлов, передаваемых между виртуальными машинами и хостом, не является критичным для безопасности информационной системы.

Таким образом, обмен данными с другими информационными системами можно реализовать, если вынести в отдельную виртуальную машину сервер, принимающий и передающий данные через интернет по криптозащищенным каналам, и соединить его с сервером информационной системы на файловом уровне с помощью шины системы виртуализации.

Поскольку такой сервер будет наделен весьма ограниченным набором функций, он может быть реализован на компактной сборке Linux без графической оболочки, что делает сервер нетребовательным к ресурсам, позволяя запускать его в любых системах виртуализации, поддерживающих передачу файлов между хостом и виртуальными машинами, в том числе в системах, основанных на эмуляторах. ПО виртуализации, относящееся к классу эмуляторов, работает поверх существующей ОС компьютера-хоста и предоставляет ресурсы компьютера в пользование гостевым виртуальным машинам. Несмотря на то что скорость работы гостевых ОС может незначительно снижаться по сравнению с виртуализацией на базе гипервизора, эмуляция позволяет более гибко настраивать различные методы предоставления ресурсов хоста гостевым ОС, в том числе создать общую для разных ОС файловую папку.

К системам виртуализации, поддерживающим обмен файлами через общую папку, относятся VMware Workstation [9] и Oracle VM VirtualBox³. Первая является платной (лицензия стоит порядка \$300), а вторая – бесплатная в версии, функциональности которой хватает для решения поставленной задачи, поэтому ниже будет рассмотрено использование виртуальной машины VirtualBox для организации файлового шлюза между хостом и гостевой машиной с одновременной изоляцией сетей, к которым эти машины подключены.

³ VirtualBox – Википедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/VirtualBox> (дата обращения: 03.03.2019).

ИЗОЛЯЦИЯ СЕТЕЙ И ПЕРЕДАЧА ФАЙЛОВ НА ПРИМЕРЕ VIRTUALBOX

Отличительной способностью ПО VirtualBox является его полная кроссплатформенность – в роли гостевой и хостовой ОС могут выступать практически все распространенные ОС в любой комбинации. VirtualBox имеет развитые средства конфигурирования (настраивать виртуальные машины и управлять ими можно как через графическую оболочку, так и утилитами командной строки) и предоставляет пять вариантов сопряжения подсетей гостевой и хостовой ОС [10], а также общую папку (англ. *Shared Folder*) для совместного доступа к файлам.

На рис. 5 изображена схема сети предприятия с использованием VirtualBox для размещения виртуального сервера, обменивающегося файлами через интернет с другими информационными системами по алгоритму [7], а также обменивающегося файлами через общую папку с сервером информационной системы предприятия, находящимся во внутреннем изолированном сегменте сети.

Из пяти вариантов настроек сети [10] изоляцию подсетей гостевой и хостовой ОС обеспечивает режим *Сетевой мост* (Bridged Networking). В случае использования Windows в качестве ОС хоста, VirtualBox создает в системе виртуальный сетевой адаптер и связывает его с физическим адаптером привязкой драйвера *VirtualBox NDIS6 Bridged Networking Driver* к виртуальному и физическому адаптерам (рис. 6).

В случае если компьютер имеет единственный сетевой адаптер, то ему присваивается сразу два MAC-адреса (от англ. *Media Access Control* – уникальный идентификатор, присваиваемый каждой единице активного оборудования в сетях Ethernet), благодаря чему физический адаптер представляется в сети как два независимых устройства, каждому из которых можно предоставить собственный IP-адрес с индивидуальными масками подсети, адресами шлюза и адресами DNS-серверов.

Если такой компьютер подключен к сети через коммутатор, не фильтрующий сетевые пакеты по IP-адресам, то одним физическим кабелем можно подключить хост и виртуальную машину сразу к двум сегментам сети.

