

Том 25, № 01, 2022

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 25, No. 01, 2022

Издается с 1998 г.

Москва
2022

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

Главная редакция

- Главный редактор:** *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Зам. главного редактора:** *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Ответственные секретари главной редакции:** *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., старший научный сотрудник отдела научных исследований 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, Хиан, Китай;

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

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

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

Сайт: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: vestnik@mstuca.aero

Тел.: +7 (499) 459-07-16

Плата за публикацию в Научном Вестнике МГТУ ГА с аспирантов не взимается

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, Doctor 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 "Vympel", Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт 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;

Бышинский 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. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

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

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

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

Самохин А.В., д. т. н., 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 Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

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

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

Viktor 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

Габриэлян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А. Система интеллектуального контроля технического состояния радиомаяков навигационно-посадочного комплекса	8
Prokhorov A.V. Impact of NOTAM on security and efficiency performance of flights (overview)	21
Самуленков Ю.И., Бабков А.Б., Филатова Я.А. Совершенствование инфраструктуры аэропортов гражданской авиации с учетом проектирования организаций по техническому обслуживанию воздушных судов	35
Степнова А.И., Кочергин В.И., Степанов С.М., Борсоев В.А. К вопросу об эффективности программы совместной подготовки (переподготовки) авиадиспетчеров и пилотов	53
Эшмурадов Д.Э., Элмурадов Т.Д., Тураева Н.М. Автоматизация обработки аэронавигационной информации на основе многоагентных технологий	65
Санько А.А., Шейников А.А. Определение угловой ориентации в БИНС: сравнение традиционных алгоритмов	77

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Kupriyanova Ya.A. Design of the thermomechanical clamp joint of materials with shape memory effect for unmanned aerial vehicle.....	89
---	----

CONTENTS

TRANSPORT

Gabrielyan D.D., Kostenko P.I., Safaryan O.A. The intelligent control system for the technical radio beacons condition of the navigation and landing complex	8
Prokhorov A.V. Impact of NOTAM on security and efficiency performance of flights (overview)	21
Samulenkov Yu.I., Babkov A.B., Filatova Ya.A. Improving civil aviation airports infrastructure taking into account the design process of aircraft maintenance organizations	35
Stepnova A.I., Kochergin V.I., Stepanov S.M., Borsoev V.A. On the subject of the effectiveness of the ATC and pilot joint simulation training (retraining) program	53
Eshmuradov D.E., Elmuradov T.D., Turayeva N.M. Automation of aeronautical information processing based on multi-agent technologies	65
Sanko A.A., Sheinikov A.A. Angular orientation determination in SINS: traditional algorithms comparison	77

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Kupriyanova Ya.A. Design of the thermomechanical clamp joint of materials with shape memory effect for unmanned aerial vehicle.....	89
---	----

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*

УДК 656

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-8-20

**СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОМАЯКОВ
НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА**

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

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

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

³Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-01-00151/21

В статье рассматривается возможность построения систем контроля технического состояния генераторов передающих каналов радиомаяков (РМ) навигационно-посадочного комплекса аэропорта с использованием систем искусственного интеллекта. Особенностью использования систем искусственного интеллекта для построения системы технического контроля является включение в базу знаний многомерной функции правдоподобия, позволяющей на основе только измерений фаз сигналов, формируемых в РМ, оценивать средние частоты формируемых сигналов в РМ; отклонения средних частот от требуемых значений на всем интервале наблюдения; случайные отклонения текущих значений частоты от средних значений на каждом интервале измерения; относительные нестабильности частоты каждого из генераторов. Получаемые результаты и их изменение с течением времени позволяют проводить мониторинг технического состояния генераторов каналов РМ; диагностику технического состояния генераторов каналов РМ; прогнозирование технического состояния генераторов каналов РМ и принятие решения о состоянии контролируемого генератора по критерию НОРМА – УХУДШЕНИЕ – АВАРИЯ.

Ключевые слова: навигационно-посадочное оборудование, аппаратура дистанционного управления, радиомаяк, ВЧ-сигнал, стабильность частоты, синхронизация фаз, оценки отклонения частоты и фазы от номинальных значений.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание интенсивности движения воздушных судов, и в первую очередь взлетов/посадок самолетов в аэропортах различного класса, наряду с усиливающимися требованиями безопасности полетов обуславливают необходимость дальнейшего повышения надежности аэродромного оборудования. Последнее представляет собой комплекс взаимосвязанных систем, работа которых должна быть строго синхронизирована [1–9]. Наиболее значимый рост требований к надежности наблюдается в отношении навигационно-посадочного оборудования аэродромов, от синхронного функционирования систем которых в наибольшей степени зависит безопасность полетов [10–12]. Особенности комплекса навигационно-посадочного оборудования аэродромов являются:

- распределение систем в составе комплекса на большой территории;
- функциональная взаимосвязь систем, обеспечивающая решение наиболее сложных задач, таких как навигация, взлет и посадка самолетов;

– возможность проведения независимого тестового и функционального контроля в каждой из подсистем.

В настоящее время и в ближайшем будущем наиболее полно удовлетворяющим требованиям практического применения является использование в составе аэродромов систем навигации и посадки, в состав которых входит следующее оборудование:

– радиомаяк курсовой (РМК), предназначенный для формирования плоскостей, ближайшая из которых к вертикальной плоскости, проходящей через ось ВПП, образует при пересечении с плоскостью глиссады линию курса, относительно которой ориентируются самолеты в горизонтальной плоскости при заходе на посадку и во время посадки (частота излучаемых сигналов лежит в диапазоне 108,0...111,975 МГц);

– радиомаяк глиссадный (РМГ), предназначенный для формирования плоскостей, ближайшая из которых к плоскости глиссады образует при пересечении с плоскостью курса линию глиссады, относительно которой ориентируются самолеты в вертикальной плоскости при заходе на посадку и во время посадки (частота излучаемых сигналов лежит в диапазоне 328,6...335,4 МГц);

– радиомаяк приводный (РМП), выполняющий различные функции, например дальнего и ближнего приводного радиомаяка, а также отдельной приводной радиостанции (частота рабочего канала – одно из дискретных значений в диапазоне от 190 до 1750 кГц через 100 Гц);

– радиомаяк дальномерный (РМД) навигационно-посадочный, предназначенный для приема сигналов запроса дальности и излучения сигналов ответа дальности для обеспечения измерения на борту ВС удаления от места установки наземного оборудования при заходе на посадку, взлете, уходе на второй круг и т. д. (диапазон частот рабочих каналов: приемного 1025...1150 МГц, передающего 962...1213 МГц);

– автоматический радиопеленгатор (АРП), предназначенный для измерения пеленга на воздушное судно (ВС) (диапазон частот 118,000...136,97 МГц).

С целью обеспечения непрерывного и одновременного контроля состояния всех перечисленных радиомаяков (РМ) и дистанционного управления ими применяют аппаратуру дистанционного управления (АДУ), которая является программно-аппаратным комплексом, предназначенным для обеспечения непрерывного одновременного контроля состояния параметров и диагностики оборудования подключенных к ней радиомаяков серии 90 и 200.

Общая структурная схема дистанционного управления радиомаяками¹ из состава навигационно-посадочного оборудования аэродрома приведена на рис. 1.

Каждый из радиомаяков, входящих в состав навигационно-посадочного оборудования, имеет подсистему, обеспечивающую проведение соответствующего тестового контроля. Однако сложность и большое количество разнотипных, но функционально взаимосвязанных систем, многообразие решаемых задач определяют необходимость проведения диагностики, организации мониторинга и прогнозирования состояния взлетно-посадочного комплекса в целом и входящих в него систем. Решение всей совокупности задач может быть достигнуто только на основе проведения функционального контроля радиомаяков навигационно-посадочного оборудования аэродрома, определяющего способность правильного выполнения функций оценивания *курсо-глиссадных параметров воздушного судна*, глубина которого варьируется в зависимости от значений параметров аппаратуры.

Основной задачей навигационно-посадочного оборудования является формирование сигналов с требуемыми параметрами. В частности, выполнение эксплуатационных характеристик системы посадки связано с обеспечением относительной стабильности частоты² на уров-

¹ Системы посадки СП–200. Стандартная спецификация. НИИИТ–РТС, 2000. 48 с.

² ICAO AN10-1: Приложение 10. Авиационная электросвязь. Том 1. Радионавигационные средства. 6-е изд. // ИКАО, 2006. 628 с.

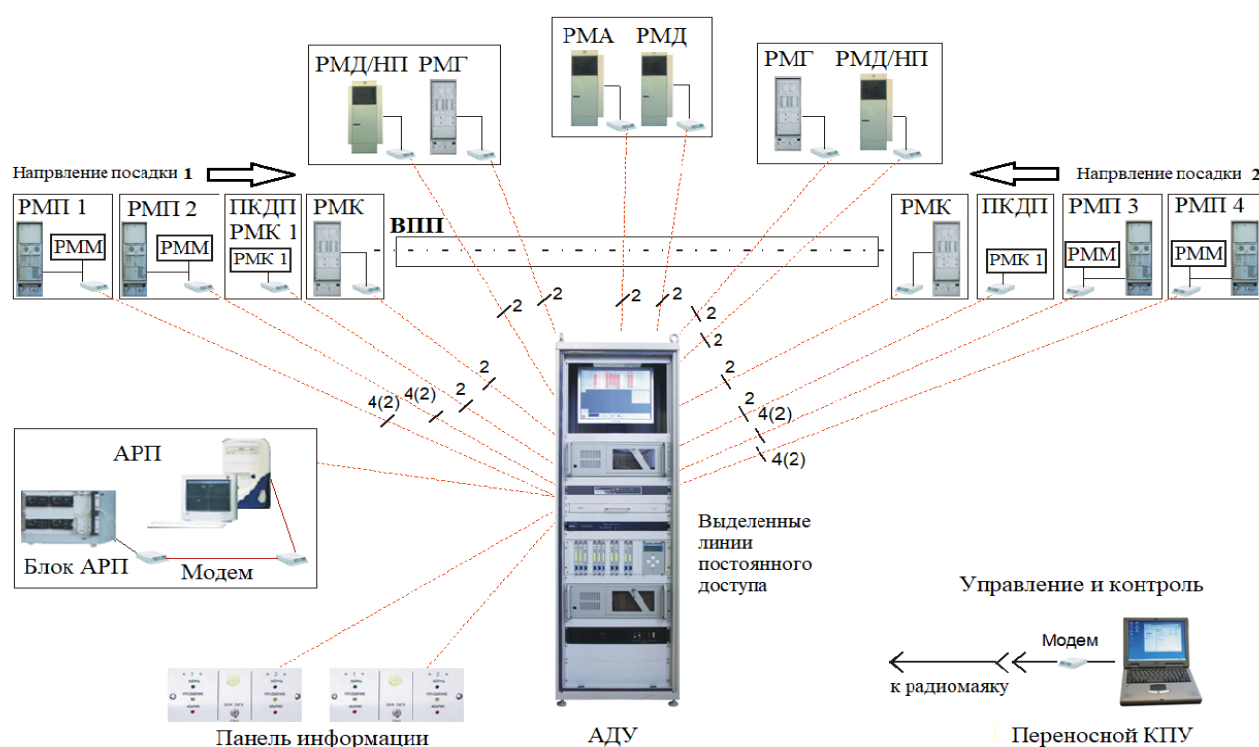


Рис. 1. Общая структурная схема дистанционного управления радиомаяками навигационно-посадочного оборудования аэродрома
Fig. 1. The general block diagram of radio beacons remote control for the airfield navigation and landing equipment

не $(1...2) \cdot 10^{-5}$. Реализация такой стабильности не требует использования сложных технических решений. Однако это относится к радиоэлектронной аппаратуре, работающей в подготовленных помещениях в достаточно узком диапазоне изменения температуры окружающей среды. В то же время антенно-мачтовые устройства навигационного и посадочного оборудования размещаются на территории аэродрома в соответствии с требованиями к размещению объектов радиотехнического обеспечения полетов и авиационной связи³, что требует дополнительных решений по обеспечению заданной стабильности частоты формируемых сигналов в аппаратуре системы посадки и надежности ее функционирования.

С учетом вышесказанного цель работы состоит в применении методов искусственного интеллекта к решению задач мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния радиоэлектронных систем навигационно-посадочного оборудования аэродрома.

МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОМАЯКОВ НАВИГАЦИОННОГО И ПОСАДОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭРОДРОМА

В работах [13, 14] предложены метод и алгоритм оценивания параметров сигналов в каналах радиомаяков из состава навигационного и посадочного оборудования аэродрома, позволяющие на основе измерения фаз формируемых сигналов оценивать текущие параметры генераторного оборудования радиомаяков. Получаемые оценки дают возможность не только опре-

³ Приказ Министерства транспорта РФ от 20 октября 2014 г. № 297 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь в гражданской авиации"» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2014. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172361/ (дата обращения: 20.10.2021).

делять текущее состояние генераторного оборудования, но и формировать прогноз изменения характеристики соответственно принимать решения по проведению обслуживания и ремонта.

Обобщенное представление сигналов в РМ может быть представлено в виде

$$u_n^{(i)}(t) = U_n^{(i)}(t) \cos(2\pi \cdot \Psi_n^{(i)}(t)), \quad (n = 1, \dots, N_i, k = 1, \dots, K), \quad (1)$$

в котором $U_n^{(i)}$ и $\Psi_n^{(i)}(t)$ – соответственно амплитуда и фаза формируемого сигнала в n -м канале k -го РМ; N_k – число каналов формирования сигналов k -го РМ; K – число РМ в составе навигационного и посадочного оборудования аэродрома.

В каждом из этих каналов в течение общего измерительного интервала проводится измерение фазы формируемого сигнала. Такие измерения могут быть выполнены путем введения в каждый канал формирования ВЧ-сигналов направленного ответвителя мощности с малым коэффициентом связи. С выхода ответвителя мощности сигналы подаются на измеритель фаз, имеющий количество информационных входов, равное общему числу каналов всех контролируемых РМ навигационно-посадочного комплекса.

Для каждого канала РМ может быть определено номинальное значение фазы $\Psi_{0n}^{(i)}(t)$, соответствующее функционированию генератора n -го канала с заданными параметрами в допустимых границах их отклонения. Отличие измеряемого значения фазы в n -м канале k -го РМ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$) из-за воздействия различных факторов будет определяться постоянным отклонением δf_n средней частоты формируемого сигнала от требуемой, случайным отклонением частоты формируемого сигнала $\Delta f_{n,m}$ от среднего значения на m -м интервале измерения ($m = 1, \dots, M$) и отклонением длительности m -го интервала измерений на величину Δt_m от номинального значения.

По результатам измерений с учетом физической независимости каналов передающих устройств на частотах $f_n^{(i)}$ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$) и наличия в каждом канале собственных дестабилизирующих факторов оценка параметров генераторов, как показано в [16, 17], может быть получена из условия максимума функции правдоподобия

$$L(\Delta t, \delta f, \delta \sigma) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{0,n}) + \frac{(\Delta \Phi_n - f_n^{(0)} \cdot \Delta t_m - 2\delta f_n \cdot t_0)^2}{2\sigma_{0,n}^2 \cdot t_0^2} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta t = \{\Delta t_1, \dots, \Delta t_M\}$; $\delta f = \{\delta f_1, \dots, \delta f_N\}$; $\delta \sigma = \{\delta \sigma_1, \dots, \delta \sigma_N\}$ – оценки возникающих в процессе эксплуатации отклонений соответствующих параметров от заявленных технических характеристик РМ, приведенные в руководствах по их эксплуатации.

Нахождение максимума функции (2) приводит к решению системы $2N \cdot M + M$ уравнений относительно $2N + M$ неизвестных:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\Delta t, \delta f, \delta \sigma)}{\partial \Delta t_m} = 0, m = 1, \dots, M, \\ \frac{\partial L(\Delta t, \delta f, \delta \sigma)}{\partial \delta f_n} = 0, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M, \\ \frac{\partial L(\Delta t, \delta f, \delta \sigma)}{\partial \delta \sigma_n} = 0, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M. \end{cases} \quad (3)$$

Частные производные логарифмической функции правдоподобия из системы уравнений (3) легко вычисляются, но из-за громоздкости в статье не приводятся.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАДИОМАЯКОВ НАВИГАЦИОННОГО И ПОСАДОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭРОДРОМА

Одним из возможных направлений получения оценок $\delta \mathbf{f} = \{\delta f_1, \dots, \delta f_{N_k}\}$, $\delta \sigma = \{\delta \sigma_1, \dots, \delta \sigma_{N_k}\}$ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$) и $\Delta t = \{\Delta t_1, \dots, \Delta t_M\}$ в процессе работы радиомаяков является использование систем искусственного интеллекта (СИИ), к которым относятся и системы управления в сложных распределенных системах [15–21]. Такие системы позволяют применительно к возрастающим требованиям к безопасности полетов решать для навигационно-посадочного оборудования аэродромов задачи диагностики, мониторинга, прогнозирования технического состояния.

Практическая значимость предлагаемого варианта контроля заключается в том, что данный контроль проводится без перевода аппаратуры в тестовый режим и может проводиться постоянно в течение всего времени функционирования навигационно-посадочного оборудования аэродрома. Вариант построения системы функционального контроля на базе СИИ приведен на рис. 2.

В состав системы функционального контроля на базе СИИ входят:

– *экспертная подсистема (эксперт)*, обеспечивающая полноту введения в базу знаний всей исходной информации о радиомаяках (число и типы РМ, требуемые параметры сигналов согласно документации по эксплуатации РМ, поправки в соответствии с сезонными условиями эксплуатации) и ее хранение в течение требуемого периода и последующего обновления;

– *пользовательская подсистема*, являющаяся одновременно и объектом управления и подсистемой формирования данных для определения текущих значений параметров сигналов (измеренных значений фаз сигналов $\Psi_n^{(i)}(t_m)$);

– *подсистема базы знаний*, обеспечивающая хранение:

- номинальных значений фазы сигналов генераторов РМ_k $\Psi_{0n}^{(i)}$ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$);

- возможных предельных значений отклонения средней частоты генераторов РМ;

- параметров предельных внешних факторов, влияющих на случайное отклонение частоты формируемого сигнала от среднего $\Delta f_{n,m}$ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K, m = 1, \dots, M$) (в общих фактах);

- правил, описывающих правила преобразования данных – соотношения (2) и (3) (в правилах, описывающих целесообразные преобразования данных);

– *рабочая память*, обеспечивающая хранение текущих значений измеренных значений фаз сигналов $\Psi_n^{(i)}(t_m)$, относительных нестабильностей и средних частот генераторов

$\delta \mathbf{f} = \{\delta f_1, \dots, \delta f_{N_k}\}$, $\delta \sigma = \{\delta \sigma_1, \dots, \delta \sigma_{N_k}\}$ ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$), получаемых от решателя, а также промежуточные данные решаемой в текущий момент задачи;

– *подсистема решений (решатель)*, обеспечивает получение оценок:

- средних значений частоты каждого РМ_k;

- отклонений текущих значений от средних значений частоты, относительной нестабильности частоты сигналов $\delta f_1, \delta f_2, \dots, \delta f_{N_k}$, ($n = 1, \dots, N_k, k = 1, \dots, K$) генераторов РМ_k;

- относительной нестабильности частоты генераторов;

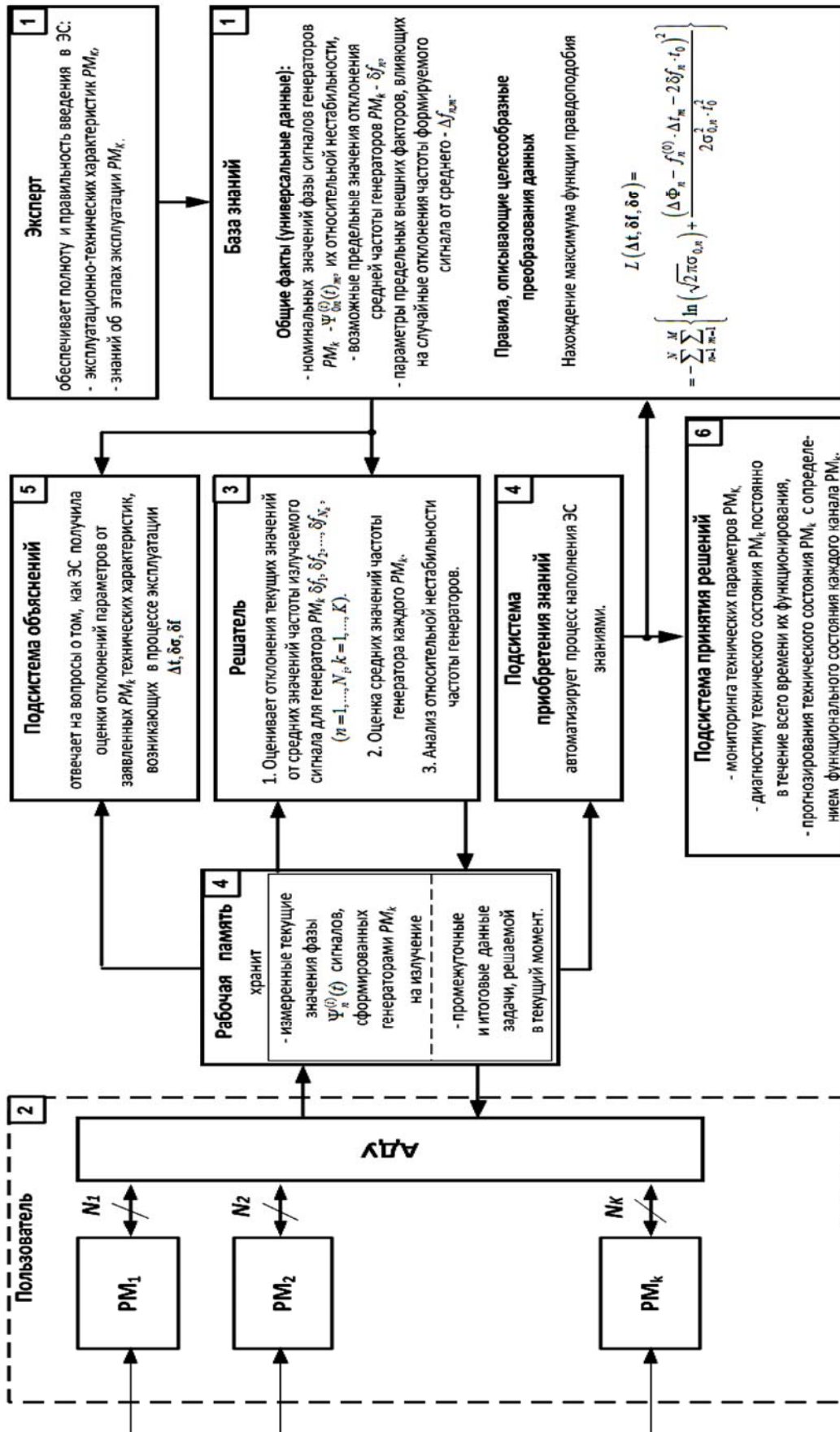


Рис. 2. Вариант построения системы интеллектуального контроля
Fig. 2. The variant of creating an intelligent control system

- подсистема приобретения знаний автоматизирует процесс наполнения ЭС знаниями, приобретенными в ходе функционирования РМ;
- подсистема объяснений, отвечающая на вопросы об алгоритме получения оценок отклонений параметров РМ от заявленных технических характеристик в процессе эксплуатации;
- подсистема принятия решений, обеспечивает:
 - мониторинг технических параметров РМ_k;
 - диагностику технического состояния РМ_k постоянно в течение всего времени их функционирования;
 - прогнозирование технического состояния РМ_k с определением функционального состояния каждого канала РМ_k.

Алгоритм функционирования СИИ включает следующие группы операций.

1. Первая группа операций связана с введением, контролем полноты и правильности введения экспертом в базу знаний экспертной системы эксплуатационно-технических характеристик РМ, их изменением на различных этапах эксплуатации, включая сезонные изменения погодных условий.

При выполнении указанных операций для каждого генератора всех РМ вносятся:

- длительности временных интервалов измерения;
- номинальные значения фазы сигналов генераторов РМ;
- значения относительной нестабильности генераторов;
- возможные предельные значения отклонения средней частоты генераторов;
- параметры внешних факторов, влияющих на отклонения частоты сигнала генератора.

Кроме того, в базу знаний экспертной системы экспертом вводятся правила, описывающие преобразования измеряемых пользователем данных, – соотношения (2) и (3).

2. Вторая группа операций определяет:

- проведение измерений текущих значений фазы сигнала $\Psi_n^{(k)}(t)$, формируемого каждым генератором всех РМ на излучение;
- дальнейшее преобразование к единому формату представления данных получаемых значений фазы с привязкой к моментам измерений для передачи в аппаратуру дистанционного управления, рабочую память и далее в решатель.

3. При выполнении третьей группы операций в решателе определяются оценки:

- отклонения длительности временного интервала от заданного;
- значений средней частоты генераторов каждого РМ от заданного значения, определяемого назначением РМ и условиями его применения;
- отклонения текущих значений частоты генераторов всех РМ от соответствующих средних значений;
- относительной нестабильности частоты генераторов всех РМ.

Полученные данные передаются в экспертную систему для пополнения базы знаний.

4. Подсистема приобретения знаний обеспечивает ввод получаемых при выполнении третьей группы операций оценок в базу знаний для расширения содержащихся в ней сведений и одновременно передает эти же данные в подсистему принятия решений, в которой формируются оценки текущих значений частоты и относительных нестабильностей генераторов.

После первичной обработки в АДУ информация от пользователя об отклонениях $\delta f_1, \delta f_2, \dots, \delta f_{N_k}$ текущих значений частоты от средних значений частоты каждого из N_k генераторов k -го радиомаяка РМ_k ($n = 1, \dots, N_k, i = 1, \dots, K$) поступает в рабочую память и из нее в подсистему объяснений.

5. В подсистеме объяснений формируются ответы на запросы, как и на основе каких данных получены оценки отклонения параметров РМ от заданных, а также выдаются значения отклонения указанных параметров.

6. На основе данных, поступающих из подсистемы приобретения знаний, в подсистеме принятия решений организуется:

- мониторинг технического состояния каждого генератора всех РМ_к;
- диагностика, в результате которой определяются значения параметров системы РМ_к;
- прогнозирование по результатам последовательных измерений на каждом из измерительных интервалов, позволяющее дать вероятностное изменение параметров генераторов РМ_к.

Повышение достоверности контроля определяется увеличением полноты и глубины контроля генераторного оборудования РМ (стабильности и соответствия номинальным значениям параметров выходных сигналов передающих и приемных устройств). Предложенная система функционального контроля позволяет не только контролировать разностные ДН и равносигнальные направления, но и значения параметров генераторов, которые интегрально определяют формируемое электромагнитное поле РМ [10, 13, 14]. На основе полученных значений оценок параметров и их изменения принимается решение о состоянии контролируемых генераторов РМ по критерию НОРМА – УХУДШЕНИЕ – АВАРИЯ. Достоинством построения системы функционального контроля является высокая точность получаемых оценок измеряемых параметров генераторов и возможность параллельного контроля каналов всех РМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследований результаты показывают следующее.