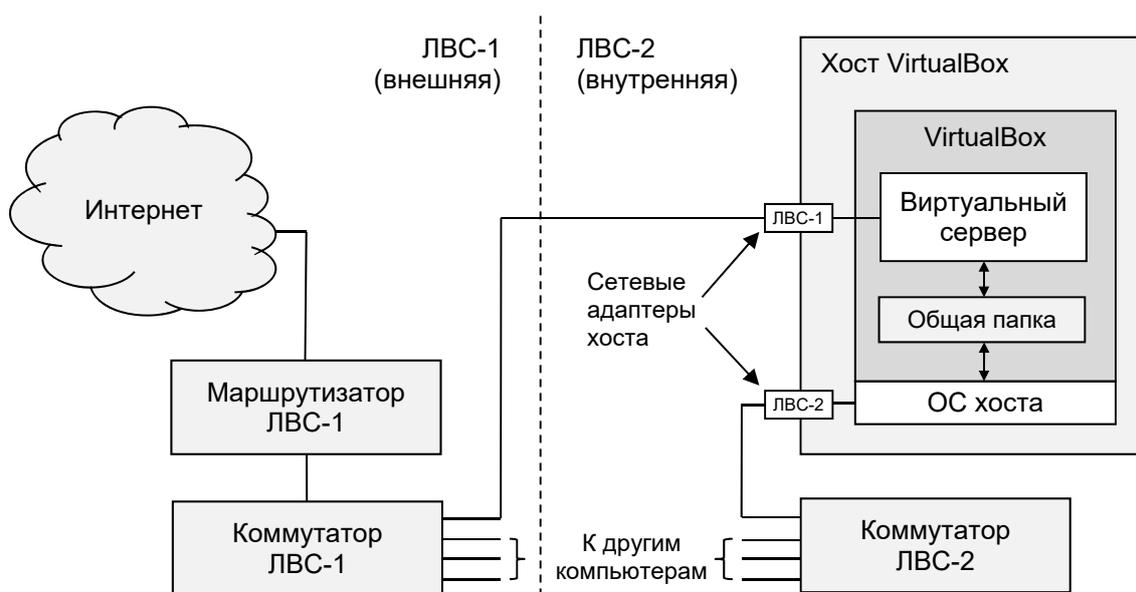


Рис. 5. Разделение сетей посредством VirtualBox

Fig. 5. Network separation using VirtualBox

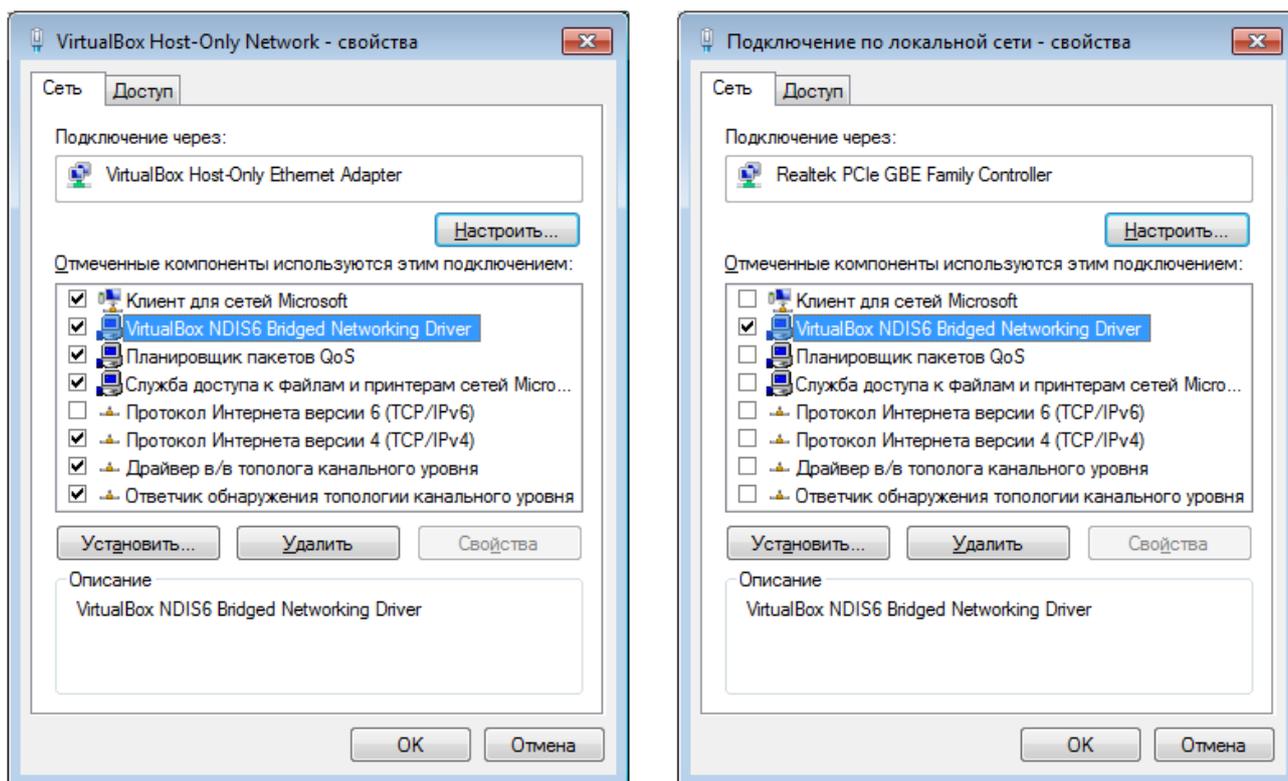


Рис. 6. Привязка протоколов и служб к сетевым адаптерам VirtualBox
Fig. 6. Binding of protocols and services to network adapters of VirtualBox

Однако, как и в случае рассмотренного выше метода подключения к сети виртуальных машин Nurer-V, нам интересен вариант с использованием двух сетевых адаптеров. Как показали натурные испытания, проведенные авторами статьи, VirtualBox позволяет полностью изолировать виртуальную машину от подсети хоста, если в настройках одного из двух сетевых адаптеров отключить привязку к нему всех протоколов и служб, за исключением *VirtualBox NDIS6 Bridged Networking Driver*.

Таким образом, VirtualBox позволяет обеспечить как изоляцию виртуального сервера на сетевом уровне, так и связывание на уровне файловой системы подключенного к интернету виртуального сервера сервиса обмена файлами с основным сервером информационной системы, расположенной во внутренней сети предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеописанное решение задачи размещения связанных серверов в изолированных подсетях не является единственно возможным – тот же результат можно получить и другими способами, например с помощью использования технологий маркирования сетевых пакетов (VLAN) или их инкапсуляции (GRE, VPN). Но такие решения требуют настройки всего сетевого оборудования высококвалифицированными специалистами по сетям.

Предлагаемое же в статье решение с использованием дополнительного сетевого адаптера и кабеля не требует от подключающего сервер инженера навыков и знаний, выходящих за рамки уже используемых в сети предприятия технологий, поэтому новый сервер может быть подключен к сети штатным персоналом предприятия, что особо актуально для режимных предприятий, в которых привлечение сторонних специалистов весьма проблематично.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кирпичев И.Г., Благоразумов А.К.** Защита данных Информационно-аналитической системы мониторинга летной годности воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2012. № 2. С. 37–43.
2. **Уваров А.С.** Настраиваем сеть в HyperV. [Электронный ресурс]. «Интерфейс» Технический блог. URL: https://interface31.ru/tech_it/2014/01/nastraivaem-set--v-hyper-v.html (дата обращения 03.03.2019).
3. **Шаповал А.** Виртуализация сети в Hyper-V. Концепция. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/company/microsoft/blog/173159/> (дата обращения: 03.03.2019).
4. **Шаповал А.** Виртуализация сети в Hyper-V. Что нового в Windows Server 2012 R2? [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/company/microsoft/blog/209684/> (дата обращения: 17.10.2018).
5. **Хабаров Д.** Понимание виртуальных сетей в Microsoft Hyper-V – Microsoft TechNet [Электронный ресурс]. URL: https://blogs.technet.microsoft.com/ru_forum_support/2010/09/10/microsoft-hype/ (дата обращения: 03.03.2019).
6. **Cooley S.** Создание виртуальной сети – Microsoft Docs [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/virtualization/hyper-v-on-windows/quick-start/connect-to-network> (дата обращения: 03.03.2019).
7. **Благоразумов А.К., Кирпичев И.Г.** Автоматизация информационного обмена в Информационно-аналитической системе мониторинга лётной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. №163. С. 204–209.
8. **Siron E.** 4 Ways to Transfer Files to a Linux Hyper-V Guest. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altaro.com/hyper-v/transfer-files-linux-hyper-v-guest/> (дата обращения: 03.03.2019).
9. **Семин И.** Как создать общую папку между физическим компьютером и виртуальной машиной на VMware workstation 11. [Электронный ресурс]. URL: <http://pyatilistnik.org/kak-sozdat-obshhuyu-papku-mezhdu-fizicheskim-kompyuterom-i-virtualnoy-mashinoy-na-vmware-workstation-11/> (дата обращения: 03.03.2019).
10. **Smeets M.** VirtualBox networking explained. [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.amis.nl/2018/07/27/virtualbox-networking-explained> (дата обращения: 03.03.2019).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Благоразумов Андрей Кириллович, начальник группы Информационно-аналитического центра, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», blagorazumov@mlgvs.ru.

Кирпичев Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, i.kirpichev@mstusa.aero.

Петров Дмитрий Владимирович, ведущий инженер-программист, ПАО «Научно-производственное предприятие «Аэросила», petrovbox@gmail.com.

ISOLATION OF CORPORATE LOCAL AREA NETWORKS USING SERVER VIRTUALIZATION

Andrey K. Blagorazumov¹, Igor G. Kirpichev², Dmitry V. Petrov³
¹*The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*
²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*
³*PJSC Scientific Production Enterprise "Aerosila", Stupino, Russia*

ABSTRACT

Secure enterprises have Local Area Networks (LANs) that store and process sensitive data that should not be accessed from outside. At the same time, no modern enterprise can successfully function without a LAN which provides the Internet access for the computers of the sales department, technical support service and E-mail server. In order to ensure information security, these two network segments are usually physically isolated from each other by means of exception of any cable interconnections. Enterprises with high demands for server uptime use server virtualization, which requires connecting physical servers to disk storage of virtual server image files. When highly reliable servers are needed only in one of two independent corporate network segments, the cost of creating such a server cluster is reasonable and fast paying off. But when a company encounters the need to place a small but highly reliable server into another network segment, the following problem arises: only server cluster with expensive components can provide the required reliability, but to solve the tasks assigned to the new server, the cluster computing capacity would be too high, and deploying of a cluster would be extremely costly and economically unjustified. On the other hand, the required computing capacity for a new server would be taken from the existing server cluster by creating a new virtual server without any expenses. However, in such case it is necessary to ensure isolation of the new virtual server from the network segment the physical hosts servers are connected to. The article examines the methods of configuring the LAN that allow to isolate virtual and physical servers at the network level. The authors also consider the episode when it is necessary to transfer files between the two computers located in the LAN segments isolated from each other and gives the appropriate solution.

Key words: local area network, LAN, virtualization, Hyper V, VirtualBox.

REFERENCES

1. Kirpichev, I.G. and Blagorazumov, A.K. (2012). *Protection of data in the information analysis system for aircraft airworthiness monitoring*. Scientific Herald of the State Research Institute of Civil Aviation, 2012, no.2, pp. 37–43. (in Russian)
2. Uvarov, A.S. *Nastraivaem set v Hyper-V* [Configuring the network in Hyper-V]. Available at: https://interface31.ru/tech_it/2014/01/nastraivaem-set--v-hyper-v.html (accessed 03.03.2019). (in Russian)
3. Shapoval, A. *Virtualizatsiya seti v Hyper-V. Kontseptsiya* [Network virtualization in Hyper-V. The Concept]. Available at: <https://habr.com/company/microsoft/blog/173159/> (accessed 03.03.2019). (in Russian)
4. Shapoval, A. *Virtualizatsiyaseti v Hyper-V. Chto novogo v Windows Server 2012 R2?* [Network Virtualization in Hyper-V. What's new in Windows Server 2012 R2?]. Available at: <https://habr.com/company/microsoft/blog/209684/> (accessed 03.03.2019). (in Russian)
5. Khabarov, D. *Ponimanie virtualnykh setey v Microsoft Hyper-V Microsoft Tech Net* [Understanding of Microsoft Hyper-V Virtual Networks Microsoft Tech Net]. Available at: https://blogs.technet.microsoft.com/ru_forum_support/2010/09/10/microsoft-hype/ (accessed 03.03.2019). (in Russian)
6. Cooley, S. Create a virtual network – Microsoft Docs. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/virtualization/hyper-v-on-windows/quick-start/connect-to-network> (accessed 03.03.2019).
7. Blagorazumov, A.K. and Kirpichev, I.G. (2011). *Automation of Data Exchange in the Information Analysis System for Aircraft Airworthiness Monitoring*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no.163, pp. 204–209. (in Russian)

8. **Siron, E.** 4 ways to transfer files to a Linux hyper v guest. Available at: <https://www.altaro.com/hyper-v/transfer-files-linux-hyper-v-guest/> (accessed 03.03.2019).

9. **Semin, I.** *Kak sozdat obshchuyu papku mezhdu fizicheskim kompyuterom I virtualnoi mashinoy na VMware workstation 1.* [How to create a shared folder between a physical computer and a virtual machine on VMware workstation 11]. Available at: <http://pyatelistnik.org/kak-sozdat-obshchuyu-papku-mezhdu-fizicheskim-kompyuterom-i-virtualnoy-mashinoy-na-vmware-workstation-11/> (accessed 03.03.2019). (in Russian)

10. **Smeets, M.** Virtual Box networking explained. Available at: <https://technology.amis.nl/2018/07/27/virtualbox-networking-explained> (accessed 03.03.2019).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey K. Blagorazumov, Head of Group of the Information Analysis Center of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, blagorazumov@mlgvs.ru.

Igor G. Kirpichev, Doctor of Technical Sciences, Professor of Technical Operation of Aircraft and Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, i.kirpichev@mstuca.aero.

Dmitry V. Petrov, Senior Software Engineer, PJSC Scientific Production Enterprise "Aerosila", petrovbox@gmail.com.

Поступила в редакцию 24.03.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 24.03.2019
Accepted for publication 14.11.2019

UDC 378.046.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-112-124

INFORMATION TECHNOLOGIES – BASIS OF TRAINING, RETRAINING AND ADVANCED TRAINING SYSTEMS FOR HELICOPTER PILOTS

YU.A. BORISOV¹, P.N. RYBKIN¹, YU.M. CHINYUCHIN²

¹*Joint Stock Company "SPARK", Saint-Petersburg, Russia*

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

In the early 90s there was a need for the complex development of training, retraining, maintaining and professional development system designed for the most popular Mi-8 helicopter pilots oriented at modern information technologies. The system covers all the stages of pilot training, starting with the initial stages of professional activity up to its completion. The technical means compiling specifications for the whole range training were determined by the results of the pilot in-flight activity analysis. The proposed optimal range of technical facilities for training consists of technical means with different levels of out-of-cockpit and in-cockpit environment simulation. The utilization of these means allows to minimize the expenditures on proficiency level support and cost of pilot training. The set of technical training appliances such as: automated training courses of theoretical disciplines, computer functional and situational simulators, navigation simulators and flight complex simulator includes the facilities that provide training of the pilot actions at each stage of the flight. The individual schedule of computer based self-development classes is drawn up for each student. While compiling the individual schedule logical sequence of all training stages was carefully observed: firstly we begin with a thorough study of helicopter structure, then goes the study of functional system or equipment normal operation, functional system or equipment in special situations operation, and finally, the routine technology of crew operation in normal flight conditions and the crew actions in dangerous and emergency situations. In addition to the direct training of students, the initial stage of training solved the tasks of practical check and improvement of previously taken decisions.

Key words: educational technologies, computer-based training, automated training courses, functional and situational simulators, flight simulator.

INTRODUCTION

In the conditions of the Russian Federation with its vast territories and lack of a developed network of highways, helicopter aviation has become one of the most important factors in the further development of distant regions of the North and Siberia, which are rich in natural resources. In addition to transporting work in the undeveloped regions, modern helicopters do a good deal of so-called aviation work: oil and gas pipelining, power poles installing, forests conservation, forest fires suppression and so on.

One of the steady requirements to the civil helicopter aviation is the insurance of flight safety. The safety of flights is determined by two main factors: the technical condition of helicopters and the professional qualification of the flight crew.

Unfortunately the system of flight qualification maintenance of civil helicopter pilots, inherited by Russia after the collapse of the USSR, is morally and physically outdated and did not meet the requirements of domestic and international regulations. Flight simulators which existed at that time were based on an outdated element base. There was no systematic approach to the pilot's entire "professional life" support, beginning with the basic training up to the termination of flight activity or retirement. Modern training technologies were not used in practice [1, 2].

There was a need for the complex development of training, retraining, maintaining and professional development system for helicopter pilots based on modern information technologies. The staff of the ATC (aviation training center) of JSC "SPARK" set a task-to create a similar system for the pilots of the Mi-8 helicopters – the family which is very popular and widespread (about 3000 helicopters of different modifications of this family are operated in Russia and in foreign countries) [3].

The system of training, maintenance and professional skills improvement of helicopter pilots which is being developed is focused on the use of new training tools and technologies (hereinafter the System), should cover all the stages of pilot professional training activity, beginning with its initial training to its completion. The overall structure of the System is shown in Figure 1.