1. Системы искусственного интеллекта позволяют решать на основе единого подхода задачи мониторинга, диагностики и прогнозирования технического состояния радиомаяков, входящих в состав передающего оборудования навигационно-посадочного комплекса аэропорта. Информационная составляющая функционирования СИИ связана с измерением фаз сигналов, формируемых генераторами навигационно-посадочного комплекса аэропорта, а также с данными, определяющими номинальные значения технических характеристик этих генераторов в различных условиях эксплуатации.

2. Принятие решений СИИ основывается на постоянном анализе параметров генераторов, получаемых с использованием многомерной функции правдоподобия, связывающей между собой значения измеряемых фаз сигналов и текущие характеристики генераторов, такие как средняя частота и относительная нестабильность формируемых сигналов, а также их изменение с течением времени.

На основе полученных значений оценок параметров и их изменения принимается решение о состоянии контролируемых генераторов РМ по критерию НОРМА – УХУДШЕНИЕ – АВАРИЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бехтер А.Т. Методология формирования и оценки эффективности технической эксплуатации авиационной техники // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2021. № 2 (53). С. 34–40.

2. Осипов Д.В., Чурикова О.О. Автоматизация и искусственный интеллект на транспорте: тенденции развития // Тренды экономического развития транспортного комплекса России: форсайт, прогнозы и стратегии: сборник научных трудов национальной научно-практической конференции. Москва, 18 марта 2020 г. М.: ИНФРА-М, 2020. С. 179–181.

3. Войтович Н.И., Жданов Б.В. Способ летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов и устройства для его применения. Патент RU № 2501031 С2. 10.12.2013 г.

4. **Гончаренко В.И., Рожнов А.В., Теплов Г.И.** Планирование и координация маршрутов полета беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2018): материалы XXI Международной научно-практической конференции, Москва, 17–21 сентября 2018 г. С. 220–229.

5. **Яшин А.И.** Имитационное моделирование автоматизированной системы контроля технического состояния элементов распределенных радиопередатчиков / А.И. Яшин, П.А. Будко, А.М. Винограденко, А.В. Педан // Морская радиоэлектроника. 2018. № 1 (63). С. 32–37.

6. **Ивануткин А.Г.** Методика оценки эффективности радиотехнического обеспечения полетов авиации // Военная мысль. 2016. № 7. С. 33–40.

7. **Козлов А.В., Животиков В.В.** Система автоматического зависимого наблюдения, меры по повышению безопасности воздушного движения // Авиация: прошлое, настоящее, будущее: материалы Международной научно-практической конференции (Авиатранс-2020). Ростов-на-Дону, 20–21 октября 2020 г. С. 121–124.

8. **Светличный Ю.А., Дегтярев П.А.** Синхронизация и передача данных в радиотехнических системах с территориально распределенными сегментами // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 3. С. 7–12. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12

9. **Воробьев В.В., Власова А.В.** Роль радиоэлектронного оборудования в управлении безопасностью полетов при реализации глобального аэронавигационного плана ИКАО // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 156–161. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-156-161

10. **Костенко П.И., Левченко А.Н., Акулов Г.А.** Вариант построения схемы выравнивания фазового фронта линейной антенной решетки системы курсового радиомаяка // Инновационные аспекты развития гражданской авиации: сборник трудов Международной научно-практической конференции (Авиатранс-2016). Ростов-на-Дону, 31 марта – 1 апреля 2016 г. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2016. С. 189–193.

11. **Войтович Н.И., Жданов Б.В.** Способ регулировки информационного параметра курсо-глиссадных радиомаяков и устройства его реализации (варианты). Патент RU № 2695316 С2. 23.07.2019 г.

12. **Зотов А.В., Жданов Б.В., Войтович Н.И.** Диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS на поверхности с поперечным уклоном // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 4. С. 5–27.

13. **Габриэльян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А.** Особенности использования статистического метода стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 75–85. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85

14. **Габриэльян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А.** Повышение стабильности частоты ВЧ-сигналов в передающем устройстве курсового радиомаяка на основе статистического оценивания фаз // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 5. С. 19–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-5-19-28

15. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 2: Модели и методы / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.

16. **Винограденко А.М., Меженев А.В., Будко Н.П.** К вопросу обоснования понятийного аппарата неразрушающего экспресс-контроля технического состояния оборудования системы связи и радиотехнического обеспечения аэродрома // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11, № 6. С. 30–44. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10293

17. **Абрамов О.В.** Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55–66. DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66

18. Kotenko I.V. An approach for intelligent evaluation of the state of complex autonomous objects based on the wavelet analysis / I.V. Kotenko, P.A. Budko, A.M. Vinogradenko, I.B. Saenko // The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019). Kuching, Sarawak, Malaysia, 23–25 September 2019. P. 25–38. DOI: 10.3233/FAIA190036

19. Винограденко А.М., Будко Н.П. Адаптивный контроль технического состояния сложных технических объектов на основе интеллектуальных технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 1. С. 25–36. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-25-35

20. Будко П.А. Метод многомерного статистического контроля технического состояния радиоэлектронного оборудования / П.А. Будко, А.М. Винограденко, В.К. Гойденко, Л.И. Тимошенко // Датчики и системы. 2018. № 3 (223). С. 3–11.

21. Будко П.А. Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи радиотехнического обеспечения полетов / П.А. Будко, А.М. Винограденко, А.В. Меженев, А.А. Чикирев // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235–283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Габриэлян Дмитрий Давидович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника НТК по науке ФГУП «РНИИРС», d.gabrieljan2011@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.

THE INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNICAL RADIO BEACONS CONDITION OF THE NAVIGATION AND LANDING COMPLEX

Dmitry 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 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 № 19-01-00151/21

ABSTRACT

The article considers the possibility of developing control systems for the technical condition of radio beacons (RB) transmitting channels generators for the airport navigation and landing complex using artificial intelligence systems (AIS). The feature of using AIS to develop the technical control system is integrating a multidimensional likelihood function into the knowledge base. By means of merely measurements of signal phases generated in RB, the given function makes it possible to evaluate:

- average frequencies of generated signals in RB;
- deviations of average frequencies from the required values throughout the entire observation interval;
- random deviations of the current frequency values from the average ones at each measurement interval;

– relative frequency instabilities of each of generators.

The results obtained and their variation over the time allow us to carry out:

– monitoring the technical condition of RB channels generators;

– diagnostics of the technical condition of RB channels generators;

– forecasting the technical condition of RB channels generators and making a decision concerning the status of the controlled generators according to the CORRECT OPERATION-DETERIORATION-FAILURE criterion.

Key words: navigation and landing equipment, remote control hardware, radio beacon, HF signal, frequency stability, phase synchronization, estimates of frequency and phase deviations from nominal values.

REFERENCES

1. **Bekhter, A.T.** (2021). *Aeronautical equipment maintenance system engineering and management efficiency assessment methodology*. Trudy GosNIIAS. Seriya: Voprosy avioniki, no. 2 (53), p. 34–40. (in Russian)
2. **Osipov, D.V. and Churikova, O.O.** (2020). *Automation and artificial intelligence in transport: development trends*. Trendy ekonomicheskogo razvitiya transportnogo kompleksa Rossii: forsayt, prognozy i strategii: sbornik nauchnykh trudov natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Trends in the economic development of the Russian transport complex: foresight, forecasts and strategies: proceedings of the national scientific and practical conference]. Moscow: INFRA-M, p. 179–181. (in Russian)
3. **Voitovich, N.I. and Zhdanov, B.V.** (2011). *Method for flight inspection of ground-based radio flight support equipment and apparatus for realising said method*. Patent RU, no. 2501031 C2, December 10, 2013. (in Russian)
4. **Goncharenko, V.I., Rozhnov, A.V. and Teplov, G.I.** (2018). *Planirovaniye i koordinatsiya marshrutov poleta bespilotnykh aviatsionnykh sistem v interesakh organizatsii i otsenki kachestva sistem podvizhnoy svyazi* [Planning and coordination of flight routes for unmanned aircraft systems in the interests of organizing and evaluating the quality of mobile communication systems]. Raspredelennyye kompyuternyye i telekommunikatsionnyye seti: upravleniye, vychisleniye, svyaz (DCCN-2018): materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Distributed computer and telecommunication networks: control, computing, communication (DCCN-2018): materials of the XXI International Scientific and Practical Conference]. Moscow, p. 220–229. (in Russian)
5. **Yashin, A.I., Budko, P.A., Vinogradenko, A.M. and Pedan, A.V.** (2018). *Simulation of an automated system for monitoring of the technical state of distributed radio centers*. Morskaya Radioelektronika, no. 1 (63). p. 32–37. (in Russian)
6. **Ivanutkin, A.G.** (2016). *Methods of evaluation of the effectiveness of radiotechnical support of air flights*. Voennaya Mysl, no. 7, p. 33–40. (in Russian)
7. **Kozlov, A.V. and Zhivotikov, V.V.** (2020). *Sistema avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya, mery po povysheniyu bezopasnosti vozdushnogo dvizheniya* [System of automatic dependent surveillance, measures to improve air traffic safety]. Aviatsiya proshloye, nastoyashcheye, budushcheye: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Aviatrans-2020) [Past, present and future of aviation: materials of the International scientific and practical conference (Aviatrans-2020)]. Rostov-on-Don, p. 121–124. (in Russian)
8. **Svetlichniy, Yu.A. and Degtyarev, P.A.** (2019). *Syncronization and data transmission in multistatic radar systems*. Proceedings of the Tsur University, vol. 22, no. 3, p. 7–12. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-7-12 (in Russian)
9. **Vorobyov, V.V. and Vlasova, A.V.** (2017). *The role of navigational aids in flight safety management within ICAO global air navigation plan*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, p. 156–161. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-156-161 (in Russian)

10. Kostenko, P.I., Levchenko, A.N. and Akulov, G.A. (2016). *Variant postroyeniya skhemy vyravnivaniya fazovogo fronta lineynoy antennoy reshetki sistemy kursovogo radiomayaka* [Variant of constructing the alignment scheme of the phase front of the course beacon system linear antenna array]. *Innovatsionnyye aspekty razvitiya grazhdanskoj aviatsii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Aviatrans-2016)* [Innovative aspects of civil aviation development: materials of the International scientific and practical conference (Aviatrans-2016)]. Rostov-on-Don: OOO «Fond nauki i obrazovaniya», p. 189–193. (in Russian)

11. Vojtovich, N.I. and Zhdanov, B.V. (2019). *Method for adjusting information parameter of course-glide path beacons and its implementation device (embodiments)*. Patent RU, no. 2695316 C2, July 23, 2019. (in Russian)

12. Zotov, A.V., Zhdanov, B.V. and Voytovich, N.I. (2014). *Antenna pattern of ILS localizer on the surface with transverse-slope*. *Bulletin of the south Ural state university. Series: computer technologies, automatic control, radio electronics*, vol. 14, no. 4, p. 5–27. (in Russian)

13. Gabrielyan, D.D., Kostenko, P.I. and Safaryan, O.A. (2019). *Features of the use of the statistical method of frequency stabilization of generators in distributed information-measuring systems*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 6, p. 75–85. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85 (in Russian)

14. Gabrielyan, D.D., Kostenko, P.I. and Safaryan, O.A. (2020). *Increasing frequency stability of hf signals in the transmitting device of the localiser based on statistical estimation of phases*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 5, p. 19–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-5-19-28 (in Russian)

15. Pospelov, D.A. (Ed.). (1990). *Iskusstvennyy intellekt: spravochnik. V 3 knigakh. Kn. 2: Modeli i metody* [Artificial Intelligence: handbook: in three volumes. Vol. 2: Models and methods]. Moscow: Radio i svyaz, 304 p. (in Russian)

16. Vinogradenko, A.M., Mehzenov, A.V. and Budko, N.P. (2019). *To the question of substantiation of the conceptual apparatus nondestructive express control of technical condition equipment of communication system and aerodrome radio engineering support*. *High Technologies in Earth Space Research. H&Es Research*, vol. 11, no. 6, p. 30–44. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10293 (in Russian)

17. Abramov, O.V. (2017). *Planning of preventive corrections of parameters of engineering devices and systems*. *Informatika i Sistemy Upravleniya*, no. 3 (53), p. 55–66. DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66 (in Russian)

18. Kotenko, I.V., Budko, P.A., Vinogradenko, A.M. and Saenko, I.B. (2019). *An approach for intelligent evaluation of the state of complex autonomous objects based on the wavelet analysis*. *The 18th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET'2019)*. Kuching, Sarawak, Malaysia, 23–25 September 2019. P. 25–38. DOI: 10.3233/FAIA190036

19. Vinogradenko, A.M. and Budko, N.P. (2020). *Adaptive control of technical condition of autonomous complex technical objects on the basis of intelligent technologies*. *T-Comm*, vol. 14, no. 1, p. 25–36. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-1-25-35 (in Russian)

20. Budko, P.A., Vinogradenko, A.M., Goydenko, V.K. and Timoshenko, L.I. (2018). *Method of multidimensional statistical control of technical condition of the radio-electronic equipment on the basis of the integration of indications of several types of sensors*. *Sensors & Systems*, no. 3 (223), p. 3–11. (in Russian)

21. Budko, P.A., Vinogradenko, A.M., Mezhenov, A.V. and Chikirev, A.A. (2020). *Method and equipment of the intelligent express control of the technical condition of ground-based means of communication and radio-technical flight support*. *Systems of Control, Communication and Security*, no. 1, p. 235–283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108 (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry D. Gabrielyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of Science, 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 Moscow State Technical University of Civil Aviation, pit.kostenko.73@mail.ru.

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

Поступила в редакцию 09.08.2021
Принята в печать 25.01.2022

Received 09.08.2021
Accepted for publication 25.01.2022

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-21-34

IMPACT OF NOTAM ON SECURITY AND EFFICIENCY PERFORMANCE OF FLIGHTS (OVERVIEW)

A.V. PROKHOROV¹

¹*Volga Dnepr-Unique Air Cargo, Inc., The Woodlands, Texas, US*

The purpose of this work is to analyze and assess the impact of NOTAM on the flight safety and efficiency. The main problems associated with NOTAM were considered: number of NOTAMs, the practical use of NOTAM information, technical limitations of the current NOTAM system. Examples of the negative impact of NOTAM on the quality of air navigation support, safety and efficiency of flights are presented. Also, the best practice of solving problems, related to NOTAM in the world, is presented with using: Q-code and flight planning systems (on the example of Lido Flight 4D). The concept of the European AIS Database (EAD), developed on the basis of the Aeronautical Information Exchange Model (AIXM), is presented. The concept of Digital NOTAM, implemented on the basis of AIXM and intended for the exchange, automatic processing and interpretation of the dynamic aeronautical data, is considered. The research studies the new modernized NOTAM system – Federal NOTAM System (FNS – Federal NOTAM System), developed by the Federal Aviation Administration (FAA) of the United States, which allows encoding the Digital NOTAM. ICAO's plans for the transition from the concept of Aeronautical Information Service (AIS) to the Aeronautical Information Management (AIM), applying the principles of the System Wide Information Management (SWIM) concept, were analyzed. As a result of the analysis of the current NOTAM system and the modernized NOTAM system (FNS from FAA), conclusions were drawn that the implementation of Digital NOTAM should solve the technical part of the problems associated with NOTAM, brought about by the use of modern communications (internet) and new data exchange standards (AIXM), which, as a result, will lead to an increase in the level of safety and efficiency of flights. At the same time, problems with NOTAM caused by human factors remain unresolved, due to incorrect use of the NOTAM instrument.

Key words: NOTAM, Digital NOTAM, aeronautical information, AIXM, SWIM, GANP 2016-2030.

INTRODUCTION

Nowadays flight safety and efficiency are impossible without qualitative aeronautical information (AI), as it is necessary to take a large number of crucial factors into consideration. Nevertheless, it is not always possible to analyze the whole AI package given the large amount of information and format of its disclosure. As a result, the important data, which has a direct impact on flight safety, may remain unnoticed by the flight dispatcher (FD) and the flight crew.

ICAO – International Civil Aviation Organization states: "information resulting from the assembly, analysis and formatting of aeronautical data" as a definition of "aeronautical information". Whereas "a representation of aeronautical facts, concepts or instructions in a formalized manner suitable for communication, interpretation or processing" is what is meant by "aeronautical data". AI is provided in a standardized format, including:

- Aeronautical Information Publication (AIP) with amendments (AMDT) and supplements (SUP);
- aeronautical information circulars (AICs);
- notice to airmen (NOTAM) and pre-flight information bulletin (PIB);
- check lists and lists of NOTAMs¹ in operation.

AI is used at all stages of performance of flights. FDs analyze AI, including AIP, SUP, AIC and NOTAM, during flight aeronautical support (AS). Briefing for the upcoming flight, involving PIB and latest NOTAM for it, is a result of the analysis. PIB allows us to reduce flight crew workload in a significant way, as all the NOTAMs in PIB have been singled out by the FD.

¹ Annex 15 – Aeronautical Information Services. (2018). 16th ed. Montreal: ICAO, 60 p.

FDs and the flight crew pay a particular attention to NOTAM analysis, as the main NOTAM task is to inform rapidly all the specialists, involved in performance of flights, about AI (AIP) changes or crucial circumstances, affecting flight performance. According to ICAO Annex 15, NOTAM is defined as "A notice distributed by means of telecommunication containing information concerning the establishment, condition or change in any aeronautical facility, service, procedure or hazard, the timely knowledge of which is essential to personnel concerned with flight operations" (fig. 1).

```
E3144/21 NOTAMR E1852/21
Q) CZUL/QMRLC/IV/NBO/A/000/999/4541N07402W005
A) CYMX B) 2107071147 C) 2108131800
E) RWY 11/29 CLSD DUE NO MAINTENANCE.
CREATED: 07 Jul 2021 11:47:00
SOURCE: CYHQYNYX
```

Fig. 1. Example of NOTAM

According to the example above, NOTAM is a text message in a set format in capital letters. It is customary to abbreviate the NOTAM texts as much as possible, using standard abbreviations according to "Procedures for Air Navigation Services. ICAO Abbreviations and Codes". The following rules arise from NOTAM message size restriction and initially high cost of utilizing Aeronautical Fixed Telecommunications Network (AFTN) communication facilities.

The NOTAM system operation seems to have already been up and running, as the pattern has been being utilized in aviation for more than 74 years, but, unfortunately, the actual situation is different. NOTAM-related challenges remain urgent nowadays. This fact is mostly caused by aviation industry development: growth of the number and size of airports, increase in the number of flights, and also by the negligence of the specialists, responsible for AI (NOTAM publishing, instead of prompt amendments in AIP) and NOTAM utilization for unauthorized purposes.

On July 17, 2014, the plane B777-200ER, performing the flight MH17 Amsterdam – Kuala Lumpur, was shot down in Donetsk Oblast, as a result 298 people were killed. This accident may serve as an example of NOTAM emergencies. The flight crew, performing the following flight, could see NOTAM A1492/14, Figure 2 among the hundreds of them in flight briefing.

```
A1492/14 NOTAMN
Q) UKDV/QRTCA/IV/BO /W /260/320/4822N03807E095
A) UKDV B) 1407141800 C) 1408142359EST
E) TEMPO RESTRICTED AREA INSTALLED WITHIN FIR
DNIPROPETROVSK BOUNDED BY COORDINATES:
495355N 0380155E 485213N 0372209E 480122N 0370253E
471352N 0365856E 465018N 0374325E 465900N 0382000E
470642N 0381324E THEN ALONG STATE BOUNDARY
UNTIL POINT 495355N 0380155E.
RESTRICTION NOT APPLIED FOR FLIGHTS OF STATE ACFT
OF UKRAINE.
F) FL260 G) FL320)
```

Fig. 2. NOTAM for flight MH17

NOTAM A1492/14 was the one to inform the aircraft flight crew that the flights in temporary restriction area involve the high risk to flight safety, and more than a dozen of The Ukrainian Air Force aircraft were shot down in 2014 June-July. Unfortunately, there was no data on the crashed aircraft in

the following NOTAM. The following data could have, probably, raised awareness of the FD and flight crew, whether it was noted in NOTAM, and this plane crash could have been averted.

Thus, NOTAM issues can be divided into three groups:

1. The number of NOTAMs;
2. The practical use of NOTAM information;
3. The technical limitations of the current NOTAM system.

NUMBER OF NOTAMS

ICAO states that in 2020 the number of published NOTAMs exceeded 1.7 million, while as on 2021 November 1st 2 the number of NOTAMs in operation was 35879³. European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) states that the number of NOTAMs increases by 100000 annually. For 10 years in a row the number of NOTAM has reduced only in 2020 by 5%, on account of decrease in number of flights due to COVID-19 pandemic.

Let us take the charter flight Moscow (SVO/UUEE) – Mumbai (BOM/VABB), on the aircraft An-124-100, as an example in order to realize the scale of the issue. Ahmadabad (Sardara Vallabhai Patela, AMD/VAAH) and Goa (Dabolim, GOI/VOGO) will be used as flight plan alternates, № 1 and № 2 respectively. The route of the flight will pass through 10 flight information regions (FIRs), and 23 airports will be used on the route as alternates.

FDs will have to analyze 1250 NOTAMs (236 pages), 221 NOTAMs (17,7%) are older than 3 months, and 99 NOTAMs (7,9%) are older than 1 year, (tab. 1). It must be noticed, that NOTAM older than 3 months is the Doc 8126, ICAO violation. According to the document, temporary amendments older than 3 months must be published as Supplements (SUP) to AIP. When the amendments are of repetitive nature, the following NOTAM data must be entered in AIP by Amendments to AIP. Consequently, NOTAM older than 3 months should not exist. PIB of relevant NOTAMs will be formed after the FD proceeds the whole NOTAM package. There will be only 170 of 1250 (40 of 236 pages) in the PIB, so that the flight crew significantly saves time.

Table 1

NOTAMs for flight SVO/UUEE – BOM/VABB

Object	NOTAM			PIB
	Number	NOTAM age		
		> 3 months	> 1 year	
Departure airport SVO/UUEE	20	5 (25%)	1 (5.0%)	19
FIR	747	76 (10.2%)	24 (3.2%)	37
Enroute alternates	393	80 (20.4%)	30 (7.6%)	54
Destination airport BOM/VABB	35	20 (57.1%)	6 (17.1%)	22
№ 1 alternate AMD/VAAH	15	4 (26.7%)	3 (20.0%)	8
№ 2 alternate GOI/VOGO	40	36 (90.0%)	35 (87.5%)	30
Total number of NOTAMs	1250	221 (17.7%)	99 (7.9%)	170
Number of pages	236	45 (19.1%)	18 (7.6%)	40

² Global campaign on NOTAM improvement (NOTAM2021), ICAO. Available at: <https://www.icao.int/airnavigation/information-management/Pages/GlobalNOTAMcampaign.aspx> (accessed: 27.08.2021).

³ NOTAMeter, ICAO. Available at: <https://www.icao.int/airnavigation/information-management/Pages/NOTAMeter.aspx> (accessed: 27.08.2021).

ICAO has developed the information system NOTAMeter together with The Notam Team (fixingnotams.org), founded by Mark Zee, to estimate the quality of NOTAMs in operation. The given system allows us to estimate the quality of NOTAM judging by NOTAM age criteria, dividing all the NOTAMs into 3 groups (data as of November 1st, 2021):

1. Current, published less than 3 months ago – 35879 (83.2%);
2. Old, published more than 3 months ago, but from less than 1 year ago – 3796 (10.6%);
3. Very old, published more than a year ago – 2222 (6.2%).

The number of old and very old NOTAMs directly depends on the region of the world. The example of SVO-BOM flight, mentioned above, may serve as a proof, as:

- 17.7% of NOTAMs is published more than 3 months ago (10.6% on average worldwide);
- 7.9% of NOTAMs are published more than 1 year ago (6.2% on average worldwide).

There are NOTAMs about animals on runway, grass mowing in progress, flight charge and politics. The way the FDs and the flight crew should react to the data on possible emergence of animals on runway, is not quite clear. It may absolutely exactly be said that NOTAMs serve as means of shifting responsibility from the airport administration to FD and crew. As a result, the airfield authorities publish the warning NOTAM – instead of solving the problem or closing the runway, taxiway and/or ramp.

NOTAMs about politics are particularly dangerous, as there is often data on Air-Traffic Management (ATM) in such NOTAM, namely instructions of which Air-Traffic Control (ATC) agency the flight crew should follow. Meanwhile there may be two contradictory political NOTAMs in the PIB for the flight crew.

The bright examples of such situations may be:

1. The conflict between Greece and Turkey;
2. The conflict between Russia and Ukraine.

Meanwhile those who publish such NOTAMs, do not realize how harmful it is for flight safety. Most of them would tell you, that there is no such thing as an excessive information, but the following position does not meet the main NOTAM data requirement. There should only be the crucial information in the NOTAM. The thing is that, the more NOTAMs is there in PIB, the higher is the probability of missing the really important one by the flight crew.

PRACTICAL USE OF NOTAM INFORMATION

It is a challenge to analyze a large number of NOTAM in a qualitative way, considering particularly, that most of them are about obstacles and restricted areas, which have a lot of parameters to analyze (validity period, coordinates, expiry or the upper/lower limit of operation) (tab. 2). It is necessary to map the NOTAM data on the flight route in order to estimate their effect. Only after that one can make conclusions about the way the NOTAM data are crucial for the given flight route.

Sometimes it is also difficult to estimate if the NOTAM is crucial due to its size. There frequently are NOTAMs containing two or more parts, while the really important information may be in the middle or in the end of NOTAM text. In general, FDs and the flight crew have to analyze NOTAMs quickly due to its large number and lack of time. That is why there is such a high probability of missing the really important data, hidden in the big NOTAM text.

The "E" field, which is for summary of the information in free form, is one of the most important parts of NOTAM. In spite of the fact that its format is strictly governed by ICAO regulations. The free form of presenting the data allows for creativity, so that there are issues with interpreting the following text [1]. Furthermore, using of the abbreviations significantly reduces the NOTAM informativeness and speed of its reading, exacerbating the situation.