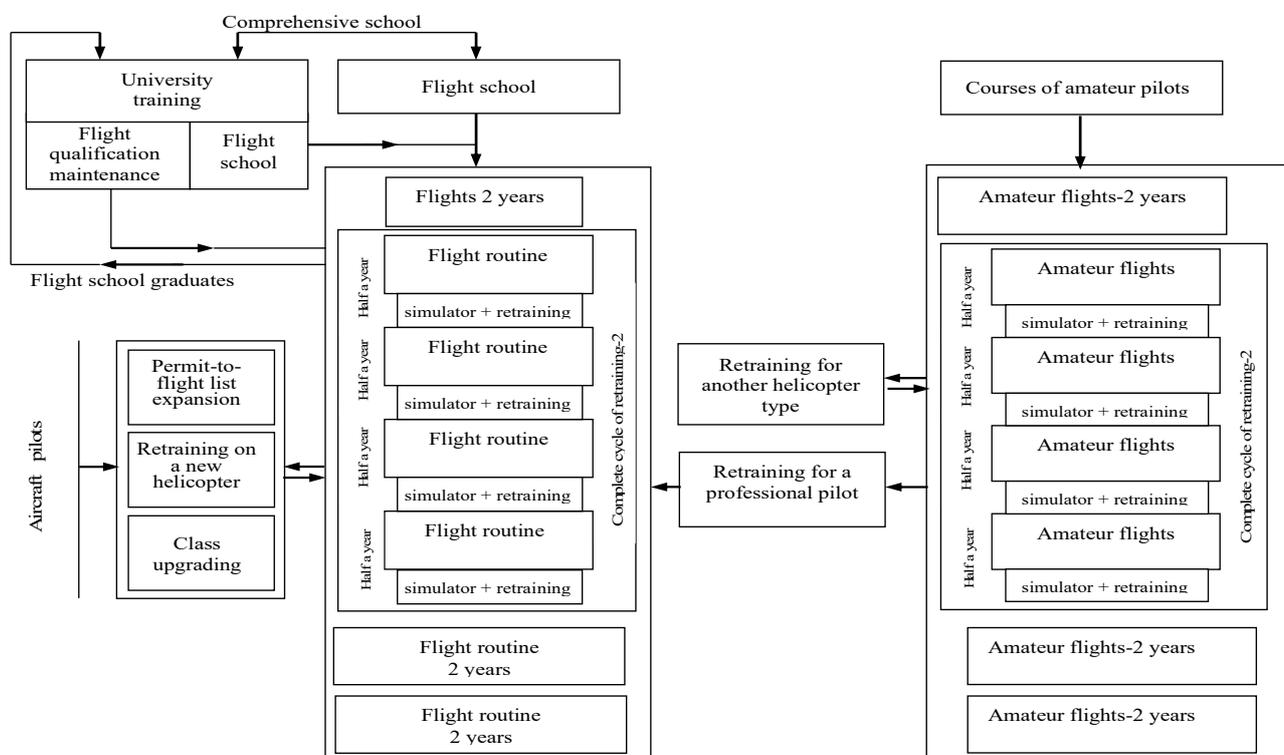


Fig. 1. The structural System of training, maintenance and professional development for helicopter pilots (in 2010, the full cycle of the refresher courses was cut up to 1 year)

The basic principles laid down in the System being developed are:

- Curriculums for all stages of the System are interconnected, focused on the perspective educational techniques and exclude duplication.
- The optimal set of training tools is determined for each level of the System. The set takes into account the individual characteristics of the organizational forms of the stages and ensures the link goal achievement in the shortest time and with minimal economic costs.
- Educational means are based on the present-day educational technologies using the wide range of computer technology.

The requirements for the formation of technical means of training were determined according to the pilot in-flight action results analysis. The pilot's actions, as the operator of flying object, are represented by the list of "homogeneous" tasks solved by him at different stages of the flight:

- 1) visual and instrumental detection of the helicopter setting in the air;
- 2) the impact on the controls for changing (maintaining) the position of the helicopter in space;
- 3) search of instrument readings and evaluation of the helicopter functional systems;
- 4) the control of the helicopter functional systems and AEE (aviation and electronic equipment);
- 5) the solution of navigational problems and setting up navigation equipment;
- 6) radio communication;
- 7) the solution and implementation of results of specific tasks during the flight routine.

In the course of taking solution for each of these tasks, the pilot uses the informational data obtained from the analyses of out-of-cockpit and (or) in-cockpit situation, however, each task requires different amount of this information.

The proposed optimal range of technical means of training consists of technical facilities with different scopes of out-of-cockpit and in-cockpit environment simulation.

This allows us to minimize the expenses for preparation and pilot professional skills support. The less is the scope of out-of-cockpit and in-cockpit environment simulation, the cheaper and more affordable are the technical means of training and coaching.

Therefore, it is reasonable to point out the stages of the pilot whole qualification training and maintenance process which are directed at a specific class of technical means:

1. The stage of theoretical disciplines. The technical means used at this stage are not connected with the simulation of any flight conditions. Separate fragments of the out-of-cockpit and (or) in-cockpit environment can be used as well as any other illustrations (drawings, diagrams, etc.).

2. The stage of professional training with the simulation of minimal required actual effects impact volume.

3. The stage of professional training with such volume of simulation influences that allows you to consider the conditions of training to be close to flight conditions.

4. The stage of professional training with simulation of flight conditions in full.

5. The stage of professional training in real flight conditions.

The set of technical training tools includes the tools which train the pilot to act at each stage of the flight:

– The stage of theoretical training – automated training courses (ATC) of relevant disciplines make use of means with video and audio information, animation, film fragments and other modern media.

– Display functional and situational simulators are used for the stage of professional training which requires the minimal volume of impact simulation. Functional simulators are designed to work out the actions aimed to control functional systems and AEE (aviation and electronic equipment).

– Situational simulators are aimed for practicing the actions in difficult and emergency situations. The simulators provide the possibility of practicing individual actions and actions as a member of the crew.

– The cockpit simulators without visualization and navigation (display or screen), with incomplete and simplified visualization of out-of-cockpit space are used at the stage of professional training with imitation of such an exposure that allows to consider training conditions to be close to the flight ones.

– The equipment used for the stage of professional training of the real flight simulation is a combined flight simulator with a fixed platform and a combined flight simulator with a mobile platform.

– The stage of professional training in real conditions takes place in training flights on a real helicopter.

– The structure and the content of each technical device is determined by the need for it at different stages of the training process aimed at retraining the pilot to operate helicopter and further maintenance of the pilot's professional skills. The distribution of the material being studied between the computer training products is made as a result of the detailed analysis of each topic.

In order to approximate the flight conditions on the simulator to the conditions of a real flight, aircraft flight simulators are equipped with a mobility system allowing us to simulate overloads which occur during the normal operating conditions of aircraft. But the simulator mobility system makes the cost of the simulator several times more expensive and consequently, the cost of the flight hour of the simulator as well.

A very important characteristic of the MI-8 helicopters family flying simulators which are wide-spread and popular in Russia is its price. At the same time, the Mi-8 civil helicopter is not designed for maneuvering flights. Calculations have shown that while accelerating and braking according to the flight operating manual horizontal overload equals to 0.17...0.26, and the overload for the helicopter Mi-8MTV normalized turn with a maximum roll angle of 45 degrees equals to 1.41.

On the basis of the research work [4] devoted to the influence of overloads upon operating capacity of the pilot it is possible to draw a conclusion that in-flight overloads effecting on the pilot of the civil Mi-8MTV helicopter do not give any negative impact on the pilot's working capacity. This justifies the choice of flight complex simulator with a fixed cockpit for creating the first stage of the System.

AUTOMATED TRAINING COURSES FOR THE STUDY OF GENERAL AVIATION DISCIPLINES AND DISCIPLINES OF A PARTICULAR HELICOPTER

The following requirements provided the basis of general aviation disciplines development [5, 6, 7]:

1. To provide the students with opportunity to study general aviation disciplines in two modes: in the mode of consecutive study with the use of hyperlinks and explanation and in the mode of a directory with an independent choice of the required material volume.

2. To outline the training material so that the basic provisions of the disciplines included in the scope of the training material are identified without breaking the sequence of the whole material presentation.

3. The Structure of the automated training courses in disciplines should provide an opportunity to edit existing fragments and add new fragments to the program without taking much time and resources.

In the process of designing disciplines for a particular aircraft, the requirements for the volume and depth of knowledge for each crew member in accordance with the flight operations manual were taken into account¹. The automated training course "Mi-8, Mi-8MTB, Mi-8AMT (M17) helicopters structure and flight operation" is a redesigned course for computer presentation giving a detailed description of the helicopter construction, its systems and instruments. The course is illustrated with photos and three-dimensional computer graphics of general views of helicopters, their units, assemblies and components, systems structural schemes, cutaways and in-depth details. As an example you can see two fragments of this course in Figure 2.

An important element of computerized learning system is the programs which help to control the students' material acquisition.

In the system of computer-based training intermediate and final controls are carried out by means of computer testing programs using test tasks [8, 9]. While designing test assignments for general aviation disciplines (GAD) and disciplines of a particular helicopter (DPH) the choice was made in favor of the closed-type tasks on the level of "Knowledge", "Understanding", "Analysis", "Synthesis".

The developed test kits on the disciplines in the mode (graphics + question + supposed answers) were analyzed with the aim to determine the characteristics and to establish compliance of these characteristics with the indicators adopted in the theory of testometrics.

While assessing the professional knowledge of helicopter pilots, the peculiarities of the pilots' professional activities were taken into account. The helicopter crew is the last and most important link in the chain of ensuring flight safety. In all the amount of knowledge that pilot should possess there is the knowledge that directly affects the flight safety. The pilot must possess this knowledge by all

¹ The manual on flight operation of the Mi-8MTV helicopter. Moscow, 1994.

means. With the experts' aid the test tasks which directly effect the flight safety were selected from the discipline test set.

Another important moment in the process of helicopter pilot knowledge control is the limited time for test performance.

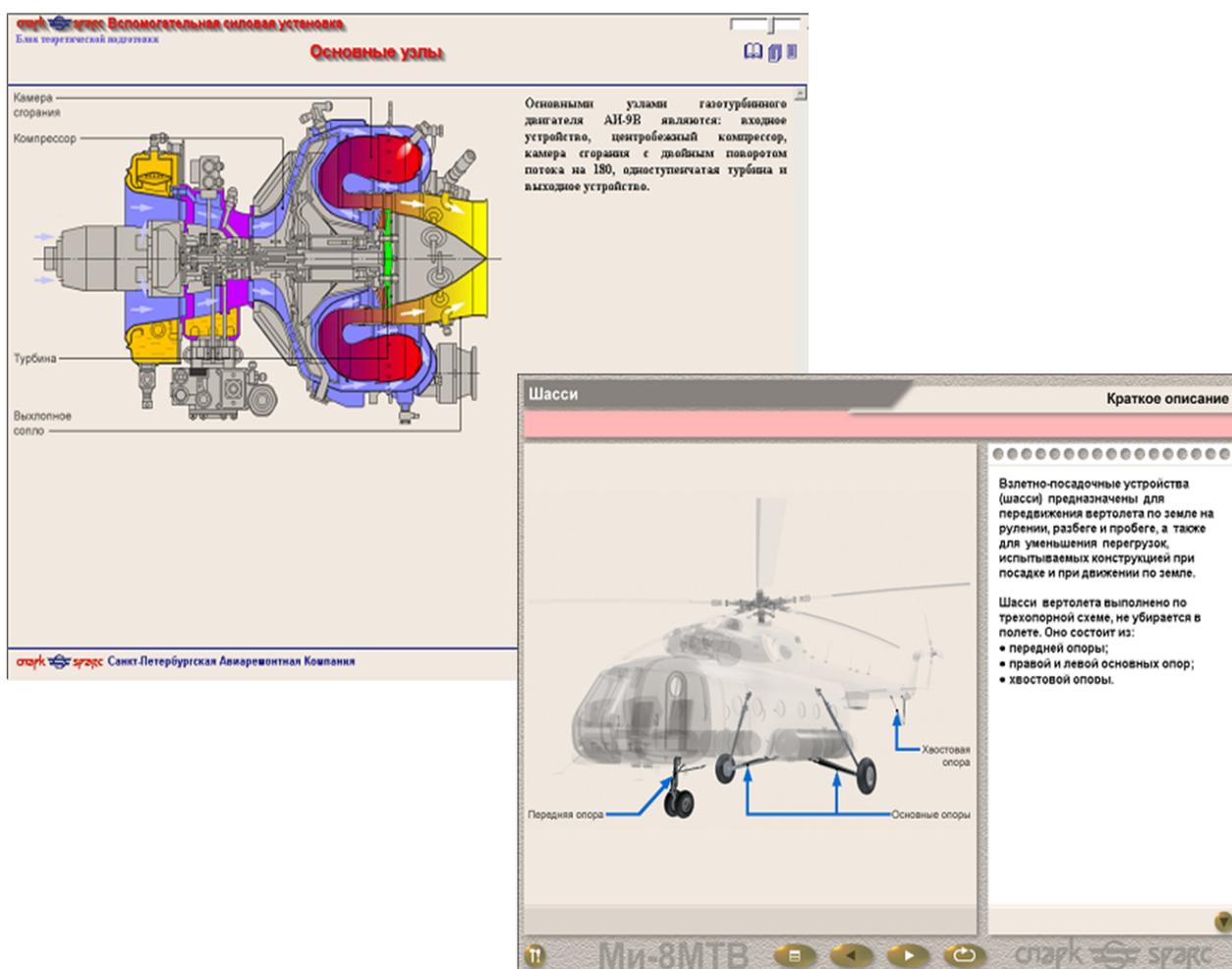


Fig. 2. Automated training courses "Mi-8, Mi-8MTV, Mi-8AMT (M 17) helicopters structure and flight operation"

COMPUTER FUNCTIONAL AND SITUATIONAL SIMULATORS

Computer functional and situational simulators are designed to teach pilots how to control functional systems, air navigation and radio electronic equipment in normal flight situations, complex and emergency situations. Functional simulators are designed for working off the actions aimed at checking the operation of functional systems, basically, during the pre-flight training period. Each crew member works off his actions in emergency situations on situational simulators in accordance with the flight operations manual (FOM).

The information necessary for practicing on simulator is sent to the trainee via the display which shows the fragments of instrument panel with controls of the system as well as instruments and displays demonstrating the system operation. The fragments are located on the background of the helicopter cabin indicating their place on the dash board. The information presented on the display can be

static (the position of toggle switchers, knee switchers and other controls), dynamic discrete (ignition and extinction of the indicator board and warning lights) and dynamically continuous (readings of pointer instruments and digital indicators (figure 3) [10].