Table 2

Examples of NOTAM

Characteristics	NOTAM	
	Obstacles	Restricted areas
NOTAM	A0608/21 NOTAMR A0593/21 Q) VABF/QOBCE/IV/M/AE/000/008/ A) VABB B) 2105170801 C) 2108162359 EST E) TEMPO OBST CRANE ERECTED AT LCA 185944.1N 0724915.0E RA- DIUS OF CRANE OPS 30M. CRANE MARKED AND LGT F) GND G) 220M AMSL CREATED: 17 May 2021 08:05:00 SOURCE: VABBYNYX	K7375/21 NOTAMN Q) UUWV/QRRCA/IV/BO/W/040/240/ 5017N03954E025 A) UUWV B) 2107190500 C) 2107232359 D) 19-23 0500-2359 E) RESTRICTED AREA ACT: UUR213. F) 1200M AMSL G) FL240 CREATED: 12 Jul 2021 17:27:00 SOURCE: UUUUYNXX
The number of NOTAM parameters	6	6

THE CURRENT NOTAM SYSTEM TECHNICAL RESTRICTIONS

AFTN is one of the key elements of the current NOTAM system. Sending out the NOTAM notifications, flight plans (FPL), communications between the aircraft operators and aviation authorities are made by means of AFTN. Sending out the NOTAM notifications by means of AFTN originated in 1947. International Telegraph Alphabet 2 (ITA-2), implemented in 1924, is a 5-bit character set used as a language.

The use of AFTN technology in 2021, which is essentially a telegraph network, cannot be explained except as a tradition. The AFTN technology restricts the opportunities of the current NOTAM system, as one can send only text messages of the limited size by means of telegraph system, and it firmly restricts the NOTAM format and makes the processes of NOTAM proceeding and accounting more difficult. The consequence of ITA-2 application is a binding nature of using the capital letters, which significantly reduces the text readability and makes it impossible to separate out the crucial information.

THE MODERN WAYS OF SOLVING THE NOTAM PROBLEMS

There were plans of automatizing the NOTAM processing and accounting by entering the "Q" field with data, called Q-code, and encoded by the certain principle, into the NOTAM format. There is a NOTAM with Q-code, which is highlighted in grey, in Figure 3.

```

K7375/21 NOTAMN
Q) UUWV/QRRCA/IV/BO/W/040/240/5017N03954E025
A) UUWV B) 2107190500 C) 2107232359
D) 19-23 0500-2359
E) RESTRICTED AREA ACT: UUR213.
F) 1200M AMSL G) FL240
CREATED: 12 Jul 2021 17:27:00
SOURCE: UUUUYNXX
    
```

Fig. 3. Example of NOTAM with Q-code

Q-code allows Information Systems (IS) to analyze the NOTAM on an automatic basis and estimate the way it effects the flight route, judging by the: coordinates, radius and upper/lower limit of operation of the following NOTAM (tab. 3).

Table 3

Decoding of Q-code NOTAM

Field №	Qualifier	Example	Interpretation
1	FIR – Flight Information Region	UUWV	Moscow FIR
2	NOTAM code, according to Doc 8126, ICAO	QRRCA	Q – Q-code. RR – restricted area. CA – activated
3	Type of traffic – the aircraft flight rules (IFR/VFR)	IV	I – Instrument Flight Rules (IFR). V – Visual Flight Rules (VFR)
4	Purpose – purpose of NOTAM publication	BO	B – include information into PIB. O – data has a crucial operating value
5	Scope	W	W – navigation warning
6	Lower airspace limit (in hundreds of ft.)	040	4000 ft.
7	Upper airspace limit (in hundreds of ft.)	240	24000 ft.
8	Coordinates, radius (in nautical miles)	5017N03954 E025	50° 17 min. N. 039° 54 min. E. 25 nautical miles

Q-code implementation has allowed to reduce load on FDs and aircraft flight crew, but it has not completely solved all the NOTAM problems. Research by Mark Zee showed us, that the basic issue of using the NOTAM with Q-code is – an overly large number of variants while encoding the Q-code, namely 179 topics (60 AGA, 47 ATM, 40 CNS (communication, navigation, surveillance), 27 Nav Warnings (navigation warnings), 5 Other (other information)) and 77 points (16 of availability, 26 of danger, 19 of restriction). The number of probable combinations of 5-character Q-code equals to 13783 in total. And even such a large number of Q-code variants does not solve the given problems, as analysis of all the published NOTAM in 2020 showed us, that 47% of NOTAMs about airfields and 25% of them, about FIRs, use the "XX" or "XXXX" codes. The "XX" or "XXXX" is used only if the operator does not know, which code has to be used to describe the event while creating the NOTAM. As a result, the whole automation of the NOTAM processing and accounting by means of Q-code becomes impossible [2].

The NOTAM problems can be partly solved by means of flight planning systems, particularly, Lido Flight 4D by Lufthansa Systems company. Lido Flight 4D – is flight planning systems, which allows us to plot an optimal flight route judging by the aircraft characteristics, flight rules of the countries, terrain and weather conditions. Lido Flight 4D takes AIP, AMDT, SUP, AIC and NOTAM into consideration, due to its own AI database. Every worldwide published NOTAM is proceeded appropriately by Lufthansa Systems officers, and the extracted information is entered into the database, therefore it is still relevant.

The use of Lido Flight 4D allows us to reduce the load on the FDs and the flight crew in a significant way, due to automatic processing of the majority of the NOTAMs, as the considerable part of the NOTAM is about restricted areas and obstacles. The comparative analysis of the Defense Internet Notam Service (DINS) system with open access and Lido Flight 4D (tab. 4), may serve as a proof. According to Table 4, the use of Lido Flight 4D allowed to reduce the number of NOTAMs from 1250 to 229 (by 82%) and the number of NOTAM pages from 236 to 50 (by 78%). At the same time, the FDs and the flight crew will have to analyze 229 NOTAMs (50 pages) and PIBs, made of 170 NOTAMs (40 pages) respectively, even while using Lido Flight 4D. Such a large number of

NOTAMs, remaining after Lido Flight 4D processing, stems from the complicity of NOTAM automatic processing and accounting, because of its format [3]. It is confirmed by Robert Bobrow research, which showed us, that it is impossible to create a fully automatic system of NOTAM processing and accounting in its current format [4].

Table 4

NOTAM for flight SVO/UUEE – BOM/VABB

Object	NOTAM		PIB
	DINS	Lido Flight 4D	
Departure airport SVO/UUEE	20	23	19
FIR	747	63	37
Enroute alternates	393	75	54
Destination airport BOM/VABB	35	23	22
Flight plan alternate № 1 AMD/VAAH	15	12	8
Flight plan alternate № 2 GOI/VOGO	40	33	30
The total number of NOTAMs	1250	229	170
The number of pages	236	50	40

AIXM AND DIGITAL NOTAM

EUROCONTROL development by European AIS Database (EAD) in 2003 has become the crucial step to digitalization of sources of information. EAD – is the largest centralized aeronautical information database in the world, providing us with guaranteed quality of statistical data management, aeronautical documentation (AIP, AMDT, SUP, AIC, and aeronautical schemes) [5] maintenance and publishing. Kazakhstan, Kyrgyzstan, The Philippines, and many other countries of the world use EAD along with Europe.

The use of Aeronautical Information Conceptual Model (AICM) and Aeronautical Information Exchange Model (AIXM 3.3) initially underlaid in EAD work. Whereby AICM was a logical model and was utilized as the aeronautical database basis/structure. At the same time, AIXM was for electronic data communication between the other users (was used as a standard of electronic information exchange)⁴. AIXM was a set of data, encoded by Extensible Markup Language (XML), its functionality permitted to encode statistic aeronautical data⁵, such as AIP, but not providing with an opportunity of encoding the dynamic aeronautical data⁵, such as NOTAM, in a qualitative way.

In 2003 EUROCONTROL started working at AIXM model upgrading together with the US Federal Aviation Administration (FAA). Change Control Board (CCB) was founded later, to allow the states and companies to participate in AIXM development. That were the results of CCB work:

- AIXM 4.5 release in 2005 as an update for AIXM 3.3;
- AIXM 5.0 release in 2008, since then AIXM consists of 3 basic components:
 - 1) data model in Unified Modelling Language (UML);
 - 2) XML scheme, compatible with Geography Markup Language (GML);
 - 3) the temporality concept, which allows to encode both statistic⁵ (AIP) and dynamic⁵ aeronautical data (Digital NOTAM).

⁴ AIM AICM and AIXM Introduction. AIXM 5. (2006). Second Design Review. Madrid, Spain, 26 p.

⁵ Euro Doc 010. (2003) 2nd ed., Montreal: ICAO, 68 p.

- release of AIXM 5.1 with Digital NOTAM Specification in 2010 (version 1.0) – specifications of different NOTAM events encoding (closing of the runway, etc.);
- AIXM 5.1.1 release in 2019⁶.

AIXM 5.1 data exchange model with Digital NOTAM encoding opportunity has introduced the standard of aeronautical data digital publishing and exchange (fig. 4) to aviation. ICAO considers AIXM to be the best practice of aeronautical data digital formatting and exchange⁷. It should be noted, that XML, GML or another type of program code is what is meant by "digital" format, but not images in .jpg in .pdf [5] at all.

```
AIP: 26 MAR 2020 or AIRAC 26 MAR 2020
AIXM: <gml:beginPosition>2020-03-26T12:00:00Z</gml:beginPosition>
```

Fig. 4. Example of data in AIXM format

It is planned to release an updated Digital NOTAM Specification (version 2.0) in 2021, and an updated AIXM 5.2 in the first quarter of 2022.

Unlike the current NOTAM format, Digital NOTAM is for automatic data processing and interpretation. The information may be presented both in text and graphically, with the help of Information Systems for data decoding. Graphical display of closed taxiways (TWYs) and runways (RWYs) in the airfield scheme, with the help of digital NOTAM, will allow to increase the aircraft taxing operational safety in a significant way [6, 7]. Meanwhile the relevant data of the Digital NOTAM will be displayed on flight crew Electronic Flight Bag (EFB) screens automatically [8, 9]. There are the examples of Digital NOTAM with closed taxiways, both textual and graphical, in Figures 5 and 6.

NOTAM	START DATE	FINISH DATE
(A) 07/389 TWY WL BTN TWY WA AND TWY WB CLSD	JUL 30, 2021	AUG 31, 2021
(B) 07/386 TWY WG BTN RWY 15L/33R AND TWY WA CLSD	JUL 30, 2021	AUG 31, 2021 EST
(C) 07/365 TWY NC BTN TWY NC SPOT 9 AND TWY NG CLSD TO ACFT WINGSPAN MORE THAN 130 FT	JUL 31, 2021	DEC 31, 2021
(F) 07/388 TWY WB BTN TWY WK AND 755FT NORTH TWY WM CLSD	JUL 30, 2021	AUG 31, 2021
(P) 02/044 TWY WD BTN TWY NR AND TWY WB CLSD TO ACFT WINGSPAN MORE THAN 171FT	FEB 6, 2021	PERM
(Q) 08/031 TWY WB BTN TWY WD AND TWY WE CLSD TO ACFT WINGSPAN MORE THAN 118FT	AUG 4, 2021	OCT 4, 2021
(R) 08/032 TWY NR BTN TWY WD AND TWY WB CLSD TO ACFT WINGSPAN MORE THAN 118FT	AUG 4, 2021	OCT 4, 2021

Fig. 5. Digital NOTAM, in textual display

Digital NOTAM creation may also lead to automatic actions, for instance, the procedures, developed by means of the navigational aids, will be unavailable in case of their closing. Digital NOTAM will allow us to increase the accuracy of the information in a significant way while describing the NOTAM area of operation. The transfer of Digital NOTAM, in AIXM format, will be provided by means of the Internet, without use of AFTN, which will optimize the process of data exchange in a significant way.

The efficiency of using Digital NOTAM together with the up-to-date software and channels of communication was proved by Jeppesen, Luftfartsverket (LFV) and EUROCONTROL while researching and the following flight testing. The published NOTAM about closing the taxiway was accepted, processed, and displayed on the flight crew EFB screen [10] in real-time mode while flight testing.

⁶ AIXM. AIXM Versions. Available at: <https://www.aixm.aero/page/versions/> (accessed: 27.08.2021).

⁷ Doc 8126: Aeronautical Information Service. Manual. (2021). 7th ed., ICAO, 660 p.



Fig. 6. Digital NOTAM, in graphical display

FAA is currently in process of shifting from the old U. S. NOTAM System (USNS) to a new updated Federal NOTAM System (FNS). Development of an updated NOTAM system resulted from the need to digitalize the processes of NOTAM gathering, distribution and storage. The purpose of FNS is in, creation of the integrated trustworthy source for NOTAM entering and distribution⁸ in order to increase the NOTAM efficiency, safety, and quality of its information [11].

FNS consists of the complex of services and applications, allowing to create and distribute Digital NOTAM.

Digital NOTAM is created by means of:

- NOTAM Manager – web-application, allowing to create and manage Digital NOTAM;
- NOTAM Origination Service – web-application, allowing the third parties, for instance, companies, providing ATC services on airfield control towers, to create and manage Digital NOTAM;
- eNOTAM II – application for creating and non-digital NOTAM management.

Digital NOTAM distribution is provided by means of:

- NOTAM Search – web-application for Digital NOTAM searching, filtration and sorting. Digital NOTAM are presented in two textual formats: in standard one (only in capital letters) and

⁸ Digital – AIM, Federal NOTAM System. The Federal NOTAM System Concept of Operations Description Available at: <https://notams.aim.faa.gov/#Applications> (accessed: 27.08.2021).

in a form of a common text (in capital and lowercase letters). There is also a opportunity of visualizing the Digital NOTAM information in aeronautical schemes, (fig. 6);

- FNS NOTAM Distribution Service – the intersystem interface, allowing the finite sets to get the Digital NOTAM from FNS.

FAA has implemented the FNS system in more than 339 US airports. Meanwhile it is planned to accomplish the full shift to FNS in August 2023. Consequently, the FNS system is currently warning the users that the NOTAM Search system cannot be used as the only source of information. At the same time European ATM Information Management Service (EAIMS), which will substitute EAD, is planning to provide the opportunity of encoding Digital NOTAM after 2022. Meanwhile it should be noted, that most countries are currently providing only statistic aeronautical data (AIP)⁹ in digital form (AIXM), and the dynamic aeronautical data (Digital NOTAM)⁹ is provided only by the US.

In order to update the current aeronautical information system, ICAO has decided that it was necessary to shift from the Aeronautical Information Service (AIS) concept to Aeronautical Information Management (AIM) [5]. The dynamic, integrated management of aeronautical information through the provision and exchange of quality-assured digital aeronautical data in collaboration with all parties.

The main purpose of the following shift is the digitalization of aeronautical information gathering and exchange between the sources and users of the data, by means of System Wide Information Management [12] (SWIM) concept principles. SWIM concept is intended for aeronautical, weather, flight and other information exchange harmonization between all the users, (fig. 7)¹⁰. The origination of the aviation intranet, based on the use of standard data models and internet protocols, in order to provide the supreme interoperability¹⁰, is the main SWIM challenge. SWIM interoperability should be able to work at the large number of levels: legal, administrative, semantic and technical [13].

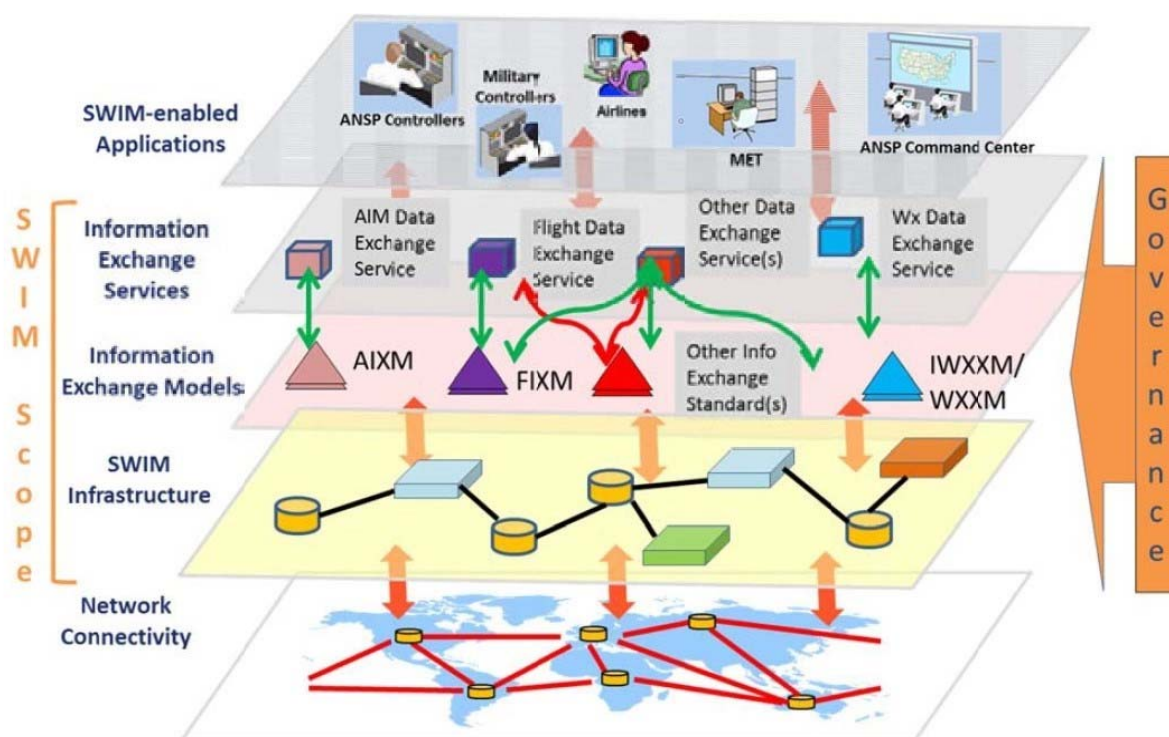


Fig. 7. SWIM concept

⁹ Euro Doc 010. (2003) 2nd ed., Montreal: ICAO, 68 p.

¹⁰ Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept. (2015). ICAO, 88 p.

Therefore, there will be a shift from the outdated communication channels (AFTN, SITA, etc.) and data formats to the SWIM aviation intranet with new digital standards of information exchange, which will allow to connect all the sources and users of information in one whole communication profile [14]. The SWIM concept, developed by EUROCONTROL together with FAA, was approved by ICAO and has become the inalienable part of the Global Air Navigation Plan (GANP) 2016-2030. It is planned to realize the SWIM concept by 2030¹¹.

CONCLUSIONS

Nowadays the NOTAM issues, are still an urgent topic in aviation, as NOTAM directly effects the flight safety and efficiency. These issues are a consequence of not only a human factor (incapacity or incomprehension of the NOTAM instrument), but also of the current NOTAM system technical restrictions: means of communication (AFTN) and NOTAM format. As a result, the up-to-date flight planning system allows us to solve the NOTAM problems only partly, as it is impossible to fully automate the NOTAM processing and accounting.

ICAO shift to AIM concept with use of SWIM is a crucial step to solving the NOTAM issues, as it will allow to increase the quality, promptness and availability of static and dynamic aeronautical data⁵ in a significant way. AIM will also allow us to reduce the charges on developing and supporting the information systems, involved in performing the flights.

Digital NOTAM implementation should solve the technical part of the NOTAM issues, due to use of up-to-date means of communication (Internet) and new standards of information exchange (AIXM), which will have the increase in flight safety and efficiency as a consequence. Meanwhile the NOTAM issues, caused by the human factor, can be solved only if the NOTAM instrument is used correctly:

- Publishing of NOTAM only in case of real necessity, not for shifting responsibility from the airport administration or the aviation authorities to the aircraft operators;
- Making amendments in AIP or publishing SUP, AIC in good time, instead of publishing the NOTAM with a validity period of more than three months.

Solving the NOTAM problem, for its global and systemic nature, is possible only in case directly ICAO and the aviation authorities worldwide take part in it, in order to strengthen the control over NOTAM. As a result, it will become possible to reduce the number of NOTAMs, drawing the attention of the FDs and the aircraft flight crew to the crucial NOTAM.

REFERENCES

1. **Bogunenko, M. and Khomenok, A.** (2013). *Investigation of the drawbacks of the current NOTAM system*. Advances in Aerospace Technology, vol. 56, no. 3, p. 54–58. DOI: 10.18372/2306-1472.56.5424
2. **Zee, M.** (2019). *NOTAM 2021 - Global Campaign on NOTAM improvement*. NOTAMS.org. Available at: <https://fixingnotams.org/notam2021-a-global-campaign-on-notam-improvement> (accessed: 27.08.2021).
3. **Logvin, A.I. and Lukichev, M.V.** (2013). *Handling and accounting problems of NOTAM messages for airlines operations*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 193, p. 95–98. (in Russian)
4. **Bobrow, R.** (2006). *Intelligent semantic query of notices to airmen (NOTAMs)*. Final Technical report. New York, Air Force Research Laboratory, July, 58 p.
5. **Sarayskiy, Y.N.** (2015). *Menedzhment aeronavigatsionnoy informatsii: uchebnoye posobiye* [Aeronautical information management: Tutorial]. St. Petersburg: Universitet GA, 98 p. (in Russian)

¹¹ Doc 9750-AN/963. Global Air Navigation Plan 2016–2030. (2016). 5th ed. Montreal: ICAO, 142 p.

6. Vernaleken, C., Urvoy, C. and Klingauf, U. (2008). *Considerations on symbology, data requirements, and operational concept for integral NOTAM visualization on airport moving map displays*. Proceedings SPIE 6957: Defense and Security Symposium. United States, Orlando, Florida, vol. 6957, 69570M, 16 p. DOI: 10.1117/12.777946

7. Pschierer, C., Sindlinger, A., Barraci, N., Wiesemann, T., Gaertner, M. and Schiefele, J. (2011). *Next generation EFB applications*. Proceedings SPIE 8042: Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics V; and Enhanced and Synthetic Vision 2011, vol. 8042, 80420U. DOI: 10.1117/12.885960

8. Esler, D. (2019). *Ending Notam nonsense in the digital age?* Available at: <https://fixingnotams.org/ending-notam-nonsense-in-the-digital-age/> (accessed: 23.11.2021).

9. Li, R. (2009). *Digital aeronautical information management (D-AIM) trials*. 2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, p. 1–13. DOI: 10.1109/ICNSURV.2009.5172857

10. Sindlinger, A., Zimmer, N., Wiesemann, T., Li, R., Andersson, M. and Stricht, S. (2010). *Automated NOTAM processing for a graphical and textual integration on data link equipped aircraft*. 2010 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, p. G1-1–G1-9. DOI: 10.1109/ICNSURV.2010.5503254

11. Burgstaller, F., Steiner, D., Schrefl, M., Kepler, J., Gringinger, E., Wilson, S. and Stricht, S. (2015). *AIRM-based, fine-grained semantic filtering of notices to airmen*. 2015 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, D3, p. 1–13. DOI: 10.1109/ICNSURV.2015.7121222

12. Wilson, S., Suzić, R. and Stricht, S. (2014). *The SESAR ATM information reference model within the new ATM system*. 2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings, p. L3-1–L3-13. DOI: 10.1109/ICNSURV.2014.6819999

13. Zimmer, N., Schiefele, J., Bayram, K., Hankers, T., Frank, S. and Feuerle, T. (2011). *Rule-based NOTAM & Weather notification*. 2011 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings, p. O1-1–O1-9. DOI: 10.1109/ICNSURV.2011.5935352

14. Wiesemann, T., Sindlinger, A., Zimmer, N., Schiefele, J., Clark, J. and Morales, F. (2011). *An integrated operations solution for Gate-to-Gate airline operations*. 2011 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, p. M8-1–M8-12. DOI: 10.1109/ICNSURV.2011.5935348

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei V. Prokhorov, Operations Planning Manager, Safety & Navigation, Volga Dnepr-Unique Air Cargo, Inc., andreipronavigator@gmail.com.

ВЛИЯНИЕ NOTAM НА БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕТОВ (ОБЗОР)

А.В. Прохоров¹

¹Волга-Днепр-Юник Эйр Карго, Инк., Те-Вудлендс, Техас, США

Целью данной работы является анализ и оценка влияния NOTAM на безопасность и эффективность выполнения полетов. Рассмотрены основные проблемы, связанные с NOTAM: количество NOTAM, практическое применение информации из NOTAM, технические ограничения текущей системы NOTAM. Приведены примеры негативного воздействия NOTAM на качество аэронавигационного обеспечения, безопасность и эффективность выполнения полетов. Также представлена практика решения проблем, связанных с NOTAM, в мире с помощью Q-code и систем планирования полетов (на примере

Lido Flight 4D). Представлена концепция Европейской аэронавигационной базы данных (EAD – European AIS Database), разработанная на основе Аэронавигационной модели обмена информацией (AIXM – Aeronautical Information Exchange Model). Рассмотрена концепция Digital NOTAM (цифровой NOTAM), реализованная на базе AIXM и предназначенная для обмена, автоматической обработки и интерпретации динамических аэронавигационных данных. Разобрана новая модернизированная система NOTAM – Федеральная система NOTAM (FNS – Federal NOTAM System), разработанная Федеральным управлением гражданской авиации (FAA – Federal Aviation Administration) США, позволяющая кодировать Digital NOTAM. Проанализированы планы ICAO по переходу от концепции Обеспечения аэронавигационной информацией (AIS – Aeronautical Information Service) к Управлению аэронавигационной информацией (AIM – Aeronautical Information Management) с применением принципов концепции Общесистемного управления информацией (SWIM – System Wide Information Management). В результате проведенного анализа текущей системы NOTAM и модернизированной системы NOTAM (FNS от FAA) были сделаны выводы о том, что внедрение Digital NOTAM должно решить техническую составляющую проблем, связанных с NOTAM, благодаря использованию современных средств связи (интернет) и новых стандартов обмена данными (AIXM), что приведет к повышению уровня безопасности и эффективности выполнения полетов. При этом проблемы с NOTAM, вызванные человеческим фактором, остаются неразрешенными по причине некорректного использования инструмента NOTAM.

Ключевые слова: NOTAM, Digital NOTAM, аэронавигационная информация, AIXM, SWIM, GANP 2016-2030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bogunenko M., Khomenok A.** Investigation of the drawbacks of the current NOTAM system // *Advances in Aerospace Technology*. 2013. Vol. 56, no. 3. P. 54–58. DOI: 10.18372/2306-1472.56.5424
2. **Zee M.** NOTAM 2021 - Global Campaign on NOTAM improvement [Электронный ресурс] // NOTAMS.org. URL: <https://fixingnotams.org/notam2021-a-global-campaign-on-notam-improvement> (дата обращения: 27.08.2021).
3. **Логвин А.И., Лукичев М.В.** Проблемы обработки и учета сообщений NOTAM при обеспечении рейсов авиакомпании (обзор) // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2013. № 193. С. 95–98.
4. **Bobrow R.** Intelligent semantic query of notices to airmen (NOTAMs). Final Technical report. New York: Air Force Research Laboratory, July 2006. 58 p.
5. **Сарайский Ю.Н.** Менеджмент аэронавигационной информации: учеб. пособие. СПб.: Университет ГА, 2015. 98 с.
6. **Vernaleken C., Urvoy C., Klingauf U.** Considerations on symbology, data requirements, and operational concept for integral NOTAM visualization on airport moving map displays // *Proceedings SPIE 6957: Defense and Security Symposium*. United States, Orlando, Florida, 15 April 2008. Vol. 6957. 69570M. 16 p. DOI: 10.1117/12.777946
7. **Pschierer C.** Next generation EFB applications / C. Pschierer, A. Sindlinger, N. Barraci, T. Wiesemann, M. Gaertner, J. Schiefele // *Proceedings SPIE 8042: Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics V; and Enhanced and Synthetic Vision 2011*, 1 June 2011. Vol. 8042. 80420U. DOI: 10.1117/12.885960
8. **Esler D.** Ending Notam nonsense in the digital age? [Электронный ресурс] // NOTAMS.org. URL: <https://fixingnotams.org/ending-notam-nonsense-in-the-digital-age/> (дата обращения: 23.11.2021).
9. **Li R.** Digital aeronautical information management (D-AIM) trials // *2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, 2009. P. 1–13. DOI: 10.1109/ICNSURV.2009.5172857
10. **Sindlinger A.** Automated NOTAM processing for a graphical and textual integration on data link equipped aircraft / A. Sindlinger, N. Zimmer, T. Wiesemann, R. Li, M. Andersson, S. Stricht // *2010 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference*, 2010. P. G1-1–G1-9. DOI: 10.1109/ICNSURV.2010.5503254
11. **Burgstaller F.** AIRM-based, fine-grained semantic filtering of notices to airmen / F. Burgstaller, D. Steiner, M. Schrefl, J. Kepler, E. Gringinger, S. Wilson, S. Stricht // *2015 Integrated*

Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, 2015. D3. P. 1–13. DOI: 10.1109/ICNSURV.2015.7121222

12. Wilson S., Suzić R., Stricht S. The SESAR ATM information reference model within the new ATM system // 2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings, 2014. P. L3-1–L3-13. DOI: 10.1109/ICNSurv.2014.6819999

13. Zimmer N. Rule-based NOTAM & Weather notification / N. Zimmer, J. Schiefele, K. Bayram, T. Hankers, S. Frank, T. Feuerle // 2011 Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings, 2011. P. O1-1–O1-9. DOI: 10.1109/ICNSURV.2011.5935352

14. Wiesemann T. An integrated operations solution for Gate-to-Gate airline operations / T. Wiesemann, A. Sindlinger, N. Zimmer, J. Schiefele, J. Clark, F. Morales // 2011 Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference, 2011. P. M8-1–M8-12. DOI: 10.1109/ICNSURV.2011.5935348

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Прохоров Андрей Владимирович, менеджер по планированию полётов, безопасности и навигации, Волга-Днепр-Юник Эйр Карго, Инк., andreipronavigator@gmail.com.

Поступила в редакцию 25.09.2021
Принята в печать 25.01.2022

Received 25.09.2021
Accepted for publication 25.01.2022

УДК 629.734/.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-35-52

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОПОРТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ С УЧЕТОМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Ю.И. САМУЛЕНКОВ¹, А.Б. БАБКОВ¹, Я.А. ФИЛАТОВА¹

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

Воздушный транспорт играет существенную роль в обеспечении условий для эффективного функционирования современной экономики. В развитии инфраструктуры авиационно-транспортной системы одинаково заинтересованы авиаперевозчики, субъекты Российской Федерации и государство в целом. Гражданская авиация обеспечивает комплексную безопасность и устойчивость транспортной системы, взаимосвязь регионов и населенных пунктов, особенно районов Сибири, Севера и Дальнего Востока. За постсоветское время в Российской Федерации существенно сократился объем пассажирских и грузовых перевозок, были утрачены авиатранспортные связи между регионами. Такое положение с пассажирскими и грузовыми перевозками создано при значительной концентрации транспортных потоков в узловых аэропортах страны и не позволяет авиатранспортной системе Российской Федерации развиваться всесторонне и гармонично. Комплексная оценка инфраструктуры гражданской авиации страны позволит разработать предложения по модернизации и развитию авиационно-транспортной системы. Важное место среди объектов инфраструктуры воздушного транспорта занимают производственные помещения организаций по техническому обслуживанию воздушных судов. Для выполнения технического обслуживания авиационной техники необходимы производственно-технологические сооружения, ангары и площадки для размещения и хранения средств технического обслуживания, инструмент (общий, индивидуальный, специальный), расходные материалы; помещения планово-диспетчерских отделов; площади для размещения обслуживаемых воздушных судов, их компонентов и др. Кроме того, в зависимости от количества типов обслуживаемых летательных аппаратов, интенсивности и регулярности авиаперевозок необходим расчет сил и средств инженерно-авиационного обеспечения. Эти вопросы требуют детальной проработки на основе научного подхода, в том числе с использованием методов имитационного моделирования.

Ключевые слова: воздушный транспорт, авиаперевозки, инфраструктура аэродромов гражданской авиации, организации по техническому обслуживанию воздушных судов, техническое обслуживание воздушных судов, имитационное математическое моделирование, концепция технического обслуживания воздушных судов.

ВВЕДЕНИЕ

К основным элементам инфраструктуры авиационно-транспортной системы Российской Федерации следует в первую очередь отнести аэропорты (аэродромы), являющиеся сложными многоуровневыми системами.

Аэропорты подразделяются в зависимости от годового объема пассажирских перевозок¹, включая прилетающих, вылетающих и транзитных пассажиров. Согласно данным из реестра Росавиации в стране на июнь 2021 года зарегистрировано 264 аэропорта, из них только 26 принимают более одного миллиона пассажиров в год.

Более 200 аэропортов России относятся к неклассифицированным и аэропортам низших классов. Как правило, это аэропорты местных воздушных линий (с пассажиропотоком 50 тыс. человек в год и менее), расположенные в отдаленных, труднодоступных районах страны с общим населением более 15 миллионов человек. Содержание таких аэропортов, расположенных в 14 регионах страны, в пригодном для эксплуатации состоянии без государственной поддержки невозможно.

Распределение аэропортов РФ по классам в 2021 г. представлено в табл. 1.

¹ ВНТП 1-85 Ведомственные нормы технологического проектирования аэропортов. М.: ГПИ и НИИ Аэропроект, 1986. 58 с.

Таблица 1
Table 1

Распределение аэропортов РФ по классам на 2021 г.
Distribution of airports by grade in the Russian Federation for 2021

Класс аэропорта	Годовые объемы перевозок, тыс. чел.	Количество аэропортов	Процентное соотношение, %
Внеклассные	Более 10000	4	3,7
Класс I	10000–7000	0	0
Класс II	7000–4000	4	3,7
Класс III	4000–2000	9	8,5
Класс IV	2000–500	24	22,7
Класс V	500–100	19	18
Неклассифицируемые	Менее 100	46	43,4
Итого	–	106	100

Примечание. Отсутствуют данные по 158 неклассифицируемым аэропортам.

Авиакомпании России базируются в 38 базовых аэропортах и 2 сезонных (Сочи и Анапа). Их можно рассматривать как узловые аэропорты с разными объемами перевозок. Самые крупные из них: Шереметьево, Домодедово, Внуково, Пулково, Кольцово и Толмачево.

К основным элементам аэропорта относится аэродром, аэровокзал, производственные помещения для выполнения технического обслуживания (ТО) воздушных судов (ВС) и др. На аэродроме также располагаются места стоянки и хранения воздушных судов², находящихся в ожидании вылета, технического обслуживания, поставки запасных частей и материалов (ЗЧМ), выполнения директив летной годности и др.

За период 2008–2020 годов построены новые аэропорты Платов (г. Ростов-на-Дону), Гагарин (г. Саратов), комплекс новой взлетно-посадочной полосы (ВПП) в аэропорту Шереметьево, Итуруп (о. Итуруп), Сабеттаа, Талакан, Тобольск, Бованенково. Выполнены работы по реконструкции аэродромных комплексов и введены в эксплуатацию 52 ВПП в аэропортах Астрахань, Абакан, Анадьрь, Анапа, Баратаевка, Белгород, Владивосток, Внуково, Воронеж, Горно-Алтайск, Иркутск, Кызыл, Киров, Екатеринбург, Магас, Мурманск, Игарка, Богородское, Казань, Пенза, Бугуруслан, Магадан, Минеральные Воды, Липецк, Владикавказ, Махачкала, Нижний Новгород, Новосибирск, Николаевск-на-Амуре, Норильск, Палана, Пенза, Улан-Удэ, Уфа, Елизово, Волгоград, Краснодар, Самара, Саранск, Сасово, Сочи, Хатанга, Храброво, Чумикан, Чокурдах, Элиста, Шереметьево, Хабаровск, Оссора, Соловки.

По данным Росавиации, в мае 2021 г. в Государственном реестре аэродромов и вертодромов гражданской авиации Российской Федерации значились 233 аэродрома³: класса А – 13 (5,6 %), класса Б – 33 (14,2 %), класса В – 78 (33,5 %), класса Г – 73 (31,3 %), класса Д – 21 (9 %), класса Е – 15 (6,4 %). Распределение аэродромов по классам приведено в табл. 2.

Анализ показывает, что большая часть аэродромов РФ соответствует классам В и Г и может принимать самолеты класса А и В⁴. В зависимости от классификационной скорости (скорость, в 1,3 раза превышающая скорость сваливания в посадочной конфигурации при максимальной сертифицированной посадочной массе) воздушные суда классифицируются на категории А, В, С, D, E, F, H. К категории воздушных судов А и В относятся самолеты Ан-2, Л-410, Ил-114, вертолеты.

² Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 02.07.2021) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2021. 137 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 15.08.2021).

³ Государственный реестр аэродромов и вертодромов гражданской авиации Российской Федерации по состоянию на 28.05.2021 [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2021. 9 с. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-geestr-grajdanskij-ajerodromov-rf/> (дата обращения: 15.08.2021).

⁴ Doc 8168 OPS/611: Правила аэронавигационного обслуживания Производство полетов воздушных судов. Том I: Правила производства полетов. 5-е изд. // ИКАО, 2006. 279 с.

Таблица 2
Table 2

Распределение аэродромов РФ по классам за 2021 г.
Distribution of airports by grade in the Russian Federation within 2021

Класс ВПП ⁵	Минимальная длина ВПП в стандартных условиях, м	Количество аэродромов	Процентное соотношение, %
А	3200	13	5,6
Б	2600	33	14,2
В	1800	78	33,5
Г	1300	73	31,3
Д	1000	21	9
Е	500	15	6,4
Итого	–	233	100

В Российской Федерации около 70 % взлетно-посадочных полос с искусственным покрытием (ИВПП) было построено в советский период и нуждается в проведении капитального ремонта [1].

Следует отметить, что более чем у десяти аэродромов из реестра Росавиации истекли сроки действия Свидетельств о государственной регистрации³.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНОЙ СЕТИ АЭРОПОРТОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Значительное количество аэродромов имеют только грунтовые взлетно-посадочные полосы (ГВПП), у которых ограниченные эксплуатационные возможности, и их использование вызывает трудности, особенно в период межсезонья.

За последний год из действующей сети выбыло 44 аэродрома⁶. Сбалансированное развитие авиатранспортной системы важно как для страны в целом, так и для многих заинтересованных субъектов РФ, в первую очередь расположенных в удаленных и труднодоступных регионах Сибири, Крайнего Севера и Дальнего Востока (составляющих около 60 % Российской Федерации). В этих районах авиация часто единственный круглогодичный вид транспорта), и это диктует необходимость переноса приоритетного внимания и, соответственно, финансирования на развитие аэродромов (аэропортов), в первую очередь расположенных в северных и восточных регионах России [2].

При формировании перечня опорной сети аэродромов (аэропортов) РФ учитывались объемы пассажиропотоков и грузов на международных и внутренних линиях, общественная значимость и национальная безопасность (рис. 1). В реестр были включены 11 международных узловых аэропортов, 25 узловых аэропортов внутренних линий, 21 аэропорт из условий социальной значимости и внутренней связности авиатранспортной системы и 64 аэропорта, не включенных в предыдущие группы⁷ [3].

⁵ МТ РФ приказ от 25 августа 2015 г. № 262 (ред. от 24.11.2017) об утверждении ФАП «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки ГВС» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2017. 153 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187688/ (дата обращения: 15.08.2021).

⁶ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 мая 2021 № 1349-р «О закрытии для обслуживания воздушных судов некоторых аэродромов гражданской авиации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2021. 1 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_384925/ (дата обращения: 15.08.2021).

⁷ Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 г. [Электронный ресурс] // pandia.ru. 2008. 76 с. URL: <https://pandia.ru/text/77/191/17688.php> (дата обращения: 15.08.2021).

Статический коэффициент подвижности на воздушном транспорте в России за последние 10 лет находится в диапазоне 0,7–0,78 и указывает на низкий уровень мобильности населения. Вместе с тем этот коэффициент не в полной мере характеризует потребности населения и состояние инфраструктуры аэродромной (аэропортовой) сети. Для планомерного развития авиационно-транспортной системы страны, в том числе регионов Сибири и Дальнего Востока, требуется прежде всего создание высокотехнологичной промышленности на местах и комфортные условия жизни населения: обеспеченность жильем, доступность здравоохранения, качественное образование, культура, социальная безопасность и др.

Через 36 международных и внутрироссийских узловых аэропортов, включенных в опорную сеть аэропортов, за последние годы проходит около 80 % пассажиропотока, а большая часть международных перевозок осуществляется через четыре узла аэропортов страны.

Парк гражданских воздушных судов РФ насчитывает 8933 летательных аппарата¹⁰ и включает ВС для коммерческих воздушных перевозок, выполнения авиационных работ, учебные самолеты и вертолеты, дирижабли, а также беспилотные летательные аппараты, планеры, автожиры, аэростаты и т. д.

В реестре эксплуатантов воздушных судов РФ, имеющих сертификат для осуществления коммерческих воздушных перевозок, зарегистрировано 2177 ВС¹¹, из них 1195 отечественного производства.

Большинство современных самолетов гражданской авиации спроектировано по аэродинамической схеме с низкорасположенными двигателями, что требует реконструкции существующих ИВП и рулежных дорожек, предъявляет повышенные требования к чистоте поверхности аэродрома [6]. Кроме того, проведение различных видов периодического ТО АТ предусматривает наличие ангарных комплексов, производственных помещений и площадок, стоянок для хранения неисправных ВС, в том числе из-за отсутствия запасных частей и материалов (ЗЧИМ).

За счет внебюджетных источников построены и введены в эксплуатацию новые пассажирские терминалы в 22 аэропортах (Анапа, Белгород, Благовещенск, Владивосток, Волгоград, Казань, Красноярск (Емельяново), Менделеево, Нижний Новгород, Пермь (Большое Савино), Петрозаводск, Самара, Саранск, Симферополь, Сочи, Тюмень, Уфа, Храброво, Шереметьево, Челябинск, Череповец, Якутск).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ И ПОМЕЩЕНИЙ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ТО ВС

Инженерно-авиационное обеспечение процесса технической эксплуатации авиационной техники как составляющая аэропортовой деятельности включает комплекс работ по поддержанию исправности или работоспособности ВС.

Для ТО авиационной техники применяются различные средства наземного обслуживания общего применения (СНО ОП) и средства наземного обслуживания специального применения (СНО СП), которые могут быть как в составе организаций по ТО ВС, так и в составе иных структур:

- воздухокислородозаправочное оборудование и оборудование для заправки водой;
- аэродромные электрические установки, аэродромные подвижные электроагрегаты;
- универсальные подвижные гидроустановки;
- аэродромные кондиционеры и универсальные моторные подогреватели;
- тягачи-буксировщики и аэродромные самоходные подъемники, подъемные площадки, погрузчики, площадки обслуживания, телескопические площадки обслуживания;

¹⁰ Государственный реестр ГВС РФ. 06.07.2021 г. [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2021. 537 с. URL: <https://m.favt.gov.ru/opendata-table?id=2500> (дата обращения: 15.08.2021).

¹¹ «Реестр эксплуатантов и воздушных судов» для сайта Росавиации на 06.07.2021 г. [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2021. 22 с. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-aviakompanii-reestr/> (дата обращения: 15.08.2021).

- комплекты гидроподъемников, домкраты, несамоходные краны;
- средства доступа (стремянки, лестницы, помосты, подъемные площадки);
- средства неразрушающего контроля, контрольно-проверочная аппаратура и др.

Организации по ТО ВС могут выполнять, кроме работ по всем видам ТО, изготовление и замену компонентов ВС, изменение конструкции ВС (доработки, бюллетени промышленности, директивы летной годности) или выполнение его ремонта, работы по расшифровке полетной информации, ремонту технологического оборудования, оснастки и СНО СП [7].

На состояние инфраструктуры организации по ТО ВС оказывают влияние виды и режимы ТО ВС, уровень оснащённости СНО, параметры состояния, функционирования и работоспособности АТ, требования конструкторской документации ВС, показатели безотказности и долговечности изделий АТ.

Техническая эксплуатация АТ как часть жизненного цикла ВС может включать в себя процесс функционирования АТ (использование по назначению, ожидание использования по назначению, хранение и др.), выполнение различных видов и форм ТО, контроль технического состояния и восстановление свойств АТ.

К ТО АТ относится комплекс выполняемых на ней работ (операций), имеющих целью подготовку ВС к полетам, поддержание исправности, работоспособности при использовании ее по назначению, при хранении и транспортировании¹².

Система технической эксплуатации (СТЭ) в общем случае включает в себя нормативно-правовую базу, организационную структуру с производственными и функциональными связями между элементами (службами и отделами) и мероприятия, обеспечивающие своевременное и качественное решение поставленных задач. В состав СТЭ конкретных типов АТ также входит производственно-техническая база (ангары для ТО ВС, производственные помещения и площадки), средства измерений, СНО СП, контрольно-проверочная аппаратура, инструмент и технологическая оснастка и др.

Особенностями инфраструктуры гражданской авиации являются топливозаправочные комплексы, специально оборудованные территории организаций по ТО ВС (производственные помещения, места стоянок ВС, специальные площадки, ангары).

Объекты авиатопливообеспечения предназначены для обеспечения горюче-смазочными материалами (ГСМ) и спецжидкостями ВС, организаций по ТО ВС и включают в себя наземные склады ГСМ, средства и системы заправки, склады нефтепродуктов. Задачи по обеспечению объектов гражданской авиации России ГСМ решают около 200 организаций, имеющих сертификат на право деятельности (цифры приведены с учетом альтернативных топливозаправочных комплексов (ТЗК)).

Организации по ТО ВС являются структурными подразделениями предприятий гражданской авиации и предназначены для выполнения различных видов ТО ВС. На сегодняшний день 430 организаций по ТО имеют действующие сертификаты соответствия¹³.

Большая часть имущественной базы организаций по ТО ВС (ангары, производственные помещения и площадки; оборудование, необходимое для обслуживания ВС) досталась появившимся на российском рынке авиаперевозчикам после распада Советского Союза. В связи со значительным износом производственных помещений и площадок требуются значительные вложения в развитие инфраструктуры авиационной транспортной системы, совершенствование нормативно-правовой базы [8]. Следует отметить, что в связи с изменением хозяйственной деятельности авиационных организаций многие нормативные акты утратили законодательную си-

¹² Приказ Минтранса России от 20 июня 1994 г. № ДВ-58 «Об утверждении "Наставления по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России. НТЭРАТ ГА-93"».

¹³ Перечень организаций по ТО, имеющих действующий сертификат соответствия на 01 декабря 2021 г. [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2021. 29 с. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-podderzhanie-letnoj-godnosti-perechen-orgaizacij-po-teh-obslujivaniyu/> (дата обращения: 15.08.2021).

лу, в частности ВНТП 11-85 «Ведомственные нормы технологического проектирования авиационно-технических баз в аэропортах».

Для мест стоянок хранения ВС выделяют специальные места или площадки, подготовленные по размерам для определенных типов ВС (универсальные, частично универсальные). Проблема нехватки мест стоянок хранения в базовых аэропортах затрагивает многие авиакомпании России (например, нехватка мест стоянок хранения для самолетов авиакомпании «Аэрофлот» в базовом аэропорту Шереметьево). Рекомендуемые нормативы количества мест стоянок составляют 10 % от базовых типов ВС [9]. Однако большой запас мест стоянки ВС так же непозволителен, как и их нехватка. Для расчета оптимального количества мест стоянок целесообразно применять имитационные методы моделирования в связи с большим количеством стохастических параметров – безотказности и контролепригодности ВС, сроков поставки ЗЧМ, уровня оснащенности СНО ОП и др.

Для имитационного моделирования процессов функционирования организаций по ТО ВС целесообразно применять прикладное программное обеспечение, в частности Arena Simulation версия 16.1¹⁴.

Для обеспечения научно обоснованного подхода к проведению эксперимента с целью оценки влияния количества ВС в парке авиакомпании, надежности АТ, сроков поставки ЗЧМ, количества и уровня квалификации инженерно-технического персонала на потребное количество мест стоянок ВС составим матрицу планирования эксперимента (табл. 3). Следует отметить, что вопросам планирования численного эксперимента посвящено значительное количество работ в отечественной и зарубежной научной литературе [10–14].

Таблица 3
Table 3

Фрагмент матрицы планирования эксперимента по оценке времени нахождения ВС на хранении (в ожидании поставки ЗЧМ, устранения скрытых отказов и др.)

The experiment planning matrix fragment to estimate the aircraft available time (waiting for spare parts and materials delivery, isolating hidden failures, etc.)

Наименование факторов	Обозначение	Размерность	Значение параметра	
			min	max
Вероятность выполнения ТО за заданное время	$P_{ТО}$	–	0,80	0,95
Вероятность своевременной поставки ЗЧМ	$P_{ЗЧМ}$	–	0,70	0,95
Средняя продолжительность выполнения одного вида периодического ТО (ПТО)	$T_{пто}$	дней	3	30
Средняя трудоемкость выполнения ПТО	$\tau_{пто}$	чел.-час	500	5000
Количество ВС, обслуживаемых организацией по ТО в год	$n_{ВС}$	шт.	30	50
Среднее время ожидания поставки ЗЧМ	$T_{ож}$	дней	3	21

Для проведения эксперимента по имитационному моделированию состояния системы ТО ВС в процессе выполнения ПТО разработан модуль в среде Arena Simulation (рис. 2). В общем случае количество ВС, прошедших ПТО, зависит от времен нахождения в процессе приемки на ТО, непосредственного выполнения ПТО, среднего времени ожидания поставки ЗЧМ и других факторов.

Основой подобных имитационных математических моделей, как правило, является математический аппарат теории систем массового обслуживания (СМО), предназначенный для обслуживания потока заявок, имеющих, как правило, случайный характер.

¹⁴ Arena Simulation Software [Электронный ресурс] // Rockwell Automation. URL: <https://www.rockwellautomation.com/ru-ru/products/software/arena-simulation.html> (дата обращения: 15.08.2021).

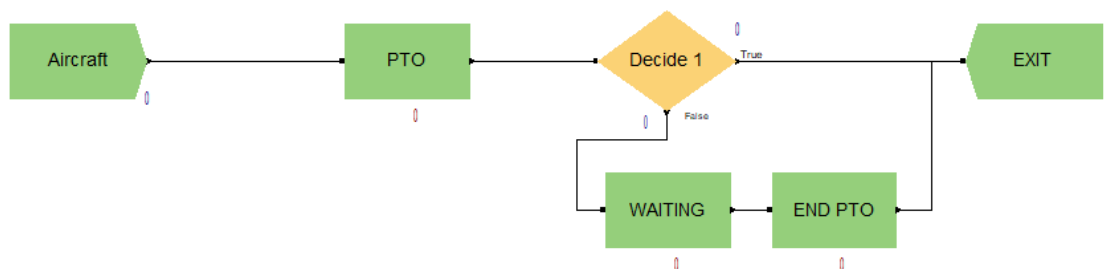


Рис. 2. Графический модуль имитационной модели системы ТО ВС в среде Arena Simulation: Aircraft – входной блок ВС на ПТО; PTO – блок процесса ПТО ВС; Decide 1 – логический блок распределения ВС на подготовку к полетам и на ожидание поставки ЗЧМ; WAITING – модуль ожидания поставки ЗЧМ; END PTO – модуль окончания ПТО; EXIT – модуль выхода ВС из ПТО

Fig. 2. The graphic module of the aircraft maintenance system simulation model in the Arena Simulation Aircraft environment – the input Aircraft Periodic Maintenance block; PM – the Aircraft Periodic Maintenance process block; Decide 1 – the logic block of the Aircraft distribution to prepare for flights and wait for Spare Parts and Materials delivery; WAITING – the module of waiting for Spare Parts and Materials delivery; END Periodic Maintenance – the module of Periodic Maintenance completion; EXIT – the module of the Aircraft exit from the Periodic Maintenance

В результате этого может образовываться очередь на обслуживание либо изделия покидают СМО необслуженными. В качестве характеристик эффективности СМО могут выступать: вероятность своевременного удовлетворения ЗЧМ, среднее время нахождения на различных видах ТО, закон распределения времени ожидания ТО и др. [15, 16].

В результате проведенных исследований получена зависимость среднего времени нахождения ВС в состоянии ПТО от среднего времени поставок ЗЧМ и от вероятности своевременной поставки ЗЧМ (рис. 3).

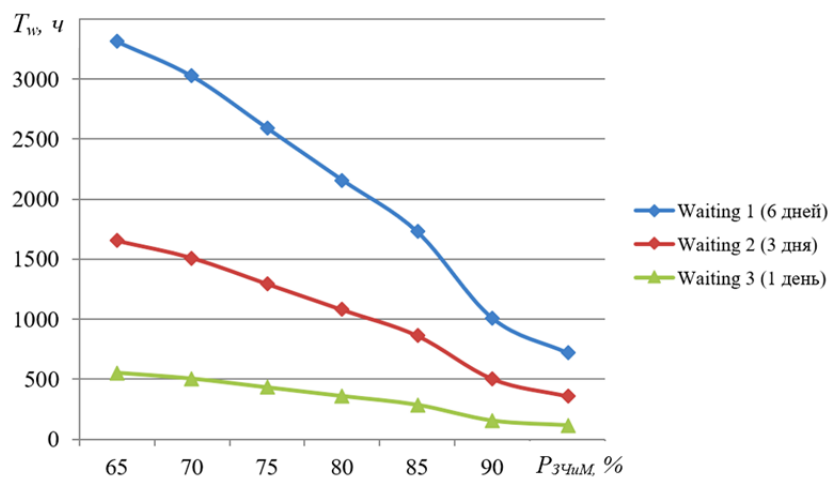


Рис. 3. Зависимость среднего времени нахождения ВС в состоянии WAITING (ожидание) от среднего времени поставок ЗЧМ и от вероятности своевременной поставки ЗЧМ

Fig. 3. Dependence of the aircraft average available time in the WAITING status on the Spare Parts and Materials delivery average time and the probability of just-in-time Spare Parts and Materials delivery

Анализ результатов имитационного моделирования в среде Arena Simulation требует определенных навыков, и этому посвящено немало работ [17].