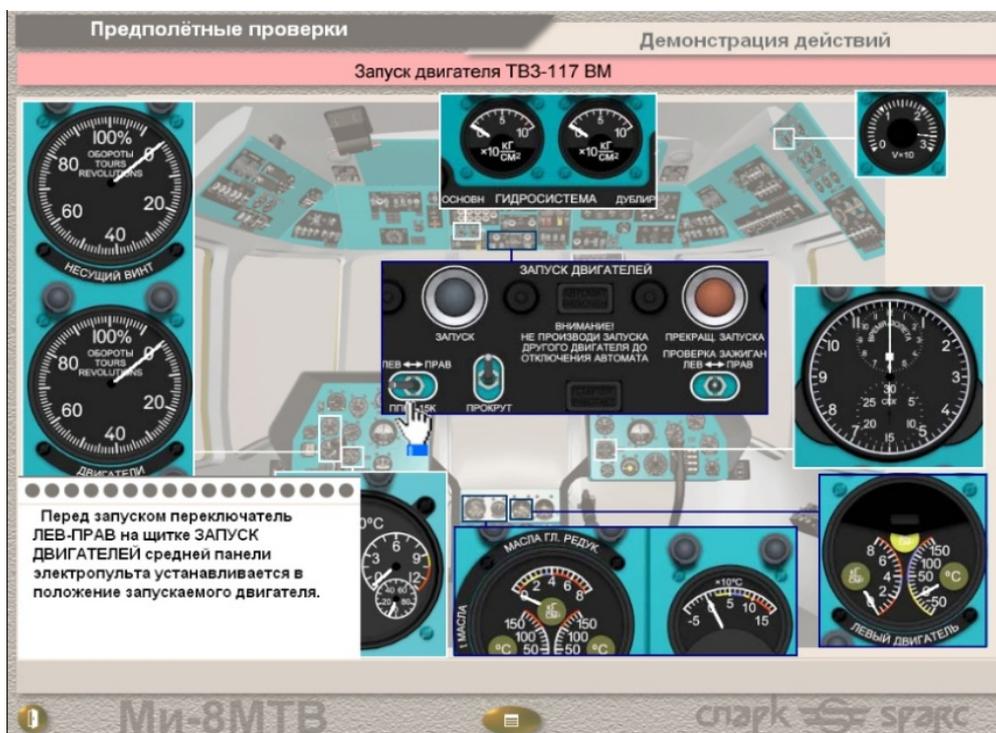


Fig. 3. Simulator "Engine TV3-117BM starting up"

In addition to visual information the pilot perceives audio information as well. It can be the sound of units in operation, reports and communication of the crew members, call-signals of radio stations, orders and air traffic controllers' information. The necessary sound information is simulated and issued to the pilot at the right moment either through the headphones or through the computer speaker.

For each test and for each situation two computer products are developed: DEMONSTRATION and TRAINING ones.

DEMONSTRATION is a passive narration (text or audio) about the sequence of actions aimed at checking the system with the display of controls and controls of the operating system on the fragments of dash boards, with the display of controls when the system is inoperative, with the display of the steps preventing the system from failure if a problem is detected.

TRAINING is an interactive computer simulator. The trainee interacts with the active zones on the computer display, changes the location of the functional system controls in the sequence recommended by the flight operations manual (FOM), monitors the readings of the system controls and draws conclusions about its operability.

Computer simulator is the device developed for training therefore, the principle of giving immediate information to a trainee about the error he has made has been the basic. If the error is not crucial the trainee is offered to amend it (the hint may be given) and continue working on the simulator. If the error is vital the simulation is stopped and the task is regarded to be undone.

All the trainees' actions are strictly evaluated. According to the results of the trainee's performance the protocol is formed. The grading scale is designed in a way that any serious error leads to an unsatisfactory result.

NAVIGATIONAL SIMULATOR

This is the simulator for practicing navigational tasks using both cabin navigational and ground based navigational tools. The visualization system for solving navigational problems ensures compliance of three main requirements: it shows the space along the routes that are programmed in the exercises, plausible flight dynamics (horizontal flight speed, turning rate, vertical speed), the real location of ground radio navigation aids. The simulated cockpit instrumentation corresponds to the real aviation and radio electronic equipment of the helicopter. Helicopter control simulators are used to change the mode of flight (figure 4). Naturally, the training of navigation tasks performance on a simulator with a limited scope of use (navigation simulator) is much cheaper than practicing these tasks on a complex flight simulator.



Fig. 4. The general view of navigational simulator

A real polygon on which navigational exercises were supposed to be performed was chosen in order to form the stage. Operating landmarks and operating ground-based radio navigation aids have been located along the proposed routes. The visual display system allows the trainee-pilot to observe the flight from the cockpit in any of the eight directions (figure 5).



Fig. 5. View from the cab in the forward direction (left)

The dashboard is displayed at the bottom of the screen when the direction of observation is forward. Part of the equipment placed on additional dashboards can be used by the request of the trainee. You can minimize the additional equipment panels to maximize your visibility. It is possible to monitor the flight from any point outside the cockpit, including in the "repeat" mode.

COMPLEX FLIGHT SIMULATOR

The most important link in the helicopter pilot training process is the complex flight simulator [11]. Due to a number of reasons peculiar to the end of the 90s, it was decided to develop complex flight simulator Mi-8MTV with a fixed cockpit.

Mathematical models and generators of simulation impacts are implemented in the computer complex of the simulator. These are: models of helicopter flight dynamics, models of engines and auxiliary power plant, models of helicopter systems and equipment, model of flight range, models of climatic, temporal and meteorological flight conditions. To control various devices of flight conditions simulation, generators of simulation actions which work together with mathematical models in a computer complex are implemented. These are: external environment generators, forming frames for projectors, generators of vibration effects, in-cab acoustic generators, simulating the sounds of constantly operating engines, propellers, equipment, etc. and the sounds audible at the moments of one-time events like touching the ground by the helicopter landing gear during landing, etc., generators of audio signals and messages, generators of the cabin information field which generate signals for setting the arrows of needle indicators on dashboards and indicator boards in the desired position for the moment. The mathematical model of climatic, time and meteorological conditions allows us to simulate winter and summer, any time of the day as well as rain, snow and other weather conditions. Mathematical model of simulator comprises all mathematical models simulating the operation of many heterogeneous units, assemblies and systems in their relationship. The structure of mathematical model of simulator is shown in Figures 6 and 7.

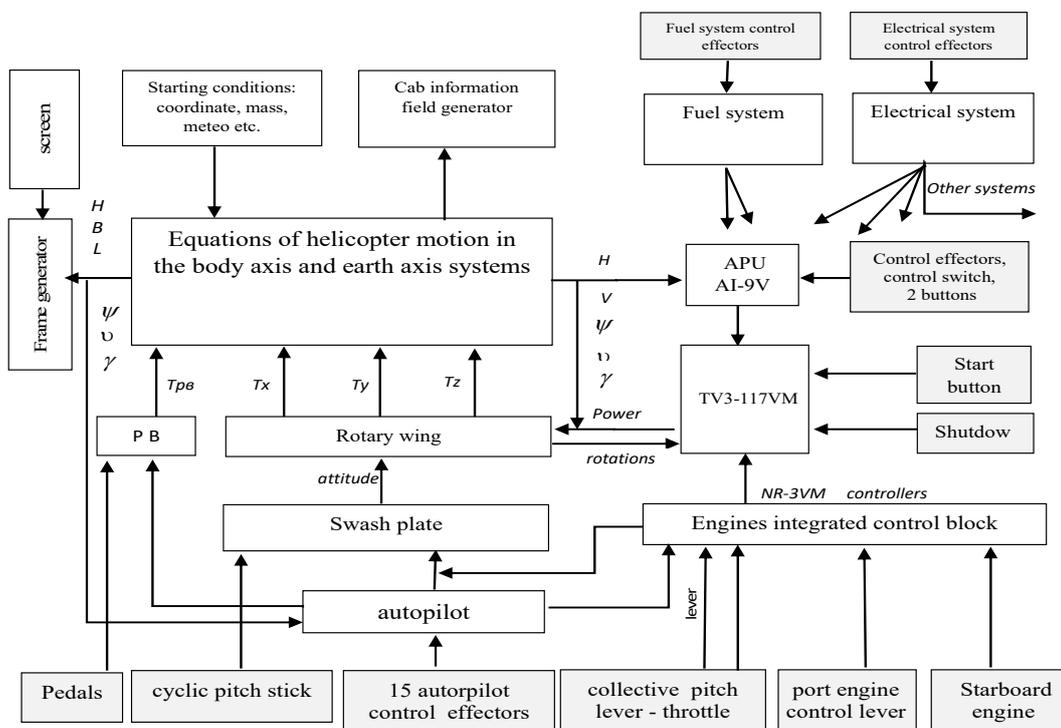


Fig. 6. Mathematical model of the simulator scheme (fragment: helicopter movement)