Исследования показали, что с изменением $P_{ЗЧМ}$ от 0,95 до 0,6 время ожидания устранения отложенных отказов увеличивается от 240 до 3300 часов. Это требует значительно большего количества мест стоянок для ВС, ожидающих окончания ПТО, по сравнению с традиционными подходами.

В организациях по ТО ВС, в зависимости от разрешенного вида ТО, может быть различная организационная структура, включающая: цеха оперативного и периодического ТО, механический цех, участки, лаборатории, мастерские, подразделения инженерного обеспечения и соответствующие помещения и площади¹⁵. В аэропортах I–III классов должны быть предусмотрены ангарные корпуса для организаций по ТО ВС [8], но в общем случае это зависит от требований конструкторской документации на АТ. Смежные виды работ по одной специальности могут объединяться в одном подразделении (цехе, участке).

При проектировании организаций по ТО ВС необходимо учитывать разрешенные виды работ по системам и компонентам ВС и предусмотреть необходимые производственные площади и помещения (рис. 4):

– помещения групп «Конструкция планера ВС», «Двери и люки ВС», «Управление ВС», «Остекление ВС», «Противообледенительная система и противопожарная система» (ПОС и ППС) (рис. 4, поз. 1), «Гидросистема» (ГДС), «Топливная система» (ТС), «Система кондиционирования воздуха и система автоматического регулирования давления» (СКВ и САРД), «Водяной балласт», «Шасси», «Пневмосистемы и вакуумные системы» (рис. 4, поз. 2);

– помещение групп «Авиационные двигатели и вспомогательная силовая установка» (АД и ВСУ), «Система увеличения тяги» (рис. 4, поз. 3);

– помещение групп «Трансмиссии вертолетов», «Несущие винты (НВ) вертолетов», «Воздушные винты» (рис. 4, поз. 4);

– помещение группы «Неразрушающий контроль» (рис. 4, поз. 5);

– помещение группы «Система автоматического управления и автопилота» (рис. 4, поз. 6);

– помещение группы «Системы индикации и регистрации» (рис. 4, поз. 7);

– помещение группы «Системы электроснабжения и освещения» (рис. 4, поз. 8);

– помещение группы «Кислородное оборудование» (рис. 4, поз. 9);

– помещение группы «Оборудование связи и ПНО» (рис. 4, поз. 10);

– помещение группы «Бытовое и аварийно-спасательное оборудование» (рис. 4, поз. 11);

– служебное помещение планово-диспетчерского отдела, службы управления производством и качеством¹⁶ (рис. 4, поз. 12);

– помещение (место) для ведения технической документации (рис. 4, поз. 13);

– помещение для обеспечения управления работами по ТО ВС (рис. 4, поз. 14);

– помещение для технического обслуживания компонентов (рис. 4, поз. 15);

– помещение (место) для хранения инструментов общего, индивидуального и специального назначения (рис. 4, поз. 16);

– помещение собственной учебной базы (рис. 4, поз. 17);

– помещение (место) для хранения документации (пономерной, о выполненных работах на АТ, о проведенных внутренних аудитах¹⁷) (рис. 4, поз. 18);

– изолированные помещения для выполнения экологически опасных и вредных работ (покраска, очистка, мойка, сварка (рис. 4, поз. 19); механическая обработка (рис. 4, поз. 20));

¹⁵ МТ РФ Приказ от 25.09.2015 г. № 285 «Об утверждении ФАП "Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим ТО ГВС. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих ТО ГВС, требованиям ФАП"» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2015. 31 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187899/ (дата обращения: 15.08.2021).

¹⁶ Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация ВС. Часть I: Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. Международная организация гражданской авиации. 10-е изд. // ИКАО, 2016. 304 с.

¹⁷ Контрольные карты выездной проверки соответствия или несоответствия заявителя требованиям ФАП, утвержденным приказом Минтранса России от 25.10.2015 № 285 [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2016. 23 с. URL: <https://favt.gov.ru/deyatelnost-podderzhanie-letnoj-godnosti-perechen-normativnyh-dokumentov/?id=3372> (дата обращения: 15.08.2021).

- помещения и площади для хранения запасных компонентов и расходных материалов (исправных отдельно от неисправных) (рис. 4, поз. 21, 28);
- помещение для раздельного хранения исправных компонентов, оборудования, инструмента и материалов от неисправных компонентов, оборудования, инструмента и некондиционных материалов (рис. 4, поз. 22);
- помещение подразделения выполнения текущего ремонта конструкции планера, компонентов и систем ВС (рис. 4, поз. 23);
- помещение бытового назначения и служебное помещение (рис. 4, поз. 24, поз. 25);
- площади для размещения гражданских воздушных судов (места стоянки ВС) (рис. 4, поз. 26, 27, 29, 30); их компонентов (рис. 4, поз. 28), достаточные для исключения их повреждения во время выполнения работ;
- площади для размещения и хранения оборудования и материалов¹⁸ (рис. 4, поз. 31);
- наличие вентиляции, освещения, возможности поддержания температуры, влажности, иных условий в месте работ, достаточных для выполнения заявленных (разрешенных) работ в условиях, предусмотренных эксплуатационной документацией и документацией разработчика.

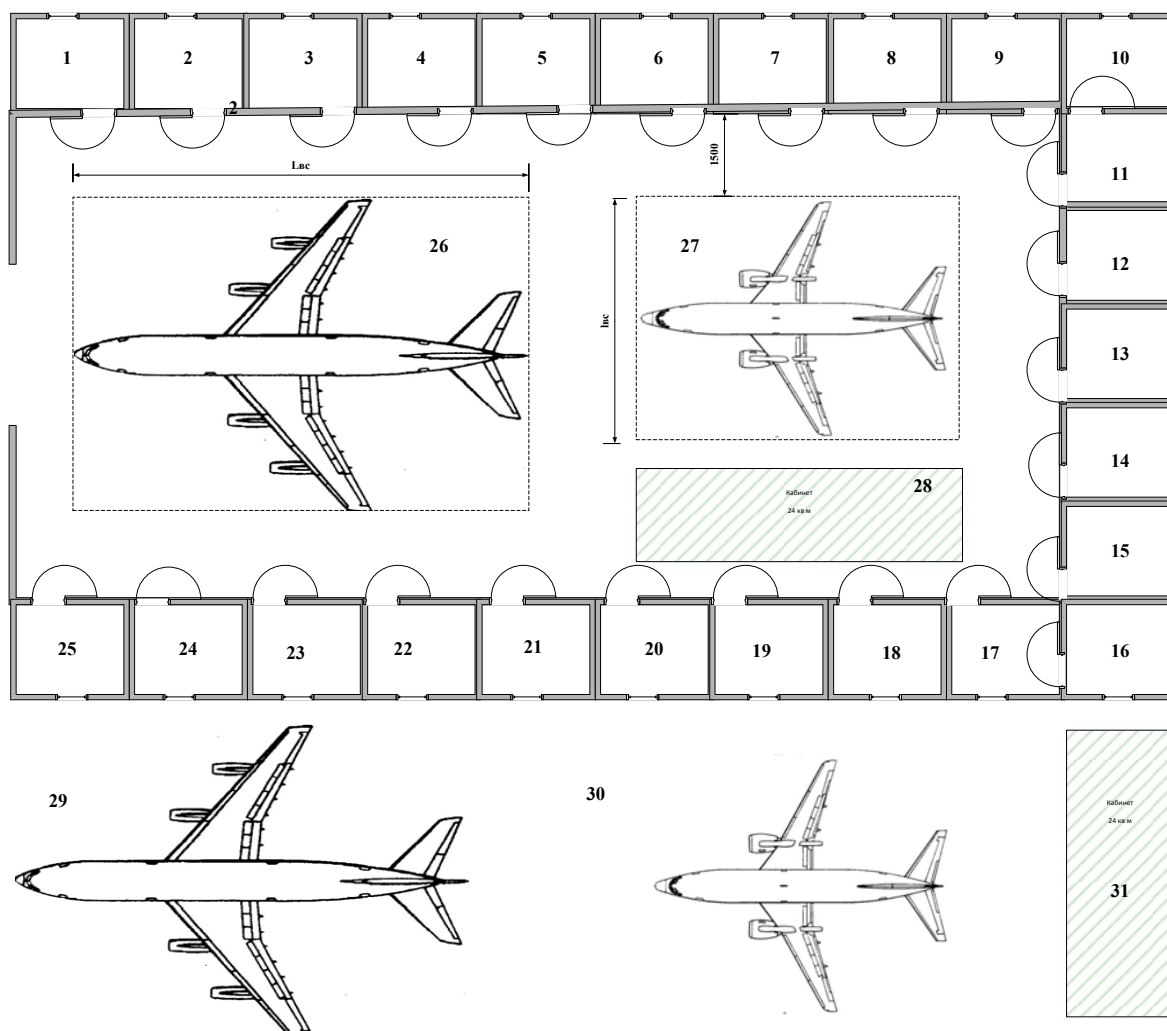


Рис. 4. Типовая схема производственных помещений и площадей организации по ТО ВС
Fig. 4. The typical scheme of workplace and operating area for the Aircraft Maintenance Organization

¹⁸ Дос 9760: Руководство по летной годности. 4-е изд. // ИКАО, 2020. 468 с.

Организация по ТО ВС владеет на праве собственности, аренды или ином законном основании инструментами, материалами, оборудованием, необходимыми для выполнения разрешенных видов работ, в соответствии с эксплуатационной документацией.

Организация по ТО ВС в процессе выполнения комплекса работ по поддержанию летной годности обязана применять средства, указанные в документации разработчика ВС или его компонента¹⁹.

Для использования альтернативных СНО СП, оборудования и инструментов с техническими характеристиками, эквивалентными указанным в документации разработчика ВС и компонентов, необходимо в Руководстве Организации произвести процедуру такой замены.

Организация по ТО ВС имеет право на собственной производственной базе изготавливать детали и сборочные единицы АТ в соответствии с требованиями конструкторской документации разработчика ВС или компонента. Изготовленные изделия разрешается устанавливать только на ВС, проходящее техническое обслуживание в данной Организации. Это возможно при указании в Руководстве Организации процедур организации выполнения таких работ.

При сертификации организаций ТО ВС по EASA Part 145 необходимо представить Maintenance Organisation Exposition (МОЕ), Руководство по техническому обслуживанию (Maintenance Control Manual) с общим описанием производственной базы Организации.

РАСЧЕТ СИЛ И СРЕДСТВ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ ВС

Организация по ТО ВС разрабатывает производственный годовой план с учетом затрат планируемых видов ТО, при этом учитывается количество и квалификация руководящего, подтверждающего и привлекаемого персонала. Организация по ТО ВС укомплектовывается квалифицированным персоналом для выполнения всех видов заявленных работ, в том числе достаточным для выполнения планируемого объема работ, контроля и надзора качества ТО в соответствии с действующим сертификатом деятельности Организации. Также в Руководстве по деятельности организации по ТО ВС должны быть прописаны действия при изменении объема планируемых работ или в случае нехватки инженерно-технического состава при конкретном ТО летательного аппарата, на смену или на период²⁰.

Организация по ТО ВС должна располагать необходимым оборудованием, инструментами и расходными материалами для выполнения утвержденного объема работ.

Для контроля соблюдения требований охраны труда и мер производственной безопасности в каждой организации по ТО ВС, если численность штатных сотрудников более 50 человек, создается служба охраны труда или вводится должность специалиста по охране труда, обладающего соответствующими компетенциями²¹.

При подготовке производства Организация должна иметь структуру, соответствующую объему и степени сложности планируемого комплекса работ, необходимое количество квалифицированного подтверждающего и привлекаемого персонала, достаточный уровень оснащенности средствами наземного обслуживания специального применения, инструментом и оборудованием. Для эффективного решения задач по ТО ВС, авиационным организациям необходи-

¹⁹ ГОСТ Р 55867-2013 Воздушный транспорт. Метрологическое обеспечение на воздушном транспорте. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

²⁰ Otar Part 145 Aircraft Maintenance Organisation Approval [Электронный ресурс] // [airsafety.aero](https://www.airsafety.aero). 2021. 27 с. URL: <https://www.airsafety.aero/Requirements-and-Policy/OTARs/Part-145-Aircraft-Maintenance-Organisation-Approval.aspx> (дата обращения: 15.08.2021).

²¹ Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.11.2021) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2021. 303 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 15.08.2021).

мо учитывать обязательные требования нормативно-правовой базы по охране труда, мерам производственной безопасности и ограничения в трудовой деятельности персонала²².

При разработке типовой организационной структуры организации по ТО ВС невозможно, да и не нужно учитывать все детальные требования нормативно-правовой базы, а задача состоит в построении такой схемы, которая включала бы наиболее важные и существенные положения нормативной документации и давала возможность творчески подходить к построению реальной структуры организации по ТО ВС (рис. 5).

При оценке трудоемкости и продолжительности ТО ВС, расчета времени ожидания ЗЧМ, исправности парка ЛА целесообразно использовать математические методы имитационного моделирования системы ТО ВС на основе марковских и полумарковских процессов [18, 19].

Для определения годового объема работ организации по ТО необходимо знать тип и количество обслуживаемых ВС, трудоемкость выполнения различных форм ТО, средний годовой налет ВС и др.

Для учета и оценки основных факторов, влияющих на трудоемкость и продолжительность ТО ВС, рекомендуется проведение исследований влияния значимости факторов на основные параметры летной деятельности авиационной организации. В зарубежной нормативной документации отдельным пунктом выделяется внеплановый простой ВС по технической причине (AOG), связанной с отсутствием ресурсов для его восстановления (запасных частей, инструмента, документации и т. д.).

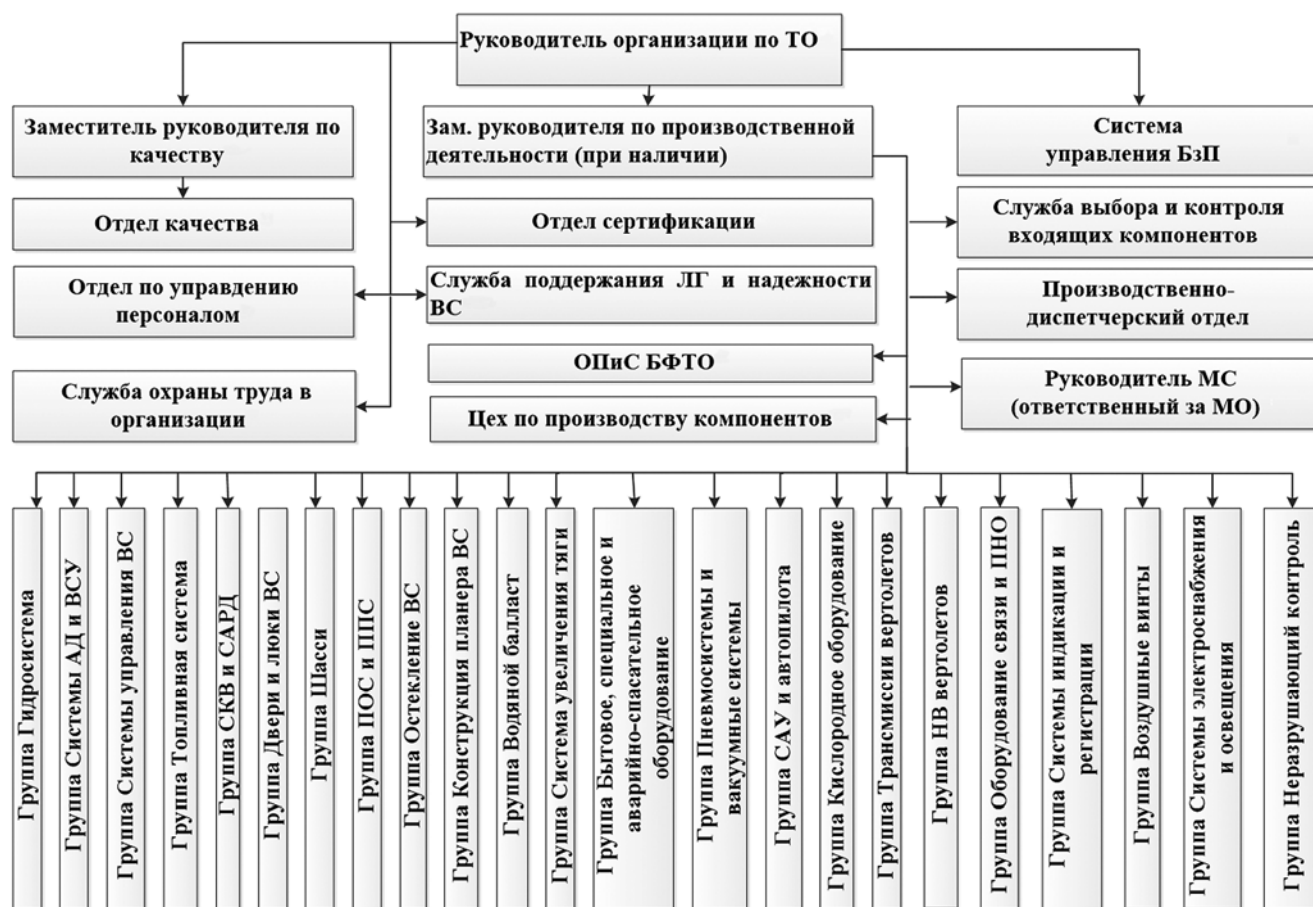


Рис. 5. Типовая структура организации по ТО ВС
Fig. 5. The typical structure of the Aircraft Maintenance Organization

²² МТ РФ Приказ от 25.09.2015 г. № 285.

В организациях по ТО ВС, как правило, имеется отдел подготовки и сопровождения базовых форм технического обслуживания (ОП и С БФТО)²³.

Заместитель директора по ПЛГ наделен корпоративными полномочиями для обеспечения подразделений по ПЛГ необходимым количеством квалифицированного персонала, помещениями и оборудованием.

Для определения годового потребного фонда трудозатрат организации по ТО следует учитывать трудоемкость форм ТО типа ВС, количество ВС, средний годовой налет и др.:

$$Q_{\text{общ}} = \sum_i^n \prod_j^m (T_{ij} \cdot N_{ij}) + \sum_{i=1}^n (T_{\text{нki}} \cdot N_{\text{нki}}) + \sum_{i=1}^n (T_{\text{соi}} \cdot N_{\text{соi}}) + \sum_{i=1}^n (T_{\text{опi}} \cdot N_{\text{опi}}) + \sum_{i=1}^n (T_{\text{хрi}} \cdot N_i),$$

где $Q_{\text{общ}}$ – годовой потребный фонд трудозатрат организации по ТО, чел-час;

n – количество типов ВС;

T_{ij} – трудоемкость i -го типа ВС j -й формы ТО (принимается из эксплуатационной документации на ВС), чел-час;

N_{ij} – количество ВС i -го типа находящихся на j -м ТО, чел-час;

$T_{\text{гс}}$ – средний годовой налет на ВС i -го типа, ч;

N_i – число ВС i -го типа;

$T_{\text{нki}}$ – трудоемкость неразрушающего контроля i -го изделия авиационной техники (двигатель, компоненты планера ЛА и пр.), чел-час;

$N_{\text{нki}}$ – количество видов неразрушающего контроля i -го изделия авиационной техники (двигатель, компоненты планера ЛА и др.);

$T_{\text{соi}}$ – трудоемкость i -го специального ТО (после превышения эксплуатационных перегрузок, выкатывания за пределы ВПП, попадания ПП в двигатель и др.) ВС, чел-час;

$N_{\text{соi}}$ – количество видов специального ТО, выполняемых на ВС за рассматриваемый период ТО, ч;

$n_{\text{пто}}$ – календарный период данного вида периодического ТО, дней;

$t_{\text{диагн}}$ – время нахождения на диагностике, ч;

$\tau_{\text{диагн}}$ – трудозатраты на диагностирование, чел.-час.

Общее количество персонала организации по ТО ВС $N_{\text{персонала}}$ будет находиться по формуле

$$N_{\text{персонала}} = \sum_i^n \frac{Q_i}{\Phi_{\text{эффekt } i}},$$

где Q_i – потребный годовой фонд трудозатрат i -го подразделения организации по ТО, чел.-час, $\Phi_{\text{эффект } i}$ – располагаемый годовой фонд трудозатрат одного специалиста i -го подразделения организации по ТО, чел.-час (табл. 4).

Например, фонд рабочего времени при 40-часовой неделе на 2021 г. составляет 1 972 ч. Количество дней за 2021 г.: календарных – 365, рабочих дней – 247, выходных (праздничных) – 118²⁴.

²³ Там же.

²⁴ Производственный календарь на 2021 год [Электронный ресурс] // Государственная Дума Федерального Собрания РФ. 2020. 2 с. URL: <http://duma.gov.ru/news/49744/> (дата обращения: 15.08.2021).

Организации по ТО ВС при создании программы по ТО руководствуются исходными данными по планированию ТО (ИДПТО), Методическими рекомендациями МР-03-001²⁵. В Программе ТО ВС указываются количество исполнителей, специальность, трудозатраты на выполнение вспомогательных и основных работ на авиационной технике. Организация по ТО ВС в индивидуальном порядке, в зависимости от сил и средств инженерно-авиационного обеспечения, устанавливает продолжительность выполнения форм ТО.

Таблица 4
Table 4

Распределение эффективного фонда времени и трудозатрат по подразделениям организации по ТО ВС
Distribution of the effective time and labor costs fund by divisions of the Aircraft Maintenance Organization

Подразделение организации по ТО	Располагаемый фонд рабочего времени, ч	Эффективный фонд рабочего времени, ч	Трудозатраты по формам ТО, чел-час	Трудозатраты на СТО, чел-час	Трудозатраты на ТО при хранении, чел-час
Планер ВС и ФС	1972	1845	2500	1250	350
АД и ВСУ	1972	1845	1250	250	350
Неразрушающий контроль	1972	1825	750	250	150
(САУ) и автопилота	1972	1845	250	50	150
Кислородное оборудование	1972	1845	250	—	—
Электроснабжение и освещение	1972	1845	350	50	50
Системы индикации и регистрации	1972	1895	250	50	50
Оборудование связи и ПНО	1972	1895	250	50	50
Бытовое, специальное и аварийно-спасательное оборудование	1972	1895	750	50	50

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований:

- выполнен анализ состояния аэродромов (аэропортов) России, предложены подходы к определению оптимального количества опорной (базовой) сети аэродромов (аэропортов);
- получены результаты времени ожидания ВС устранения отложенных отказов (состояние WAITING) от среднего времени поставок ЗЧМ и от вероятности своевременной поставки

²⁵ Методические рекомендации МР-03-001 по одобрению программ ТО ВС, зарегистрированных в государственном реестре ГВС РФ [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2014. 45 с. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/6/0/f/4/8/60f488d2ea1e375940c2c964e2318a16.PDF> (дата обращения: 15.08.2021).

ЗЧМ, на основании которых есть возможность определить требуемое количество мест стоянок для ВС, ожидающих окончания ПТО;

– предложена типовая схема производственных помещений и площадей организации по ТО ВС с учетом требований нормативно-правовой базы РФ, ИКАО, Европейского агентства по безопасности полетов (EASA);

– разработана типовая структура организации по ТО ВС с учетом требований нормативно-правовой базы РФ, ИКАО, Европейского агентства по безопасности полетов (EASA);

– для определения годового потребного фонда трудозатрат и общего количества персонала организации по ТО предложено учитывать дополнительные факторы – прогнозируемое количество и вид специального ТО ВС, объем прогнозируемых видов неразрушающего контроля АТ, эффективный фонд времени и трудозатрат и др.

Результаты исследования рекомендуется использовать на авиационных предприятиях, в организациях по ТО ВС, разработчикам и изготовителям авиационной техники на этапах проектирования, производства и эксплуатации ВС.

Результаты исследований позволяют:

- авиационным организациям – планировать ожидаемые простои и трудоемкость ТО на основе среднего времени поставок ЗЧМ и вероятности своевременной поставки ЗЧМ;
- авиационным организациям – проектировать комплекс производственных помещений и площадей для выполнения ТО ВС с учетом несвоевременной поставки ЗЧМ;
- организациям по ТО ВС – разрабатывать организационную структуру, рассчитывать годовой потребный фонд трудозатрат и количество персонала организации по ТО ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболь Л.С.** К вопросу развития гражданской авиации в России // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 190. С. 138–143.
2. **Козочкина О.А.** Социально-экономическое обоснование развития региональной аэродромной (аэропортовой) сети в РФ: автореф. дисс. ... канд. эконом. наук. М.: ГУУ, 2009. 24 с.
3. **Соколин А.В., Фридлянд А.А.** Критерии и алгоритм формирования состава национальной (опорной) сети аэропортов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 118. С. 70–73.
4. **Галабурда В.Г., Иванова Е.А., Флягина Т.А.** Роль транспортной подвижности населения в повышении качества жизни и развития общества // Транспортное дело России. 2016. № 5. С. 101–103.
5. **Галабурда В.Г., Бубнова Г.В., Иванова Е.А.** Транспортный маркетинг: учебник для вузов / Под общ. ред. В.Г. Галабурды. М.: МИИТ, 2011. 452 с.
6. **Борзова А.С., Железная И.П.** Анализ состояния инфраструктуры аэропортов Московского авиационного узла // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 107–110.
7. **Петров А.Н.** Методология поддержания летной годности воздушного судна на основе управления эффективностью системы его технического обслуживания и ремонта // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 130. С. 33–41.
8. **Железная И.П.** Стратегия развития наземной инфраструктуры аэропортов гражданской авиации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 202. С. 21–24.
9. **Бабков А.Б.** Аэропорты и воздушные трассы: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы «Проектирование генерального плана аэропорта». М.: ИД Академии Жуковского, 2020. 64 с.
10. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. М.: Наука, 1976. 280 с.
11. **Рогов В.А., Позняк Г.Г.** Методика и практика технических экспериментов: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2005. 283 с.

12. Кубланов М.С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Часть II. Планирование экспериментов и обработка результатов измерений: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп.: М.: МГТУ ГА, 2004. 125 с.

13. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. Выпуск 1 / Пер. с англ. К.Д. Аргуновой, А.М. Талалай, Ю.П. Адлер, В.Н. Варыгина. М.: Статистика, 1978. 224 с.

14. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1978. 112 с.

15. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1980. 208 с.

16. Акоф Р.Л., Сасени М.В. Основы исследования операций / Пер. с англ. В.Я. Алтаева. М.: Мир, 1971. 536 с.

17. Гусева Е.Н. Анализ результатов имитационного моделирования в среде ROCKWELL SOFTWARE ARENA // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2016) с международным участием. Екатеринбург, 12–13 мая 2016 г. Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 194–198.

18. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.

19. Самуленков Ю.И., Филатова Я.А., Грузд А.Д. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 4. С. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самуленков Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей Московского государственного технического университета гражданской авиации, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Бабков Александр Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок на воздушном транспорте МГТУ ГА, orvt@mstuca.aero.

Филатова Яна Александровна, студентка 4 курса Московского государственного технического университета гражданской авиации, yanafilatova787@yandex.ru.

IMPROVING CIVIL AVIATION AIRPORTS INFRASTRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT THE DESIGN PROCESS OF AIRCRAFT MAINTENANCE ORGANIZATIONS

Yuri I. Samulenkov¹, Alexander B. Babkov¹, Yana A. Filatova¹
¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

Air transport is of the essence in providing conditions for the effective performance of modern economic paradigm. Operating airlines, the subjects of the Russian Federation and the State as a whole, are equally interested in the development of air transportation system infrastructure. Civil aviation ensures the transport system integrated safety and stability, the relationship of regions and human settlements, especially Siberia, the North and the Far East regions. Over the post-Soviet period in the Russian

Federation, the volume of passenger and cargo operations has decreased significantly, air transport linkages between regions have been lost. Such a passenger and cargo operations-related situation has occurred with heavy traffic congestion in the country's hubs and does not allow the Russian Federation air transportation system to develop comprehensively and harmoniously. A detailed assessment of the country's civil aviation infrastructure will enable experts to put forward proposals for the air transport system modernization and development. Working space of aircraft maintenance organizations is an integral part among air transport infrastructure facilities. In order to conduct aeronautical equipment maintenance, it is necessary to have engineering and manufacturing objects, hangars and areas to accommodate and store maintenance facilities, equipment (general, individual, special-purpose), consumables, premises for planning and dispatching departments, space to accommodate served aircraft, their components, etc. In addition, depending on the number of served aircraft types, the air transportation volume and regular pattern, the calculation of workforce and means of engineering and aviation support is essential. These issues require in-depth development on the basis of a scientific approach using the simulation modeling methods.

Key words: air transport, air transportation, infrastructure of civil aviation airfields, aircraft maintenance organizations, aircraft maintenance, simulation mathematical modeling, concept of aircraft maintenance.

REFERENCES

1. **Sobol, L.S.** (2013). *To the question of the development of civil aviation in Russia*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 190, p. 138–143. (in Russian)
2. **Kozochkina, O.A.** (2009). *Sotsialno-ekonomicheskoye obosnovaniye razvitiya regionalnoy aerodromno (aeroportovoy) seti v Rossiyskoy Fediratsii: avtoref. dis. ... kand. ekonom. nauk* [Socio-economic justification for the development of the regional airfield (airport) network in the Russian Federation: Abstract of Candidate Economic Sc. Dissertation]. Moscow: GUU, 24 p. (in Russian)
3. **Sokolin, A.V. and Fridlyand, A.A.** (2007). *The criteria and algorithm of forming the composition of the airport network*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 118, p. 70–73. (in Russian)
4. **Galaburda, V.G., Ivanova, E.A. and Flyagina, T.A.** (2016). *The role of transport mobility population in improving the quality of life and development of the company*. Transport Business of Russia, no. 5, p. 101–103. (in Russian)
5. **Galaburda, V.G., Bubnova, G.V. and Ivanova, E.A.** (2011). *Transportnyy marketing: uchebnik dlya vuzov* [Transport marketing: Textbook for Universities], in Galaburda V.G. (Ed.). Moscow: MIIT, 452 p. (in Russian)
6. **Borzova, A.S. and Zheleznaya, I.P.** (2013). *The Moscow hub airports infrastructure condition analysis*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 197, p. 107–110. (in Russian)
7. **Petrov, A.N.** (2008). *Aircraft continuing airworthiness methodology based on the control of the maintenance system effectiveness*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 130, p. 34–41. (in Russian)
8. **Zheleznaya, I.P.** (2014). *The strategy of development of ground based infrastructure of the airports of civil aviation*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 202, p. 21–24. (in Russian)
9. **Babkov, A.B.** (2020). *Aeroporty i vozdushnyye trassy: uchebno-metodicheskoye posobiye po vypolneniyu kursovoy raboty «Proektirovaniye generalnogo plana aeroporta»* [Airports and air routes: educational and methodological guide for the implementation of the course work "Designing the general plan of the airport"]. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 64 p. (in Russian)
10. **Adler, Yu.P., Markova, E.V. and Granovskiy, Yu.V.** (1976). *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh resheniy* [Experiment planning in the search for optimal solutions]. Moscow: Nauka, 280 p. (in Russian)
11. **Rogov, V.A. and Poznyak, G.G.** (2005). *Metodika i praktika tekhnicheskikh eksperimentov: uchebnoye posobie dlya vuzov* [Methodology and practice of technical experiments: a textbook for universities]. Moscow: Academy, 283 p. (in Russian)
12. **Kublanov, M.S.** (2004). *Matematicheskoye modelirovaniye. Metodologiya i metody razrabotki matematicheskikh modeley mekhanicheskikh sistem i protsessov. Chast II. Planirovaniye eksperimentov i obrabotka rezultatov izmereniy: uchebnoye posobiye* [Mathematical modeling. Method-

ology and methods of developing mathematical models of mechanical systems and processes. Part II. Planning of experiments and processing of measurement results: Tutorial]. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: MGTU GA, 125 p. (in Russian)

13. Kleijnen, J.P.C. (1974). *Statistical techniques in simulation. Part I*. New York: M. Dekker, 285 p.

14. Gorsky, V.G., Adler, Yu.P. and Talalay, A.M. (1978). *Planirovaniye promyshlennykh eksperimentov* [Planning of industrial experiments]. Moscow: Metallurgiya, 112 p. (in Russian)

15. Wentzel, E.S. (1980). *Issledovaniye operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya*. [Operations research: tasks, principles, methodology]. Moscow: Nauka, 208 p. (in Russian)

16. Sasieni, M.W. and Ackoff, R.L. (1968). *Fundamentals of operations research*. John Wiley and Sons, 468 p.

17. Guseva, E.N. (2016). *Analiz rezultatov imitatsionnogo modelirovaniya v srede ROCKWELL SOFTWARE ARENA* [Analysis of simulation results in the ROCKWELL SOFTWARE ARENA environment]. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh (TIM'2016) s mezhdunarodnym uchastiyem* [Heat engineering and informatics in education, science and production: a collection of reports of the V All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists (TIM'2016) with international participation], p. 194–198. (in Russian)

18. Sovetov, B.Ya. and Yakovlev, S.A. (2001). *Modelirovaniye system: uchebnik dlya vuzov* [System modeling: Textbook for Universities]. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: Vysshaya shkola, 343 p. (in Russian)

19. Samulenkov, Yu.I., Filatova, Ya.A. and Gruzd, A.D. (2021). *Aircraft maintenance system simulation mathematical model construction*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 24, no. 4, p. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49 (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri I. Samulenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Operation of Aircraft and Aviation Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Alexander B. Babkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of The Chair of Transportation Organization on Air Transport, Moscow State Technical University of Civil Aviation, opvt@mstuca.aero.

Yana A. Filatova, the 4th year student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yanafilatova787@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

19.09.2021
25.01.2022

Received
Accepted for publication

19.09.2021
25.01.2022

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-53-64

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММЫ СОВМЕСТНОЙ ПОДГОТОВКИ (ПЕРЕПОДГОТОВКИ) АВИАДИСПЕТЧЕРОВ И ПИЛОТОВ

А.И. СТЕПНОВА¹, В.И. КОЧЕРГИН¹, С.М. СТЕПАНОВ¹, В.А. БОРСОЕВ²

¹Ульяновский институт гражданской авиации

имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

²Институт аэронавигации, г. Москва, Россия

Целью статьи является проведение статистического анализа данных, полученных в результате экспериментального исследования. Экспериментальное исследование заключается в проверке уровня знаний обучаемых до и после применения предложенного метода совместной подготовки (переподготовки) авиадиспетчеров и пилотов. Как известно, прогресс в авиации шагнул далеко вперед. Появились воздушные суда четвертого, пятого и шестого поколений. Самолеты и автоматизированные системы стали цифровыми. В целях разработки и внедрения систем АТМ ИКАО определила три основополагающие концепции, которые позволят повысить надежность человека-оператора в будущем. Одной из концепций является автоматизация, ориентированная на человека. Автоматизация подразумевает переход от аналоговых бортовых и наземных систем к цифровым системам. В конечном результате бортовые и наземные системы после модернизации получают аббревиатуру пятого и шестого поколения. Вследствие чего будет необходим новый подход к подготовке (переподготовке) авиадиспетчеров и пилотов по обслуживанию этих систем. Для решения этой задачи необходимо изменить концепцию подготовки летного и диспетчерского состава. В статье дана оценка предложенного нового метода совместной подготовки (переподготовки) авиадиспетчеров и пилотов посредством проведения статистического анализа полученных экспериментальным путем данных. Предложенный метод подготовки позволит улучшить качество обучения, уменьшить количество ошибок авиадиспетчеров и пилотов, что является основными принципами концепции ИКАО. В статье проведен статистический анализ данных по t-критерию Стьюдента и по закону распределения случайных величин, который позволит сделать вывод об эффективности предложенного метода подготовки специалистов.

Ключевые слова: авиадиспетчер, пилот, статистический анализ, совместная подготовка, тренажерная подготовка.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире выражена явная тенденция улучшения развития воздушного транспорта, эффективность которого способствует экономическому прогрессу [1]. Однако такой рост может иметь и противоположный аспект. С одной стороны, это повышение уровня жизни, социальной мобильности и общего благосостояния. С другой стороны, неуправляемые темпы роста воздушного движения могут привести к повышению риска безопасности полетов [2]. Это может произойти в том случае, когда они будут опережать темпы роста нормативных и инфраструктурных процессов, необходимых для их поддержки¹.

Для предотвращения негативных последствий для авиации международная организация гражданской авиации разрабатывает стратегический подход, предусматривающий взаимосвязь темпов роста в обеих областях [3]. В настоящее время это позволит государствам и заинтересованным сторонам воспользоваться преимуществами безопасного устойчивого роста, повышением эффективности и ответственным подходом к охране окружающей среды, в которых мировое общество и экономика нуждаются в настоящее время.

Международной организацией гражданской авиации был разработан глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. Авиационные специалисты играют важную роль для его успешной реализации [4].

¹ Doc 9750-AN/963: Глобальный аэронавигационный план // ИКАО, 2013. 147 с.

При этом важную роль играет подготовка и переподготовка авиационных специалистов, поскольку человеческий фактор влияет на систему организации воздушного движения.

В статье С. Головнина, Г. Дмитриенко «Риски авиатранспортной системы при профессиональной подготовке пилотов диспетчеров» была рассмотрена проблема профессиональной подготовки и возможность появления рисков в процессе подготовки специалистов [5]. Однако в ней не описан риск неправильного взаимодействия. В связи с чем на практике возникают ошибки, влияющие на безопасность полетов. Риск, связанный с отсутствием совместной практики ведения фразеологии с диспетчером в статье имеет критический индекс риска. Однако не только отсутствие совместной практики ведения фразеологии, но и отсутствие совместной отработки навыков решения поставленных задач оказывает существенное влияние на безопасность полетов. Данный риск также может иметь критический индекс риска.

В статье С.М. Головнина «Подготовка пилотов и диспетчеров в виртуальной среде пилотирования и управления воздушным движением» дана оценка проблеме отсутствия взаимодействия пилотов и диспетчеров в период обучения в учебных заведениях [6]. Однако в ней не описан вариант решения данной проблемы.

Предложенная в статье программа совместной подготовки позволит улучшить качество обучения и минимизировать влияние риска неправильного взаимодействия на безопасность полетов.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе научного исследования была разработана компьютерная программа совместной подготовки авиадиспетчеров и пилотов [7]. Она представляет собой рабочее место авиадиспетчера и пилота, которые одновременно имеют возможность выполнять свои технологические операции [8]. Программа создана на основе разработанного алгоритма, который включает базу данных бинарных отношений ошибок [9].

Авиадиспетчерам и пилотам предложено пройти тест на знание специфики работы смежной специальности. Для авиадиспетчеров это вопросы, касающиеся пилотирования воздушного судна [10, 11], для пилотов это принцип управления воздушным движением [12, 13]. Первоначальный тест имел упрощенную форму (вопросы низкого уровня сложности), последующий – усложненную форму (вопросы высокого уровня сложности). Перечень вопросов составлен путем привлечения четырех экспертов, двух действующих диспетчеров и двух действующих пилотов.

В табл. 1 приведены данные после первоначального опроса авиадиспетчеров до совместной тренажерной подготовки.

В опросе авиадиспетчеров принимало участие 84 человека. В первой и третьей группе по 27 человек. Во второй 30 человек. Нолями в таблице отмечены отсутствующие курсанты по списку обучаемых.

Для проверки уровня знаний произведен суммарный подсчет верных ответов. Определен процент верного выполнения теста и выставлены оценки.

Таблица 1
Table 1

Опрос авиадиспетчеров до прохождения совместной тренажерной подготовки
The survey of air traffic controllers prior to the joint simulation training

№ п/п	Д-15-1			Д-15-2			Д-15-3		
	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка
1	28	93	5	25	83	4	13	43	2
2	20	67	3	24	80	4	13	43	2

Продолжение таблицы 1
Continuation of Table 1

№ п/п	Д-15-1			Д-15-2			Д-15-3		
	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка
3	24	80	4	28	93	5	20	67	3
4	20	67	3	25	83	4	19	63	3
5	25	83	4	24	80	4	15	50	3
6	24	80	4	24	80	4	13	43	2
7	23	76	4	24	80	4	13	43	2
8	24	80	4	23	77	4	0	0	0
9	0	0	0	25	83	4	0	0	0
10	20	67	3	16	53	3	24	80	4
...
30	23	77	4	26	87	4	25	83	4

В табл. 2 приведены данные после первоначального опроса пилотов до совместной тренажерной подготовки. В опросе принимал участие 81 человек. В первой группе 27 человек, во второй 24 человека, в третьей 30 человек.

Таблица 2
Table 2

Опрос пилотов до прохождения совместной подготовки
The survey of pilots prior to the joint simulation training

№ п/п	П-15-1			П-15-2			П-15-3		
	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка
1	16	53	3	14	47	2	25	83	4
2	12	40	2	25	83	4	24	80	4
3	12	40	2	20	67	3	10	53	3
4	24	80	4	20	67	3	25	83	4
5	15	50	3	0	0	0	16	53	3
6	16	53	3	0	0	0	24	80	4
7	16	53	3	19	63	3	16	53	3
8	16	53	3	18	60	3	23	77	4
9	20	67	3	14	47	2	20	67	3
10	15	50	3	15	50	3	16	53	3
...
30	20	67	3	14	47	2	26	87	4

В табл. 3 приведены данные повторного опроса авиадиспетчеров после совместной тренажерной подготовки. В опросе принимало участие 84 человека.

Таблица 3
Table 3

Опрос авиадиспетчеров после прохождения совместной подготовки
The survey of air traffic controllers after receiving the joint simulation training

№ п/п	Д-15-1			Д-15-2			Д-15-3		
	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка
1	29	97	5	24	80	4	27	90	5
2	22	73	4	27	90	5	28	93	5
3	24	80	4	29	97	5	17	57	3
4	26	87	4	28	93	5	22	73	4
5	22	73	4	15	50	3	19	63	3
6	28	93	5	27	90	5	16	53	3
7	28	93	5	27	90	5	24	80	4
8	24	80	4	27	90	5	0	0	0
9	0	0	0	28	93	5	0	0	0
10	28	93	5	22	73	4	25	83	4
...
30	27	93	5	22	73	4	27	90	5

В табл. 4 приведены данные повторного опроса пилотов после совместной тренажерной подготовки. В опросе принимал участие 81 человек.

Таблица 4
Table 4

Опрос пилотов после прохождения совместной подготовки
The survey of pilots after receiving the joint simulation training

№ п/п	П-15-1			П-15-2			П-15-3		
	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка	Верных ответов	Процент выполнения	Оценка
1	20	67	3	26	87	4	27	90	5
2	27	90	5	22	73	4	27	90	5
3	28	93	5	24	80	4	22	73	4
4	22	73	4	27	90	5	22	73	4
5	25	83	4	0	0	0	21	70	3
6	24	80	4	0	0	0	19	63	3
7	27	90	5	23	77	4	26	87	4
8	21	70	3	24	80	4	22	73	4
9	19	63	3	22	73	4	24	80	4
10	25	83	4	12	40	2	20	67	3
...
30	27	90	5	28	93	5	15	50	3

Для оценки полученных результатов был проведен статистический анализ данных [14, 15]. Был применен t-критерий Стьюдента для сравнения средних значений двух зависимых выборок [16].

В табл. 5 приведены исходные данные для расчета эмпирического значения критерия.

Таблица 5
Table 5

Исходные данные для расчета эмпирического значения критерия Стьюдента
Initial data for calculating the empirical value of the Student criterion

n	x_1	x_2	$d_i = x_1 - x_2$	$d_i - M_d$	$(d_i - M_d)^2$
1	3,9	4,5	-0,6	0,283	0,08
2	3,9	4,5	-0,6	0,283	0,08
3	3,1	4	-0,9	-0,017	0,0003
4	2,5	4	-1,5	-0,617	0,38
5	2,9	4	-1,1	-0,217	0,047
6	3,5	4,1	-0,6	0,283	0,08
Σ	19,8	25,1	-5,3	-	0,67

Примечание. n – количество выборок, x_1 – средний балл до тренажерной подготовки, x_2 – средний балл после тренажерной подготовки, d_i – разница среднего балла до и после тренажерной подготовки.

Для расчета эмпирического значения критерия найдем среднюю разность:

$$M_d = \frac{\Sigma d_i}{n} = -\frac{5,3}{6} = -0,883, \quad (1)$$

где M_d – эмпирическое значение критерия, Σd_i – сумма разницы среднего балла до и после тренажерной подготовки, n – количество выборок.

Стандартное отклонение рассчитываем по формуле

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - M_d)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,67}{5}} = \sqrt{0,133} = 0,365. \quad (2)$$

Эмпирическое значение рассчитываем по формуле

$$t_{\text{эмп}} = \frac{M_d}{\sigma_d / \sqrt{n}} = -\frac{0,883}{0,365 / \sqrt{6}} = -\frac{0,883}{0,149} = -5,93. \quad (3)$$

Критическое значение t-критерия Стьюдента для $df = 5 (n - 1)$ находится между критическими значениями для вероятностей $p = 0,01$ и $p = 0,001$. Следовательно, вероятность $p < 0,01$.

Статистическая гипотеза о равенстве средних значений отклоняется.

Можно сделать вывод о том, что показатель уровня знаний после предложенного метода обучения увеличился статистически достоверно ($p < 0,01$).

Для проверки эффективности программы совместного обучения целесообразно также применить закон распределения случайных величин [17]. В нашем случае оценки, полученные экспериментальным путем, являются случайными величинами. Они дискретны, поэтому закон распределения случайных величин можно представить в виде многоугольника, а не функции распределения.

Проводим расчет частоты (вероятности) событий:

$$p = \frac{m}{n}, \quad (4)$$

где p – частота (вероятность) события, m – количество человек, получивших выбранную оценку, n – количество человек в выбранной группе.

В табл. 6 представлены значения частоты событий до совместной подготовки.

Таблица 6
Table 6

Значения частоты событий для выбранных групп до совместной подготовки
Values of events frequency for the selected groups prior to the joint simulation training

Частота событий	Д-15-1	Д-15-2	Д-15-3	П-15-1	П-15-2	П-15-3
p_2	0	0	0,22	0,44	0,29	0,03
p_3	0,26	0,7	0,44	0,52	0,5	0,4
p_4	0,63	0,73	0,3	0,03	0,21	0,56
p_5	0,11	0,1	0,03	0	0	0

Примечание. p_2 – частота (вероятность) получения оценки 2, p_3 – частота (вероятность) получения оценки 3, p_4 – частота (вероятность) получения оценки 4, p_5 – частота (вероятность) получения оценки 5.

События несовместимы и образуют полную группу, поэтому сумма всех вероятностей p_i будет равна единице.

Единица распределена между возможными значениями случайной величины. На рис. 1 представлен многоугольник распределения до совместной подготовки.

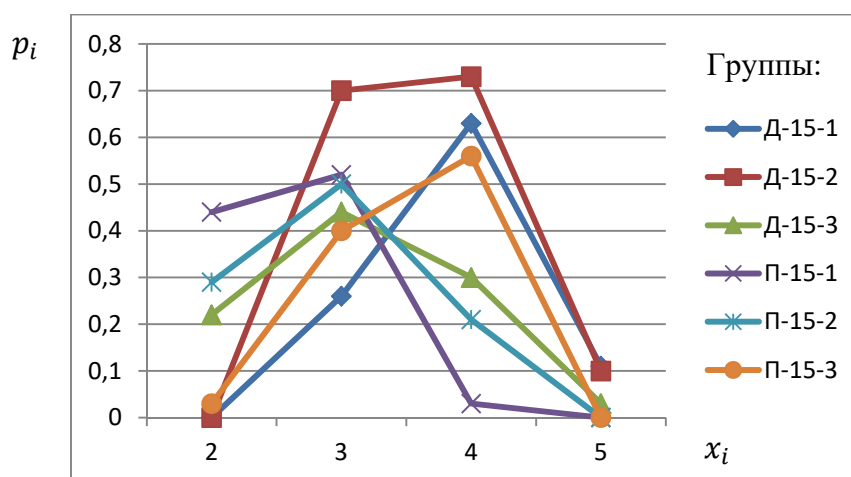


Рис. 1. Многоугольник распределения до совместной подготовки
Fig. 1. Distribution polygon prior to the joint simulation training

В табл. 7 представлены значения частоты событий после совместной подготовки.

Таблица 7
Table 7

Значения частоты событий для выбранных групп после совместной подготовки
Values of events frequency for the selected groups after the joint simulation training

Частота событий	Д-15-1	Д-15-2	Д-15-3	П-15-1	П-15-2	П-15-3
p_2	0	0	0	0,07	0,08	0
p_3	0	0,1	0,3	0,18	0,08	0,23
p_4	0,52	0,33	0,44	0,44	0,62	0,4
p_5	0,48	0,57	0,26	0,29	0,21	0,37

На рис. 2 представлен многоугольник распределения после совместной подготовки.

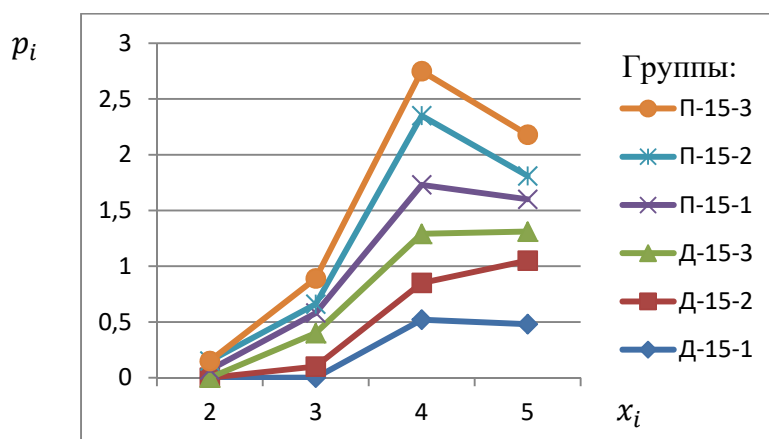


Рис. 2. Многоугольник распределения после совместной подготовки
Fig. 2. Distribution polygon after the joint simulation training

Таким образом, проводя сравнительный анализ получившихся многоугольников распределения, видим, что распределение вероятностей изменилось значительно. Что, несомненно, говорит об эффективности предложенного метода совместной подготовки авиадиспетчеров и пилотов [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат проведенного статистического анализа путем применения t-критерия Стьюдента показал, что статистическая гипотеза о равенстве средних значений не верна, это позволяет сделать вывод о том, что показатель уровня знаний после применения предложенного метода обучения увеличился статистически достоверно ($p < 0,01$) [20].

Для проверки эффективности программы совместного обучения также был применен закон распределения случайных величин. Были построены два многоугольника распределения до и после совместного обучения. Вероятности были подвержены явному изменению. Показатель изменился в сторону увеличения положительных оценок и снизился в сторону отрицательных оценок.

В результате проведенного статистического анализа можно сделать вывод о целесообразности применения программы совместной подготовки авиадиспетчеров и пилотов [21]. До применения программы совместного обучения тест показал низкий уровень знания специфики

работы специалистов смежной специальности. После прохождения совместной подготовки значение среднего балла было увеличено, несмотря на изменения уровня сложности пройденного теста.

Такой метод подготовки целесообразно использовать как в учебных заведениях, так и на авиационных предприятиях, поскольку наличие одновременно двух специалистов при выполнении упражнений не является необходимым условием.

Программа позволяет произвести выбор количества обучаемых [22]. Обосновано это тем, что на авиационных предприятиях нет возможности привлечения одновременно авиадиспетчеров и пилотов в силу большого количественного состава и разбросанности авиационных предприятий. Данное экспериментальное исследование было проведено в учебном заведении, поскольку это отличная возможность привлечения большого количества экзаменуемых авиадиспетчеров и пилотов. Предложенный метод подготовки позволяет уменьшить влияние человеческого фактора [23], сократив количество ошибок, связанных с непониманием особенностей работы специалиста смежной специальности [24, 25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов Н.А. Воздушная навигация. Международные полеты: учеб. пособие. 1-е изд. Новосибирск: Бэсттек-Авиа, 2000. 169 с.
2. Казаков В.А. Системы CNS/ATM: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. 103 с.
3. Чехов И.А. Пути развития систем навигации в рамках внедрения концепции CNS/ATM // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106
4. Сладь Г.В., Шанин А.В. Российский аспект концепции CNS/ATM ICAO, проблемы и решения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. № 1 (312). С. 201–207.
5. Головнин С.М. Риски авиатранспортной системы при профессиональной подготовке пилотов диспетчеров [Электронный ресурс] // Blogspot.com. 2018. URL: <http://sergegolovnin.blogspot.com/?m=0> (дата обращения: 28.10.2021).
6. Головнин С.М. Подготовка пилотов и диспетчеров в виртуальной среде пилотирования и управления воздушным движением [Электронный ресурс] // Blogspot.com. 2016. URL: <http://sergegolovnin.blogspot.com/2016/02/blog-post.html?m=0> (дата обращения: 28.10.2021).
7. Степнова А.И. Анализ эффективности программы совместной тренажерной подготовки авиадиспетчеров и пилотов / А.И. Степнова, С.М. Степанов, В.В. Борсоева, В.А. Борсоев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42
8. Степнова А.И. Разработка модели взаимодействия авиадиспетчеров и пилотов с использованием методов дискретной математики / А.И. Степнова, В.И. Кочергин, С.М. Степанов, В.А. Борсоев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 72–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-72-83
9. Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В. Дискретная математика: учебник для студентов вузов. М.: АСТ: Астрель, 2003. 447 с.
10. Конотоп В.И. Психологический анализ ошибочных действий летчиков при выполнении полетов / В.И. Конотоп, Г.И. Захаренко, А.В. Захарин, С.А. Бевераки // Гуманитарные проблемы военного дела. 2017. № 3 (12). С. 193–196.
11. Щетинина Н.А. Типичные ошибки пилотов при восприятии сообщений радиобмена гражданской авиации // Молодой ученый. 2012. № 2. С. 192–195.