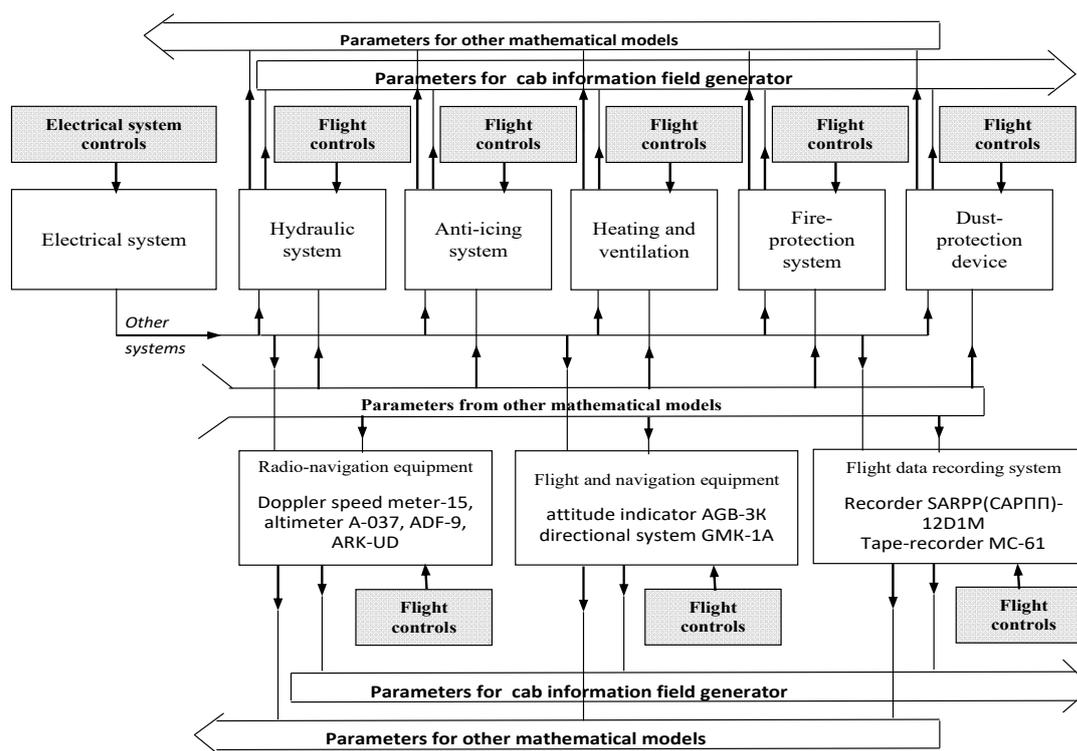


Fig. 7. The simulator's mathematical model scheme (fragment: systems and avionics)

ORGANIZATION OF THE TRAINING PROCESS

Having received the complex flight simulator MI-8MTV helicopter certificate in 2001 and developed the software products – a set of automated training courses and a full range of display and screen computer simulators the specialists of aviation training centre (ATC) Joint stock company "SPARK" started to implement the method of individual pilot training into practice, using computer products developed at the ATC. The register of preparation courses focused on the method of individual training was formed. During the process of curriculum development for each type of preparation course and at drawing up the programs included into the curriculum the requirements of Guidance documents issued by the Federal Agency for Air Transport² on the one hand and peculiarities of individual training mode with the use of developed computer products on the other hand were taken into account.

Since the very beginning of the flight simulator operation, the specialists of aviation training centre (ATC) Joint Stock Company "SPARK" have carried out methodological improvements on the optimal distribution of flight tasks between the simulator and training flights. As a result the document regulating the flight tasks solvable at simulator and the tasks solvable in training flights was prepared. On the base of this document the Regulating State Body issued a new curriculum for flight training³.

Each trainee has an individual schedule if he masters the subjects by using computer products (automated training courses, functional and situational display simulators, navigational simulators) independently (figure 8).

² Federal aviation regulations "Preparation and flights performance in the Civil Aviation of the Russian Federation". Moscow, 2009.

³ The training rules for helicopters flight personnel with take-off weight capacity from 7 to 20 tons. Moscow: VAVT, 2011.

Учебный центр ОАО "СПАРК"									
РАСПИСАНИЕ ЗАНЯТИЙ									
Часы	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Понедельник 01-ый рабочий день	Вводная		АОС		Обед		АОС		
Вторник 02-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Среда 03-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Четверг 04-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Пятница 05-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Суббота	ВЫХОДНОЙ								
Воскресенье	ВЫХОДНОЙ								
Понедельник 06-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 1 КФТ, НТ		РП
Вторник 07-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 2 КФТ, НТ		РП
Среда 08-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Четверг 09-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 3 КФТ, НТ		РП
Пятница 10-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 4 КФТ, НТ		РП
Суббота	ВЫХОДНОЙ								
Воскресенье	ВЫХОДНОЙ								
Понедельник 11-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 5 КФТ, НТ		РП
Вторник 12-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 6 КФТ, НТ		РП
Среда 13-ый рабочий день	АОС		Обед		АОС				
Четверг 14-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 7 КФТ, НТ		РП
Пятница 15-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 8 КФТ, НТ		РП
Суббота	ВЫХОДНОЙ								
Воскресенье	ВЫХОДНОЙ								
Понедельник 16-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 9 КФТ, НТ		РП
Вторник 17-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 10 КФТ, НТ		РП
Среда 18-ый рабочий день	АОС		Обед		БРФ		Урок 11 КФТ, НТ		РП
Четверг 19-ый рабочий день	БРФ		Урок 12 КФТ, НТ		РП		Обед		Экзамен
с 20-го по 28-ой рабочие дни	КОМПЛЕКСНЫЙ ЛЕТНЫЙ ТРЕНАЖЕР								

АОС - автоматизированная обучающая система КФТ - компьютерный функциональный тренажер РП - разбор полета
 БРФ - брифинг НТ - навигационный тренажер

Fig. 8. Schedule of individual training sessions

The logical sequence of the material studied was taken into account during the process of drawing up the schedule: initially goes the study of the structure, then goes the study of the functional system or equipment normal operation and the operation of functional system or equipment operation in special situations, and finally the crew operation in normal flight conditions and work of the crew in difficult and emergency situations. The schedule is accompanied by a detailed distribution of educational materials between training days and "lessons". In addition to the study of theoretical material using passive aviation training course (ATC), the trainee practices the "lessons" using interactive computer simulators.

At the initial stage of preparation, in addition to the direct training of students, the practical tasks of checking and improving the earlier-taken decisions were solved. The pilots, who were trained at the initial stage of JSC "SPARK" work, were invited as experts to assess the quality of the flight simulator with a fixed cabin. The experts are sure that it is basically enough to train on a simulator with fixed cabin. But 20% of experts considered the training on a simulator with a movable cabin for 1 hour for hovering and for 0.5 hour for horizontal braking, coordinated banked turn with a small roll, coordinated banked turn with a maximum roll and a turn with a slide to be really important.

RESULTS

Since 2001, Aviation Training Center JSC "SPARK" has accumulated extensive experience in training helicopter Mi-8 pilots using new computer-based training tools and a flight simulator with a modern visualization system. During this period, more than 1000 pilots and more than 350 flight mechanics from Russia and CIS, as well as more than 250 pilots and more than 40 flight mechanics from different countries of Europe, Asia and Latin America were retrained from other aircraft to the Mi-8MTV helicopter pilots at the "Spark" Aviation Training Center. In addition, the active Mi-8MTV helicopter crews underwent periodic (quarterly/semi-annual) training sessions utilizing the simulator of

the "Spark" ATC. More than 3000 crews of Russian and foreign airlines have undergone periodic training during the period of ATC operation.