12. **Стионов М.В., Казаков В.А.** Организация системы управления воздушным движением: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА (И), 2010. 68 с.
13. **Филин А.Д., Бестугин А.Р., Санников В.А.** Организация обслуживания воздушного движения: учебник для СПО / Под науч. ред. Ю.Г. Шатракова. М.: Юрайт, 2019. 515 с.
14. **Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариева О.С.** Статистические методы анализа: учеб. пособие. Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2015. 300 с.
15. **Рукавишникова Н.Г., Заверткина Е.Г.** Статистический анализ данных и способы представления результатов исследования: учеб.-метод. пособие. Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2000. 47 с.
16. **Петров П.К.** Математико-статистическая обработка и графическое представление результатов педагогических исследований с использованием информационных технологий: учеб. пособие. Ижевск: ИД «Удмуртский университет», 2013. 178 с.
17. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей: учебник для вузов. 5-е изд. стер. М.: Высшая школа, 1998. 576 с.
18. **Updegrave J.A., Jafer S.** Optimization of air traffic control training at the Federal Aviation Administration Academy [Электронный ресурс] // Aerospace. 2017. Vol. 4, iss. 4: 50. 12 p. DOI: 10.3390/aerospace4040050 (дата обращения: 20.08.2018).
19. **Артюхович М.В., Феоктистова О.Г.** Роль инженерно-технического персонала в обеспечении безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 39–43.
20. **Зубков Б.В., Рыбалкин В.В.** Человеческий фактор и безопасность полетов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1994. 68 с.
21. **Евстигнеев Д.А.** Подготовка авиационного персонала в области человеческого фактора: учеб.-метод. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА, 2009. 65 с.
22. **Kuznetsova N.B.** Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. № 2. С. 240–246.
23. **Kelly D., Efthymiou M.** An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017 // Journal of Safety Research. 2019. Vol. 69. P. 155–165. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.03.009
24. **Moroney W.F., Moreney B.W.** Flight simulation. In: Handbook of aviation human factors, 1999. P. 355–388.
25. **Ellis S., Gerighty T.** English for aviation for pilots and air traffic controllers. Oxford: University Press, 2008. 96 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Степнова Анастасия Ивановна, аспирант кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Nast9679@yandex.ru.

Кочергин Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Uvauga-kvs@yandex.ru.

Степанов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, Uvauga-kvs@yandex.ru.

Борсоев Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой навигационного обеспечения полетов и аэронавигационной информации Института аэронавигации, Borsoev@aeronav.aero.

ON THE SUBJECT OF THE EFFECTIVENESS OF THE ATC AND PILOT JOINT SIMULATION TRAINING (RETRAINING) PROGRAM

Anastasia I. Stepanova¹, Viktor I. Kochergin¹, Sergei M. Stepanov¹,
Vladimir A. Borsoev²

¹*Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev,
Ulyanovsk, Russia*

²*Institute of Air Navigation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The purpose of the article is to conduct a statistical data analysis obtained after the experimental study. The experimental research deals with rating the trainees' level of proficiency before and after the proposed method of the ATC and pilot joint training (retraining). It's common knowledge that progress in aviation has moved far forward. The fourth, fifth and sixth-generation aircraft have come into existence. Aircraft and automated systems have become digital. In order to develop and implement ATM systems, ICAO has identified three fundamental concepts that will allow us to enhance human reliability in the future. One of the concepts is human-oriented automation. Automation involves the transition from the analog onboard and ground systems to digital ones. As a result, the onboard and ground systems, after modernization, will receive the fifth and sixth-generation abbreviation. Subsequently, a new approach will be required to train (retrain) air traffic controllers and pilots to operate these systems. To solve this problem, it is necessary to change the concept of training flight and traffic control personnel. The article provides an evaluation of the proposed new technique for the joint training (retraining) of ATC and pilots by conducting a statistical analysis of experimental data. The proposed training method will enable us to improve the quality of training, reduce a number of pilot and ATC errors, which are the underlying principles of the ICAO concept. The article presents the statistical analysis of data based on the Student t-criterion and the law of random variables distribution, which will make it possible to draw a conclusion about the effectiveness of the proposed method for training specialists.

Key words: air traffic controller, pilot, statistical analysis, joint training, simulation training.

REFERENCES

1. **Mikhaylov, N.A.** (2000). *Vozdushnaya navigatsia. Mezhdunarodnyye polety: uchebnoye posobiye* [Air navigation. International flights: Tutorial]. Novosibirsk: Besttek-Avia, 169 p. (in Russian)
2. **Kazakov, V.A.** (2008). *Sistemy CNS/ATM: uchebnoye posobiye* [CNS/ATM systems: Tutorial]. 2nd ed., pererab. i dop. Ulyanovsk: UVAU GA, 103 p. (in Russian)
3. **Chekhov, I.A.** (2017). *Ways of navigation systems development within the implementation of the CNS/ATM concept*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, p. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106 (in Russian)
4. **Slad, G.W. and Shanin, A.V.** (2011). *The Russian aspekt of the ICAO CNS/ATM concept, problems and resolutions*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 1 (312), p. 201–207. (in Russian)
5. **Golovin, S.M.** (2018). *Riski aviatransportnoy sistemy pri professionalnoy podgotovke pilotov i dispatcherov* [Risks in the air transport system during professional training of pilots and ATC]. Blogspot.com. Available at: <http://sergegolovnin.blogspot.com/?m=0> (accessed: 28.10.2021). (in Russian)
6. **Golovin, S.M.** (2016). *Podgotovka pilotov i dispatcherov v virtualnoy srede pilotirovaniya i upravleniya vozdushnym dvizheniyem* [Training of pilots and ATC in a virtual environment of piloting and air traffic control]. Blogspot.com. Available at: <http://sergegolovnin.blogspot.com/2016/02/blog-post.html?m=0> (accessed: 28.10.2021). (in Russian)
7. **Stepanova, A.I., Stepanov, S.M., Borsoeva, V.V. and Borsoev, V.A.** (2019). *Analysis of the effectiveness of the joint training program for air traffic controllers and pilots*. Civil Aviation High Technologies, no. 5, p. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42 (in Russian)

8. **Stepnova, A.I., Kochergin, V.I., Stepanov, S.M. and Borsoev, V.A.** (2020). *Razrabotka modeli vzaimodeystvia aviadispatcherov i pilotov s ispolzovaniyem metodov diskretnoy matematiki*. Civil Aviation High Technologies, no. 4, p. 72–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-72-83 (in Russian)
9. **Gorbatov, V.A., Gorbatov, A.V. and Gorbatov, M.V.** (2003). *Diskretnaya matematika. Uchebnik dlya vuzov* [Discrete mathematics: Textbook for Universities]. Moscow: AST: Astrel, 447 p. (in Russian)
10. **Konotop, B.I., Zaharenko, G.I., Zaharin, A.V. and Beveraki, S.A.** (2017). *Psychological analysis of erroneous actions of pilots when flying*. Gumanitarnyye problemy voyennogo dela, no. 3 (12), p. 193–196. (in Russian)
11. **Shchetinina, N.A.** (2012). *Tipichnyye oshibki pilotov pri vospriyatii soobshcheniy radioobmena grazhdanskoy aviatsii* [Typical pilot errors in the perception of civil aviation radio messages]. Molodoy uchenyy, no. 2, p. 192–195. (in Russian)
12. **Stionov, M.V. and Kazakov, V.A.** (2010). *Organizatsia sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniyem: uchebnoye posobiye* [Organization of the air traffic control system: Tutorial]. Ulyanovsk: UVAU GA (I), p. 68. (in Russian)
13. **Filin, A.D., Bestugin, A.R. and Sannikov, V.A.** (2019). *Organizatsia obsluzhivaniya vozdushnogo dvizheniya: uchebnik dlya srednego spetsialnogo obrazovaniya* [Organization of air transport services: Textbook for secondary specialized education], in Yu.G. Shatrakov (Ed.). Moscow: Yurayt, p. 515. (in Russian)
14. **Shorohova, I.S., Kislyak, N.V. and Mariev, O.S.** (2015). *Statisticheskkiye metody analiza: uchebnoye posobiye* [Statistical methods of analysis: Tutorial]. Ekaterinburg: IPTs UrFU, 300 p. (in Russian)
15. **Rukavishnikova, N.G. and Zavertkina, E.G.** (2000). *Statisticheskyy analiz dannykh i sposoby predstavleniya rezultatov issledovaniya* [Statistical analysis of data and ways to present research results]. Yaroslavl: Izdatelstvo YaGPU, 47 p. (in Russian)
16. **Petrov, P.K.** (2013). *Matematiko-statisticheskaiya obrabotka i graficheskoye predstavleniye rezultatov pedagogicheskikh issledovaniy s ispolzovaniyem informatsionnykh tehnologiy: uchebnoye posobiye* [Mathematical and statistical processing and graphical representation of the pedagogical research results using IT: Tutorial]. Izhevsk: ID "Udmurtskiy universitet", 178 p. (in Russian)
17. **Ventsel, E.S.** (1998). *Teoria veroyatnostey: uchebnik dlya vuzov* [Theory of probability: Textbook for Universities]. 5th ed., ster., Moscow: Vysshaya shkola, 576 p. (in Russian)
18. **Updegrove, J.A. and Jafer, S.** (2017). *Optimization of air traffic control training at the Federal Aviation Administration Academy. Aerospace*, vol. 4, issue 4: 50, 12 p. DOI: 10.3390/aerospace4040050 (accessed 20.08.2018). (in Russian)
19. **Artyuhovich, M.V. and Feoktistova, O.G.** (2014). *The role of the technical staff in the flight safety*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, № 204, p. 39–43. (in Russian)
20. **Zubkov, B.V. and Rybalkin, V.V.** (1994). *Chelovecheskiy faktor i bezopasnost poletov: uchebnoye posobiye* [Human factor and flight safety: Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 68 p. (in Russian)
21. **Yevstigneyev, D.A.** (2009). *Podgotovka aviatsionnogo personala v oblasti chelovecheskogo faktora: uchebno-metodicheskoye posobiye* [The aviation crew training in human factor: Training manual]. Ulyanovsk: UVAU GA, 65 p. (in Russian)
22. **Kuznetsova, N.B.** (2017). *Transmission of information and communication as a human factor*. Crede Experto: transport, society, education, language, no. 2, p. 240–246. (in Russian)
23. **Kelly, D. and Efthymiou, M.** (2019). *An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017*. Journal of Safety Research, vol. 69, p. 155–165. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.03.009

24. **Moroney, W.F. and Moreney, B.W.** (1999). *Flight simulation*. In: handbook of aviation human factors, p. 355–388.

25. **Ellis, S. and Gerighty, T.** (2008). *English for aviation for pilots and air traffic controllers*. Oxford University Press, 96 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia I. Stepnova, Postgraduate of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, Nast9679@yandex.ru.

Viktor I. Kochergin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, Uvauga kvs@yandex.ru.

Sergei M. Stepanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, Uvauga kvs@yandex.ru.

Vladimir A. Borsoev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Navigational Support of Flights and Aeronautical Information Chair, Institute of Air Navigation, Borsoev@aeronav.aero.

Поступила в редакцию 01.11.2021
Принята в печать 25.01.2022

Received 01.11.2021
Accepted for publication 25.01.2022

УДК 004.031.2

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-65-76

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ АЭРОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.Э. ЭШМУРАДОВ¹, Т.Д. ЭЛМУРАДОВ¹, Н.М. ТУРАЕВА²

¹ *Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
г. Ташкент, Республика Узбекистан*

² *Ташкентский университет информационных технологий имени Мухамада Аль-Хоразми,
г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Прогресс в развитии средств вычислительной техники обеспечивает возможность решать все более широкий класс задач с помощью программных систем, к числу таких задач относится задача автоматической обработки аэронавигационной информации. Это обуславливает необходимость использования новых подходов к проектированию и разработке таких систем. Один из этих подходов основан на применении идеи коллективной деятельности совокупности агентов – многоагентных технологий. В связи с этим цель статьи заключается в рассмотрении особенностей реализации автоматизированной обработки аэронавигационной информации на основе многоагентных технологий. Для достижения обозначенной цели была выбрана проблемно-структурная методология синтеза гибридных систем, которая позволяет создавать самоорганизующиеся модели, каждый элемент которых развивается, получая данные и знания от других элементов. В процессе исследования представлено формальное определение многоагентной системы автоматической обработки аэронавигационной информации, которое включает в себя множество агентов; среду функционирования агентов; совокупность допустимых взаимоотношений между агентами; описание правил формирования сети агентов; набор индивидуальных и совместных действий, коммуникационных взаимодействий, стратегий поведения и поступков; возможность эволюции системы. Также детальное внимание уделено описанию каждого агента, для чего авторами предложено использовать четыре элемента: множество переменных, входы и выходы, автономный метод, который выполняет соответствующие изменения над множеством переменных. В качестве агентов предложено использовать следующие: агент уведомления для летчиков, агент предполетных информационных бюллетеней, агент создания данных, агент авиационных процессов, агент формирования авиационной базы данных, агент создания аэронавигационных карт, агент экспорта (импорта) набора аэронавигационных данных, агент публикаций и справочников. Кроме того, в статье представлено схематическое изображение многоагентной системы автоматизированной обработки аэронавигационной информации и в математическом выражении подробно описан процесс обработки заявки в агенте. Полученные в процессе исследования результаты могут использоваться для повышения эффективности аналитической составляющей в структуре системы формирования прямых и обратных координационных связей при решении задач аэронавигации.

Ключевые слова: автоматизация, обработка, многоагентная система, аэронавигация, процесс, среда.

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие информационных технологий дало толчок совершенствованию аэронавигационных систем как в гражданской, так и в военной авиации. Аэронавигационная информация, полученная аппаратурой пользователей спутниковых радионавигационных систем, позволяет на качественно новом уровне решать задачи управления (лучше воздушными судами) летательными аппаратами и различными объектами военного назначения [1].

Современные высокоточные системы навигации базируются на использовании инерциальных навигационных систем, которые могут быть дополнены как системами спутниковой коррекции, так и системами навигации по геофизическим полям Земли. Так, например, автоматическая бортовая система управления (АБСУ) полетом самолета Airbus 320 включает в себя семь компьютеров управления полетом – два ELAC (Elevator Aileron Computer), три SEC (Spoilers Elevator Computer) и два FAC (Flight Augmentation Computers). В общей сложности АБСУ содержит свыше 130 компонентов¹. Кроме того, эти компоненты получают информацию

¹ AIRBUS A-320 [Электронный ресурс] // SKYbrary. 2017. URL: <https://www.skybrary.aero/index.php/A320> (дата обращения: 14.10.2021).

из многочисленных источников, включая боковые педали и педали руля, инерциальные опорные блоки воздушных данных (ADIRU), интерфейсные блоки управления шасси (LGCIU), компьютеры управления закрылками (SFCC), компьютеры управления полетом (FMGC) и акселерометр и т. д. При такой сложности от того, насколько надежно работает АБСУ, в значительной степени зависит объем нагрузки на экипаж и безопасность полетов в целом.

В подобных условиях возникает необходимость интеграции аэронавигационных составляющих различных систем, которая позволит обеспечивать функционирование автоматизированных систем управления, улучшать мобильное реагирование на изменение обстановки, достигать функциональной устойчивости пилотажно-навигационного комплекса летательного аппарата на отдельных режимах полета. Не подлежит сомнению тот факт, что данная задача может быть решена за счет использования инструментов и комплексов автоматической обработки аэронавигационной информации.

Причем к автоматической обработке аэронавигационной информации выдвигается ряд требований, а именно:

- оцифровка аэронавигационных данных, что позволит пользователям управлять критически важной информацией для безопасности полетов и оптимизировать процессы;
- отображение на основе используемой цифровой информации с временным и географическим представлением фактической ситуации, например закрытые взлетно-посадочные полосы и рулежные дорожки, временные маршруты и т. д.;
- полная поддержка процесса верификации и валидации в соответствии с регламентом RTCA DO-2008 для удовлетворения требований к качеству данных по точности, разрешающей способности, целостности, отслеживаемости и т. д.;
- гарантии того, что авиационные данные будут отслеживаться по всей цепочке их поступления для выявления ошибок;
- автоматизированный процесс проверки целостности элемента данных, при котором определенный элемент сравнивается с информацией из другого источника, либо из другого процесса, либо из другой точки того же процесса [2].

С учетом вышеизложенного на сегодняшний день, по мнению авторов, одним из перспективных методов, который позволит решить ключевые задачи использования аэронавигационной информации, будет удовлетворять обозначенным требованиям и создаст надежную основу для автоматизированных систем обработки данных, является многоагентная технология, относящаяся к сфере распределенного искусственного интеллекта. Преимущества многоагентной системы – это относительная простота разработки отдельных агентов, большая способность к адаптации, интероперабельность, что позволяет расширять систему агентами, созданными независимыми разработчиками.

Таким образом, исследование перспектив использования многоагентных систем для автоматической обработки аэронавигационной информации является актуальной научно-практической задачей, решению которой и посвящена данная статья.

Методологическим обоснованием, разработкой и созданием мультиагентных систем управления и обработки данных занимаются такие известные ученые, как Dominik Ryžko, Martin L. Gill, Amrit Singh Bedi; Alec Koppel; Ketan Rajawat, В.П. Андреев, Г.А. Филяев, В.Я. Вилисов.

Практические аспекты внедрения интеллектуальных систем анализа информации в различных отраслях промышленности рассматривают в своих трудах Е.Ю. Бозюкова, С.А. Олейникова, Ю.Н. Булатов, Э.К. Шуманский, Thomas Wiedemann, R.-S. Chen; К.-Y. Lu; С.С. Chang.

Перспективы использования мультиагентных технологии для интеграции гетерогенных информационных систем и распределенных баз данных в системах навигации, в том числе и в авиации, детально представлены в трудах Y. Takada; T. Mohri; H. Iciki; M. Shiouchi.

Однако, несмотря на широкий интерес к рассматриваемой проблематике, необходимо отметить, что существующие на сегодняшний день наработки и достижения не систематизиро-

ваны и в большинстве своем фрагментарны. Это в свою очередь требует перехода от точечных и ситуативных решений в области интеллектуальной обработки данных к фундаментальным обобщениям механизма реализации агентно ориентированного подхода и синтезу интеллектуальных информационных систем управления любого уровня.

Итак, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей реализации автоматизированной обработки аэронавигационной информации на основе многоагентных технологий.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи представляется целесообразным использовать проблемно-структурную методологию синтеза гибридных систем. Выбор данной методологии обусловлен тем фактом, что она дает принципиальную возможность решать без упрощения сложные практические задачи, которые постоянно возникают в процессе обработки аэронавигационной информации. Также она позволяет создавать самоорганизующиеся модели, каждый элемент которых развивается, получая данные и знания от других элементов [3]. Кроме того, в рамках данного подхода можно разрабатывать модели систем, релевантные оригиналу, что подтверждается успешными примерами в различных предметных областях. Ценность данной методологии именно для аэронавигации и огромного потока данных, продуцируемых различными системами, которые обеспечивают ее функционирование, заключается в том, что она позволяет создавать большое количество методов, которые адаптируются к непрерывным изменениям в составе и структуре неоднородных задач, и экспериментировать с ними, направляет эволюцию способов накопления, обработки и представления информации согласно вектору, обозначенному разработчиком системы [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аэронавигационная информация – это информация, полученная в результате сбора, анализа и форматирования аэронавигационных данных, которые представлены в виде массивов цифровых данных или в стандартизированном формате в печатном виде или на электронных носителях. В свою очередь аэронавигационные данные включают в себя массивы данных о местности, препятствиях, картографических данных аэродрома, процедурах полетов по приборам, аэронавигационные карты и др. Кроме того, в их состав входит долгосрочный прогноз, касающийся любых значительных изменений законодательства, предписаний, правил или средств; информация пояснительного или консультативного характера, которая может повлиять на безопасность полетов; информация или сообщение о технических, законодательных или административных вопросах, влияющих на безопасность полетов.

Для обработки аэронавигационной информации используется широкий спектр методов, которые классифицируются по различным признакам: по способу обработки – ручная, автоматическая, комбинированная; по источникам используемых данных – горизонтальная, вертикальная, перекрестная; по количеству привлекаемых участников – индивидуальная и бригадная обработка. Например, недостатками горизонтальной обработки аэронавигационной информации является отсутствие учета информационных потоков, которые возникают в смежных подразделениях и между ними, что приводит к ошибкам и искажению характеристик общего информационного потока. Кроме того, в процессе горизонтальной обработки осуществляется излишнее глубокое изучение отдельных аспектов, на что тратится дополнительное время и труд. В свою очередь, в состав преимуществ вертикальной обработки можно отнести использование одинаковых методов расчета отдельных показателей; возможность выявления общей исходной информации, что облегчает изучение всей картины информационного потока.

Если речь идет об обработке информации исключительно с использованием современных информационных систем, персональных компьютеров и высокотехнологичных комплек-

сов, тогда можно выделить следующие наиболее популярные модели и методы: сетевая модель, матричная модель, графоаналитический метод, описание процедур на алгоритмическом языке, динамическая информационная модель. Очевидно, что подробный анализ достоинств и недостатков обозначенных методов и моделей, возможностей и ограничений их применения в процессе обработки аэронавигационной информации представляет собой значительный интерес, однако обозначенное перспективное направление научного поиска требует отдельного, более углубленного исследования, задачи которого выходят за рамки данной статьи.

Многоагентная система – это сгруппированные агенты информационной сети, которые взаимодействуют между собой и достигают поставленной разработчиком цели [5]. Для того чтобы в рамках автоматической обработки аэронавигационной информации обеспечить взаимосвязь всех трех уровней принятия решений: оперативного, стратегического, целеполагающего, – необходимо, чтобы многоагентная система формировала единую информационную картину – информационный образ, который можно представлять в виде конфигурации «пользователь информации – процесс – среда».

Для решения задач проактивного управления многоагентная система обработки аэронавигационной информации должна соединять такие новейшие технологические достижения, как интеллектуальный анализ данных, мобильные технологии, технологии моделирования, поддержки решений и реализации управленческих воздействий в масштабе реального времени, а также интегрировать инструменты, как поддержки, так и сугубо принятия решений [6].

Формальное определение многоагентной системы автоматической обработки аэронавигационной информации имеет следующий вид:

$$AgentNet (Agnt, Env, Rel, Org, Act, Com, Evol),$$

где *Agnt* – множество агентов;

Env – среда функционирования агентов;

Rel – совокупность допустимых взаимоотношений между агентами;

Org – описание правил формирования сети агентов;

Act – набор индивидуальных и совместных действий, стратегий поведения и поступков;

Com – набор индивидуальных и совместных действий или коммуникационных взаимодействий;

Evol – возможность эволюции системы.

Каждого агента $Agnt_i, i = \overline{1, n}$ можно описать с помощью четырех элементов:

$$Agnt_i = \langle State_i, X_i, Y_i, Process_i \rangle,$$

где $State_i$ – множество переменных, которые полностью определяют $Agnt_i$,

X_i, Y_i – входы и выходы $Agnt_i$ подмножества $State_i$, элементы которых связаны с *Env*;

$Process_i$ – автономный метод, который выполняет соответствующие изменения над $State_i$.

В качестве агентов системы могут выступать следующие элементы.

1. Агент уведомления для летчиков, реализуемый через модуль NOTAM, который соединяет автоматические функции международных и национальных отделов NOTAM, такие как создание, хранение, распространение и поиск NOTAM, в полном соответствии со стандартами ICAO. Он охватывает NOTAM, ASHTAM, ANM, AIM и CRAM и помогает гармонизировать форматы NOTAM.

2. Агент предполетных информационных бюллетеней. Данный агент может быть реализован через решение PIB Bulletin Portal, которое создает стандартные бюллетени и сводки на основе данных от FIRs (Flight Information Region), аэродромов, маршрутов, полигонов, ограничительных воздушных пространств, уровней, времени и всех параметров, известных из линии

NOTAM Q. Это позволяет получить минимизированные PIB (Pre Flight Information Bulletins) с четырехмерным содержанием, непосредственно связанные с полетом. Он исключает не относящиеся к делу NOTAM и может использовать преимущества службы обновления и функциональных возможностей планировщика.

3. Агент создания данных. Назначение этого агента – поддерживать непрерывную электронную цепочку данных ICAO для получения и публикации необходимой аэронавигационной информации. Он обеспечивает платформу для интеграции всей информации, функций, процессов и заинтересованных сторон цепочки аэронавигационных данных через организационные границы посредством веб-интерфейса с учетом функций ICAO по сбору, сопоставлению и предоставлению аккумулируемой информации.

4. Агент авиационных процессов – необходим для поддержки процедур получения, утверждения и публикации аэронавигационных данных. Функционирование данного агента будет гарантировать, что полученные необработанные данные оцениваются, утверждаются и сохраняются в заранее определенной последовательности, а все действия регистрируются на законных основаниях.

5. Агент формирования авиационной базы данных, его цель – сбор всей необходимой информации для PBN (Performance Based Navigation), данных о рельефе местности, данных о препятствиях, данных картографирования аэродромов (AMDB), управления NOTAM, а также аэронавигационных карт.

6. Агент создания аэронавигационных карт – разработка аэронавигационных карт и диаграмм охватывает весь жизненный цикл публикации карт от определения карты и автоматического создания до обнаружения изменений, обновления и создания выходных данных.

7. Агент экспорта (импорта) набора аэронавигационных данных – благодаря этому агенту обеспечивается непрерывная цепочка формирования, использования и передачи электронных аэронавигационных данных, которые имеют структурированную форму и позволяют следующему предполагаемому пользователю использовать и проверять полученные данные.

8. Агент публикаций и справочников. Этот агент обеспечивает интегрированный контроль процесса качества для публикации AIP, AIP Amendment, AIP Supplement, AIC и других руководств по управлению полетами и аэродромами. Агент необходим для того, чтобы вносимые изменения были максимально простыми, понятными и быстрыми для публикации.