REFERENCES

1. **Eliseev, B.P. and Kamzolov, A.S.** (2018). *The concept of constructing a system of control and regulation of transport services*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 6, pp. 105–112. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-105-112 (in Russian)
2. **Potkanova, T. and Durisova, M.** (2017). *Specificities Identification of Value Management of Companies Providing Transport Services*. Procedia Engineering, vol. 192, pp. 725–730. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.125
3. **Fridlyand, A.A., Chubukova, T.P. and Kuleshova, Yu.L.** (2012). *The growth dynamics of aviation industry and airlines financial-economic status*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no. 181, pp. 130–136. (in Russian)
4. **Zasyadko, K.I., Lapa, V.V., Lemeshchenko, N.A. and Yasnyy, S.I.** (2008). *The influence of long flying overloads with moderate values on functional capacity of airplane crewmembers*. Military Medical Journal, vol. 329, no. 1, pp. 52–55. (in Russian)
5. **Godin, V.V. and Korneev, I.K.** (2007). *Informatsionnoye obespecheniye upravlencheskoy deyatelnosti* [Management activities informational support]. Moscow: Higher School, 452 p. (in Russian)
6. **Baronov, V.V., Kalyanov, G.N., Popov, Yu.N. and Titovskyy, I.N.** (2004). *Informatsionnyye tekhnologii i upravlenie predpriyatiem* [Information technology and enterprise management]. Moscow: IT Co., 328 p. (in Russian)
7. **Rybkin, P.N. and Soloviev, B.A.** (2009). *Development of training, maintaining and raising of helicopter pilots professional qualification*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no. 147, pp. 94–103. (in Russian)
8. **Kim, V.S.** (2007). *Testirovanie uchebnykh dostizheniy: monografiya* [Educational achievements testing system. Monography]. Ussuriysk: Publisher UGPI, 214 p. (in Russian)
9. **Mayorov, A.N.** (2001). *Teoriya i praktika sozdaniya testov dlya sistemy obrazovaniya* [Education system test creating theory and practice]. Moscow: Intellect Center, 296 p. (in Russian)
10. **Vendrov, A.M.** (2008). *Sovremennyye metody i sredstva proektirovaniya informatsionnykh sistem* [Information systems modern methods and design tools]. Moscow: Finance and statistics, 336 p. (in Russian)
11. **Rybkin, P.N.** (2011). *Fixed base full flight simulator in the process of civil aircraft pilots' training*. Nauchnyi Vestnik MGTU GA, no. 172, pp. 129–135. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy A. Borisov, Candidate of Technical Sciences, co-worker of Closed Joint-Stock Company "SPARC", info@sparc.spb.ru.

Pavel N. Rybkin, General Director of Closed Joint-Stock Company "SPARC", info@sparc.spb.ru.

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Science, Professor of the Aircraft and Aircraft Engines Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ОСНОВА СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ, ПЕРЕПОДГОТОВКИ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПИЛОТОВ ВЕРТОЛЕТОВ

Ю.А. Борисов¹, П.Н. Рыбкин¹, Ю.М. Чинючин²
¹АО «СПАРК», г. Санкт-Петербург, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

В начале 90-х годов возникла необходимость комплексной разработки системы подготовки, переучивания, поддержания и повышения профессиональной квалификации пилотов наиболее распространенных вертолетов семейства МИ-8, ориентированной на современные информационные технологии. Система рассчитана на охват всех этапов подготовки пилота, с начала профессиональной деятельности (первоначальная подготовка) до ее завершения. Требования к формированию всего ряда технических средств обучения определялись по результатам анализа деятельности пилота в полете. Предлагаемый оптимальный ряд технических средств обучения состоит из технических средств с разными объемами имитации внекабинной и внутрикабинной обстановки. Это позволяет минимизировать затраты на подготовку и поддержание профессиональной квалификации пилотов. В комплект технических средств обучения включаются следующие средства, обеспечивающие обучение пилота действиям на каждом этапе: автоматизированные обучающие курсы теоретических дисциплин, компьютерные функциональные и ситуационные тренажеры, навигационные тренажеры и летный комплексный тренажер. Для самостоятельного освоения дисциплин с использованием компьютерных продуктов составляется индивидуальный план-график занятий для каждого слушателя. При составлении план-графика учитывалась естественная последовательность изучения материала: вначале изучение конструкции, далее нормальная эксплуатация функциональной системы или оборудования и эксплуатация в особых ситуациях функциональной системы или оборудования, и, наконец, технология работы экипажа в нормальных условиях полета и технология работы экипажа в сложных и аварийных ситуациях. На начальном этапе обучения помимо непосредственного обучения слушателей решались задачи проверки на практике и совершенствования принятых ранее решений.

Ключевые слова: образовательные технологии, компьютерное обучение, автоматизированные обучающие курсы, функциональные и ситуационные тренажеры, летные тренажеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев Б.П., Камзолов А.С. Концепция построения системы контроля и регулирования транспортно-сервисных услуг // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 105–112. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-105-112
2. Potkanova T., Durisova M. Specificities Identification of Value Management of Companies Providing Transport Services // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. Pp. 725–730. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.125
3. Фридлянд А.А., Чубукова Т.П., Кулешова Ю.Л. Динамика отраслевого роста и финансово-экономическое состояние авиакомпаний // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 181. С. 130–136.
4. Засядько К.И. Влияние длительных пилотажных перегрузок умеренных величин на функциональные возможности экипажа самолета / В.В. Лапа, Н.А. Лемещенко, С.И. Ясный // Военно-медицинский журнал. 2008. Т. 329, № 1. С. 52–55.
5. Годин В.В., Корнеев И.К. Информационное обеспечение управленческой деятельности. М.: Высшая школа, 2007. 452 с.
6. Баронов В.В. Информационные технологии и управление предприятием / Г.Н. Кальнов, Ю.Н. Попов, И.Н. Титовский. М.: Компания АйТи, 2004. 328 с.
7. Рыбкин П.Н., Соловьев Б.А. Совершенствование системы подготовки, поддержания и повышения профессиональной квалификации пилотов вертолетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2009. № 147. С. 94–103.

8. **Ким В.С.** Тестирование учебных достижений: монография. Уссурийск: Издательство УГПИ, 2007. 214 с.

9. **Майоров А.Н.** Теория и практика создания тестов для системы образования. М.: Интеллект-центр, 2001. 296 с.

10. **Вендров А.М.** Современные методы и средства проектирования информационных систем. М.: Финансы и статистика, 2008. 336 с.

11. **Рыбкин П.Н.** Комплексный летный тренажер с неподвижной кабиной в процессе тренажерной подготовки пилотов гражданских вертолетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 172. С.129–135.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Юрий Александрович, кандидат технических наук, сотрудник ЗАО «СПАРК», info@sparc.spb.ru.

Рыбкин Павел Николаевич, генеральный директор ЗАО «СПАРК», info@sparc.spb.ru.

Чинючин Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 25.07.2019
Принята в печать 14.11.2019

Received 25.07.2019
Accepted for publication 14.11.2019

ББК 05
Н 34
Св. план 2019

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 22, № 06, 2019
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 22, No. 06, 2019

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.

Подписано в печать 16.12.2019.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

15,75 усл. печ. л.

Заказ № 557 / 230

Тираж 100 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: mail@phzhukovskogo.ru

Подписной индекс в каталоге Роспечати 84254
© Московский государственный
технический университет ГА, 2018