Среда Env может быть подана через элементы:

$$env = \langle State_{env}, Process_{env} \rangle.$$

Важной особенностью такого представления среды является то, что она сама по себе активная, содержит свой собственный $Process_{env}$, который может изменять $State_{env}$ независимо от агентов, входящих в эту среду. Структурные элементы среды Env могут быть представлены корпоративными базами и хранилищами данных, базой знаний и базой моделей, различными транзакционными и аналитическими системами, почтовыми серверами, системами документооборота и тому подобное.

Для эффективного взаимодействия между уровнями многоагентной системы автоматизированной обработки аэронавигационной информации, представленной в виде конфигурации «пользователь информации – процесс – среда», представляется целесообразным использовать концепцию многоуровневых интеллектуальных систем. Многоуровневый подход реализует модель взаимодействия, в которой набор составляющих компонентов интеллектуальной системы взаимодействует и обменивается знаниями в некотором внутреннем представлении [7]. Структурная схема модели представлена на рис. 1.

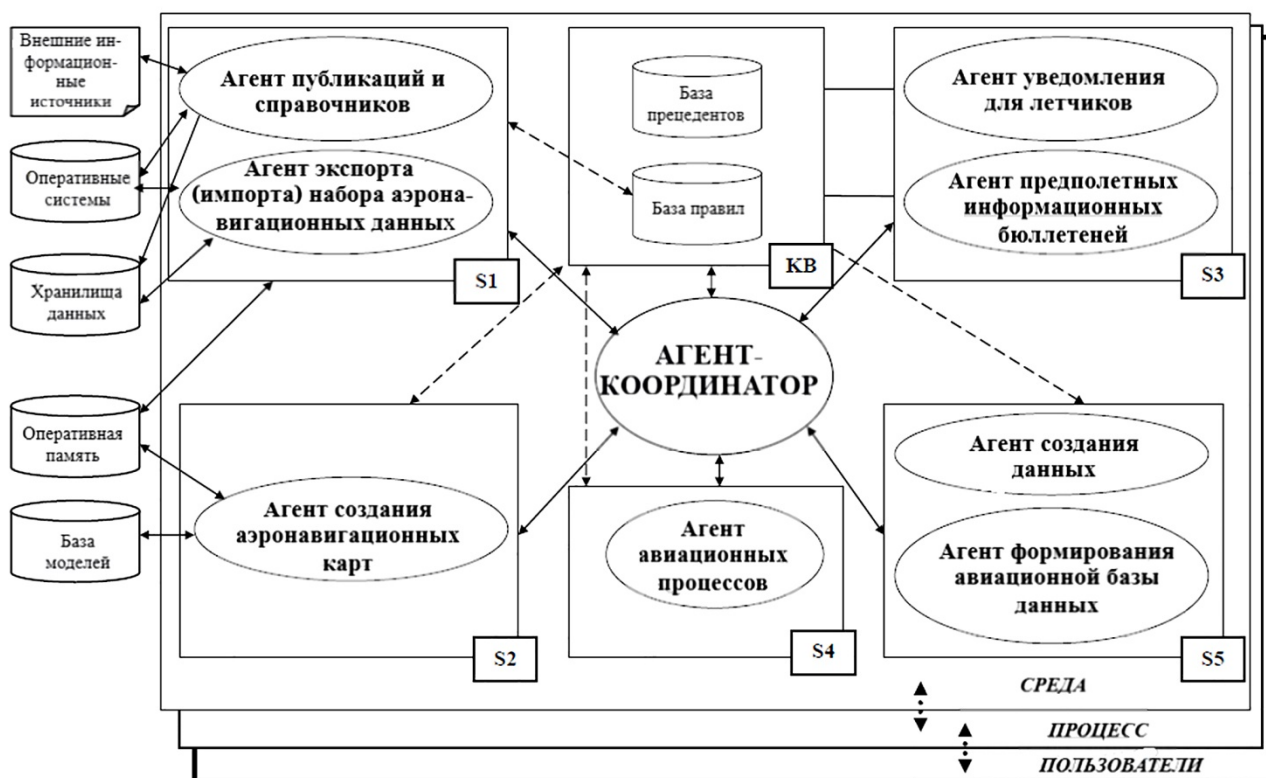


Рис. 1. Схема многоагентной системы автоматизированной обработки аэронавигационной информации
Fig. 1. The diagram of a multi-agent system of automated aeronautical information processing

ОБСУЖДЕНИЕ

Назначение различных групп агентов, составляющих схему многоагентной системы автоматизированной обработки аэронавигационной информации, представленной на рис. 1, позволяет объединить их в различные функциональные подсистемы. Например, подсистема S1 отвечает за формирование и анализ образа автоматической обработки аэронавигационной информации. В среде этой подсистемы взаимодействуют между собой агенты сбора данных, представляющих собой программы, которые осуществляют сбор и консолидацию информации для решения задач управления полетами.

Агент создания навигационных карт является агентом моделирования, который взаимодействует в среде подсистемы моделирования решений S2 и демонстрирует высокую результативность в своей интеллектуальной реализации. Этот агент учится на опыте и может предложить наиболее подходящую модель вычислений и анализа, в том числе и гибридную.

Агенты из блока S3 – это агенты поиска правил и прецедентов, которые выступают как составляющие подсистемы поиска решений в базе знаний. Они могут быть реактивными, создавать в процессе решения выдвинутых перед ними задач ансамбль агентов. В большинстве своем реактивные структуры характерны и для агентов влияния, функционирующих в среде подсистемы формирования и реализации управленческих воздействий S4, и для агентов презентаций из интерфейсной подсистемы S5.

Агенты изучения предпочтений пользователя должны быть когнитивными, только в такой реализации они могут выполнить поставленные перед ними задачи [8]. Накопление и обработка знаний таких агентов осуществляется на основе базы знаний KB, например с применением онтологий.

Рассмотрим более подробно процесс обработки заявки в агенте.

С появлением заявки R на входе агента в случае, когда она может быть обработана, в агенте начинается продвижение пакетов с данными. Пакет C в момент времени τ является четверкой, которая состоит из уникального идентификатора текущего запроса $u \in N$ алфавита данных, обрабатываемых M , текущих данных d для обработки, агента и пути P , который данный пакет прошел (упорядоченное подмножество элементов последнего):

$$C^\tau = \langle u, M^\tau, d^\tau, P^\tau \rangle, P^\tau \subseteq A. \quad (1)$$

При $\tau = 0$ имеем $M^\tau = X', d^\tau = x, P^\tau = \{\}$. После обработки пакета элементом $a_t (t \in [1, n])$ агента части M и d изменяются в соответствии с исходным алфавитом текущего элемента и результатами проведенного преобразования:

$$\begin{cases} M^{\tau+1} = Y^t, \\ d^{\tau+1} = f_{a_t}(d^\tau), \\ P^{\tau+1} = P^\tau \cup a_t. \end{cases} \quad (2)$$

Далее происходит передача пакета $C^{\tau+1}$ следующим элементам. На агента возлагается задача определения, кому из элементов необходимо передать заданный пакет. Последний может быть доставлен только тому элементу, который имеет соответствующий входной алфавит [9]. Следовательно, при принятии решения о пункте назначения пакета агент формирует выборку элементов из множества доступных (тех, которые могут обработать текущие данные), руководствуясь результатами анализа текущего состояния системы. Такая выборка из m элементов может быть описана следующим образом:

$$\{a_i | M^\tau \subseteq X^i\} \subseteq A, i = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Следует отметить, что ситуация с несколькими маршрутами возможна, когда агент имеет в своем составе элементы, чьи входные алфавиты пересекаются:

$$m > 1 \Rightarrow \exists j, k \in [1, n]: X^j \cap X^k \neq \{\}. \quad (4)$$

Изменения в работе системы могут быть осуществлены путем модификации решений по доставке пакета через граф G агента. Агент должен выбрать маршрут с наименьшей стоимостью для продвижения пакета. Тогда, когда такой маршрут неизвестен, выполняется широко-вещательная передача пакета элементам, которые могут обработать данные, передаваемые внутри. Из всех возможных маршрутов, образованных таким образом, выбирают те, которые дают минимальное время прохождения пакета. Такие маршруты запоминаются и используются для дальнейших обработок соответствующих заявок [10].

Исходя из своего текущего состояния и набора функций φ , агент может принять решение о «нежелательности» прохождения пакета по определенной дуге графа G или маршрута. В таком случае агент может замедлять прохождение данных по выбранной дуге и корректировать выбор маршрута.

Таким образом, агент получает возможность изменения способов обработки входящих заявок в зависимости от собственных целей, которые определяются функцией стоимости φ . Такая реконфигурация маршрута осуществляется в случае появления в структуре агента элемента, который может входить в альтернативный маршрут или способен изменять стоимость маршрутов обработки заявки [11].

В качестве обобщенного критерия оптимальности функции φ можно использовать непосредственно стоимость обработки информации в рамках многоагентной системы. Основным пред-

положением при использовании данного критерия оптимальности является аддитивность стоимости C_i отдельных частей многоагентной системы относительно общей стоимости C_Σ всей системы:

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (5)$$

где n – общее количество составных частей системы.

В свою очередь стоимость системы определяется следующими параметрами:

- экономичный эффект от автоматизации обработки аэронавигационной информации;
- капитальные затраты на средства вычислительной и организационной техники многоагентной системы;
- стоимость проектирования технологических процессов многоагентной системы;
- ресурсы на проектирование и эксплуатацию системы;
- срок проектирования технологии многоагентной системы;
- эксплуатационные расходы;
- параметры функциональных задач;
- параметры вычислительной и организационной техники;
- стоимость организации и эксплуатации БД или файлов данных;
- параметры структур хранения и стоимость хранения данных;
- время доступа к данным;
- время решения функциональных задач пользователей;
- эффективность методов контроля.

В качестве решающего правила построения системы с точки зрения уменьшения ее стоимости будем рассматривать следующее требование:

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^n C_i = \min. \quad (6)$$

Соотношение (6) показывает, что наиболее эффективной в стоимостном плане многоагентной системой является простая ($n \rightarrow 0$) и дешевая ($C_i \rightarrow 0$) система. Однако необходимо принимать во внимание тот факт, что каждая система выполняет определенные функциональные задачи. Будучи достаточно дешевой, такая многоагентная система может совсем не удовлетворять требуемому уровню своего функционального назначения – качеству и скорости обработки аэронавигационной информации. Поэтому соотношение стоимостной оптимальности следует дополнить условием выполнения функционального совершенства P системы. Поскольку между стоимостью системы и ее функциональным совершенством существует безусловная зависимость, для достижения ее экстремума можно записать следующее требование:

$$P_\Sigma = P[C_i] \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$C_\Sigma = \min. \quad (8)$$

В рациональном виде экстремум будет выглядеть таким образом:

$$P_\Sigma = P[C_i] \geq P_{\text{зад}}, \quad C_\Sigma = \min, \quad (9)$$

где P_Σ является обобщенным показателем функционального совершенства системы, например ее эффективности, функциональности, вероятности выполнения задания;

$P[C_i]$ – функционал, который показывает зависимость выполнения системой задания от вложенных в каждую ее составляющую средств;

$P_{\text{зад}}$ – заданный уровень функционального совершенства.

Соотношения (9) могут рассматриваться как рациональная стоимостная (функционально-стоимостная) математическая модель многоагентной системы обработки аэронавигационной информации. Для ее использования необходимо определиться с достаточным уровнем функционального совершенства $P_{зад}$ системы. Этот уровень является заданной величиной. Кроме того, важно выяснить зависимость стоимости каждой части (агента) системы от ее параметров и получить существующие численные оценки стоимости этих частей. Решению данных проблем будут посвящены следующие исследования авторов.

Логичным завершением проводимого исследования является рассмотрение возможного интерфейса, который может быть использован для обмена информацией между элементами многоагентной системы.

Для передачи между структурными элементами многоагентной системы представляется целесообразным использовать программный комплекс ELSA, который оснащен удобным графическим интерфейсом пользователя и защищен многоуровневым паролем. Кроме того, ELSA соответствует ICAO DOC 8126, ICAO Annex 15, ICAO DOC 4444, ICAO Annex. 10 т. II, Приложение ICAO 3.

На рис. 2 представлен пример интерфейса для обмена информацией между элементами многоагентной системы, такими как агент аэронавигационных карт, агент формирования авиационной базы данных, агент уведомления для летчиков об обстановке, агент информационных бюллетеней.

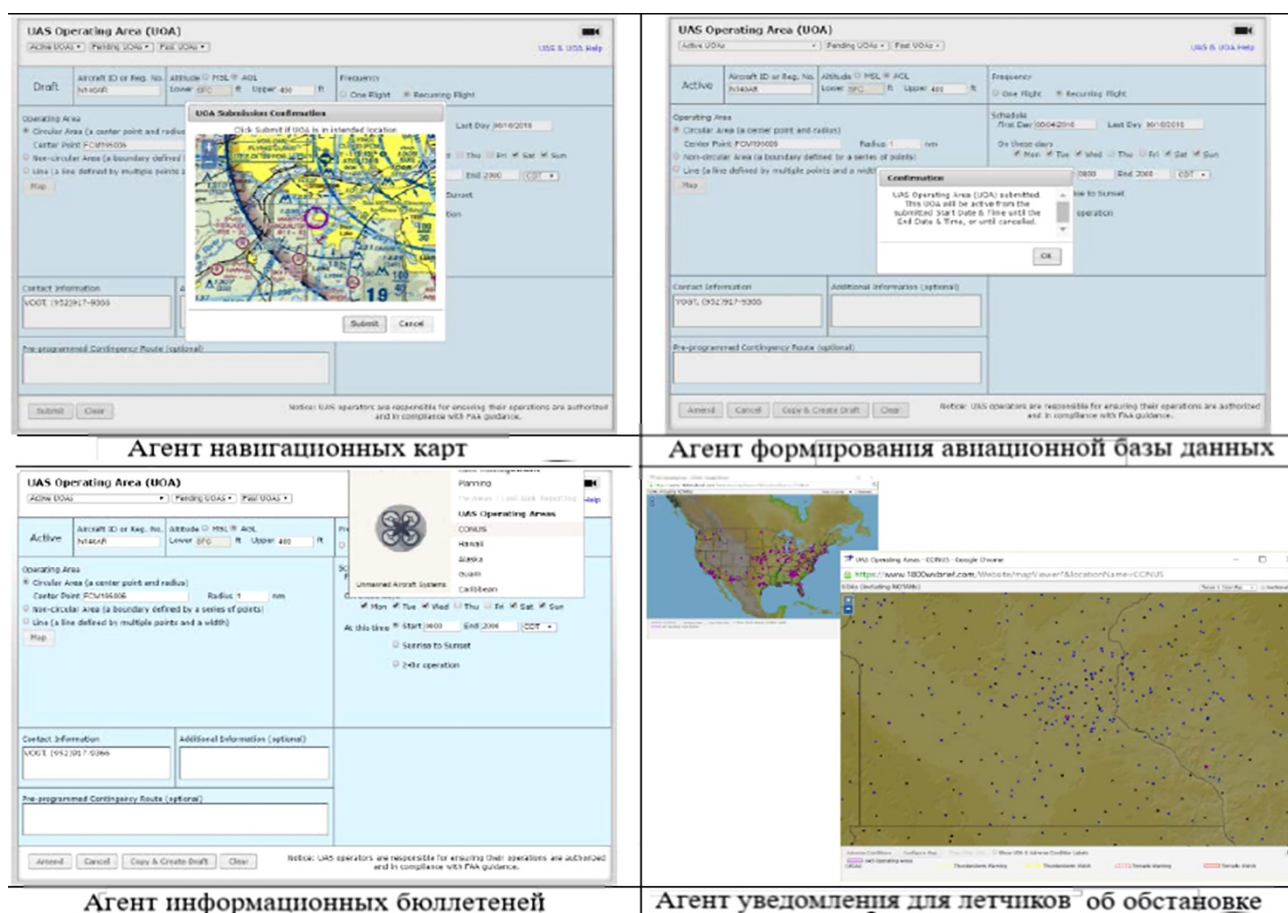


Рис. 2. Пример интерфейса для обмена аэронавигационной информацией
Fig. 2. The interface example for aeronautical information exchange

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в статье агентная многоуровневая модель позволяет реализовывать автоматическую обработку аэронавигационной информации в конфигурации «пользователь информации – процесс – среда» и основывается на интеграции современных информационных технологий накопления и анализа данных. Используемый при ее построении агентно ориентированный подход интеллектуальной обработки данных дает возможность обеспечить параллельное выполнение операций на уровнях пользователей аэронавигационной информацией, процесса ее накопления, сбора и анализа, среды обращения, а также дает возможность распределять разработку необходимых решений между специализированными агентами, управлять знаниями, организовывать переходы между процессами проактивного управления и обеспечивать интеграцию различных информационных систем, методов, режимов подготовки и анализа данных в пределах одной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Masloboev A.V.** A technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent systems of regional security network-centric control // *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020. No. 3 (31). P. 112–120. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-13
2. **Wang Q.** Improved multi-agent reinforcement learning for path planning-based crowd simulation / Q. Wang, H. Liu, K. Gao, L. Zhang // *IEEE access: practical innovations, open solutions*, 2019. Vol. 7. P. 73841–73855. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920913
3. **Nejati A., Soudjani S., Zamani M.** Compositional abstraction-based synthesis for continuous-time stochastic hybrid systems // *European Journal of Control*. 2021. Vol. 57. P. 82–94. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.04.001
4. **Pasaoglu C.** Hybrid systems modeling and automated air traffic control for three-dimensional separation assurance / C. Pasaoglu, B. Baspinar, N.K. Ure, G. Inalhan // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G. Journal of aerospace engineering*. 2016. Vol. 230, no. 9. P. 1788–1809. DOI: 10.1177/0954410015619443
5. **Liu D.** Deep reinforcement learning aided packet-routing for aeronautical ad-hoc networks formed by passenger planes / D. Liu, J. Cui, J. Zhang, Ch. Yang, L. Hanzo // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2021. Vol. 70, no. 5. P. 5166–5171. DOI: 10.1109/TVT.2021.3074015
6. **Самойлов В.А., Степанов Ф.М.** Перспективные методы построения вылетного потока в автоматизированных системах управления воздушным движением // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации*. 2020. № 4 (29). С. 108–120.
7. **Sun F., Lei C., Kurths J.** Consensus of heterogeneous discrete-time multi-agent systems with noise over Markov switching topologies // *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2021. Vol. 31, no. 5. P. 1530–1541. DOI: 10.1002/rnc.5360
8. **Chao Y., Ji Zh.** Necessary and sufficient conditions for multi-agent controllability of path and star topologies by exploring the information of second-order neighbours // *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. 2021. Vol. 38, no. 1. P. 1–14. DOI: 10.1093/imamci/dnw013
9. **Горященко А.С.** Применение мультиагентной системы для решения задачи формирования групп агентов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. № 4. С. 70–77. DOI: 10.14357/20718594190408
10. **Luo Q., Wang J., Liu Sh.** AeroMRP: a multipath reliable transport protocol for aeronautical ad hoc networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, no. 2. P. 3399–3410. DOI: 10.1109/IJOT.2018.2883736
11. **Durak U.** *Advances in aeronautical informatics: technologies towards Flight 4.0.* / U. Durak, J. Becker, S. Hartmann, N.S. Voros. 1st ed. Cham: Springer, 2018. 345 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75058-3

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Эшмурадов Дилшод Эльмурадович, академик Академии наук Турон, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии, стандартизации, сертификации Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, e_dilshod69@mail.ru.

Элмурадов Темурмалик Дилшодович, старший преподаватель кафедры информационных технологий Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, e_dilshod69@mail.ru.

Тураева Насиба Мирхамидовна, соискатель кафедры компьютерных систем Ташкентского университета информационных технологий имени Мухамада Аль-Хоразми, t.nasiba@gmail.com.

AUTOMATION OF AERONAUTICAL INFORMATION PROCESSING BASED ON MULTI-AGENT TECHNOLOGIES

Dilshod E. Eshmuradov¹, Temurmaliq D. Elmuradov¹, Nasiba M. Turayeva²

¹*Islam Karimov State Technical University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan*

²*Muhammad al-Khwarizmi University of Information Technologies, Tashkent, the Republic of Uzbekistan*

ABSTRACT

Progress in the development of computer engineering provides an opportunity to address a wider variety of challenges using computer software systems. The task of automatic aeronautical navigation information processing is referred to the number of such issues. This stipulates the necessity to adopt new approaches to design and develop similar systems. One of these approaches is based on the application of the collective activity idea of a set of agents – multi-agent technologies. In this regard, the purpose of the article is to consider the features of the automated aeronautical navigation information processing implementation on the basis of multi-agent technologies. To achieve this goal, the problem-structural methodology of hybrid systems synthesis, which allows us to create self-organizing models, was selected. Each element of which develops, obtaining data and knowledge from other elements. In the research process, a formal definition of the multi-agent system of automatic aeronautical information processing is presented, which involves a set of agents, environment of agent functioning, a set of permissible relations between agents, description of rules for forming a network of agents, a set of individual and joint actions, communication interactions, behavior and actions strategies, a possibility of system evolution. Furthermore, an emphasis is placed on the description of each agent. For this purpose, the authors propose to use four elements: a set of variables, inputs and outputs, an autonomous technique that performs appropriate changes over a set of variables. As agents, the paper comes up with the idea to use the following: Pilots Notification Agent, Preflight Information Bulletin Agent, Data Generation Agent, Aviation Processes Agent, Aviation Database Generation Agent, Aeronautical Maps Creation Agent, Aeronautical Data Set Export/Import Agent, Publications and References Agent. In addition, the article presents the multi-agent system diagram of automated aeronautical information processing and describes in detail processing an application in the agent using the mathematical expression. The results, obtained in the course of investigations, can be used to improve the effectiveness of the analytical component in the structure of the system to form the direct and reverse coordination relationship while solving aerial navigation problems.

Key words: automation, processing, multi-agent system, air navigation, process, environment.

REFERENCES

1. **Masloboev, A.V.** (2020). *A technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent systems of regional security network-centric control*. Reliability & Quality of Complex Systems, no. 3 (31), p. 112–120. DOI: 10.21685/2307-4205-2020-3-13
2. **Wang, Q., Liu, H., Gao, K. and Zhang, L.** (2019). *Improved multi-agent reinforcement learning for path planning-based crowd simulation*. IEEE access: practical innovations, open solutions, vol. 7, p. 73841–73855. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920913

3. Nejadi, A., Soudjani, S. and Zamani, M. (2021). *Compositional abstraction-based synthesis for continuous-time stochastic hybrid systems*. European Journal of Control, vol. 57, p. 82–94. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.04.001
4. Pasaoglu, C., Baspinar, B., Ure, N.K. and Inalhan, G. (2016). *Hybrid systems modeling and automated air traffic control for three-dimensional separation assurance*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G. Journal of aerospace engineering, vol. 230, no. 9, p. 1788–1809. DOI: 10.1177/0954410015619443
5. Liu, D., Cui, J., Zhang, J., Yang, Ch. and Hanzo, L. (2021). *Deep reinforcement learning aided packet-routing for aeronautical ad-hoc networks formed by passenger planes*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 5, p. 5166–5171. DOI: 10.1109/TVT.2021.3074015
6. Samoilov, V.A. and Stepanov, F.M. (2020). *Promising methods of departure flow construction in automated air traffic control systems*. Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii, no. 4 (29), p. 108–120. (in Russian)
7. Sun, F., Lei, C. and Kurths, J. (2021). *Consensus of heterogeneous discrete-time multi-agent systems with noise over Markov switching topologies*. International Journal of Robust and Non-linear Control, vol. 31, no. 5, p. 1530–1541. DOI: 10.1002/rnc.5360
8. Chao, Y. and Ji, Zh. (2021). Necessary and sufficient conditions for multi-agent controllability of path and star topologies by exploring the information of second-order neighbours. IMA Journal of Mathematical Control and Information, vol. 38, no. 1, p. 1–14. DOI: 10.1093/imamci/dnw013
9. Goryashchenko, A.S. (2019). *Using of multi-agent system for solving agents group formation problem*. Artificial Intelligence and Decision Making, no. 4, p. 70–77. DOI: 10.14357/20718594190408
10. Luo, Q., Wang, J. and Liu, Sh. (2019). *AeroMRP: a multipath reliable transport protocol for aeronautical ad hoc networks*. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, p. 3399–3410. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2883736
11. Durak, U., Becker, J., Hartmann, S. and Voros, N.S. (2018). *Advances in aeronautical informatics: technologies towards Flight 4.0*. 1st ed. Cham: Springer. 345 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75058-3

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dilshod E. Eshmuradov, Academician of the Academy of Sciences Turon, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Metrology, Standardization, Certification Chair, Islam Karimov State Technical University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan, e_dilshod69@mail.ru.

Temurmalik D. Elmuradov, Senior Lecturer of the Information Technologies Chair, Islam Karimov State Technical University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan, e_dilshod69@mail.ru.

Nasiba M. Turayeva, Doctoral Student of the Computer Systems Chair, Muhammad al-Khwarizmi University of Information Technologies, Tashkent, the Republic of Uzbekistan, t.nasiba@gmail.com.

Поступила в редакцию 20.08.2021
Принята в печать 25.01.2022

Received 20.08.2021
Accepted for publication 25.01.2022

УДК 519.688
DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-77-88

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ В БИНС: СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

А.А. САНЬКО¹, А.А. ШЕЙНИКОВ²

¹ Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Беларусь

² Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

Принцип организации бесплатформенных инерциальных навигационных систем базируется на численном интегрировании угловых скоростей и ускорений. Целью алгоритмов численного интегрирования является аппроксимация поведения динамической системы (беспилотного летательного аппарата – БЛА) с непрерывным временем с помощью цифрового вычислителя. Эффективность численного интегрирования определяется точностью и устойчивостью вычислительного процесса. Алгоритм интегрирования может иметь малую ошибку интегрирования, но при этом быть неэффективным из-за неустойчивости численного метода при изменении шага или условий интегрирования. Стандартным способом проверки алгоритмов интегрирования на устойчивость является их испытание в контрольных условиях эксплуатации (при выполнении БЛА типового полета по маршруту и канонического движения). В статье представлены результаты имитационного моделирования традиционных алгоритмов численного интегрирования в условиях прямолинейного и конического движения БЛА при вычислении значений угловых скоростей различными методами. Проведен анализ полученных результатов исследования, позволяющий выбрать алгоритм, имеющий преимущество по точности и вычислительной простоте в зависимости от условий полета. Для БЛА, у которого отсутствуют или минимальны незатухающие угловые гармонические колебания его корпуса при выполнении типового полета по маршруту, наилучшим по точности и объему вычислений является алгоритм второго порядка точности, реализующий метод средней скорости. Его средняя погрешность вычисления углов составляет от 3,6 до 43 %, что примерно равно значениям погрешностей при использовании рассмотренных алгоритмов (алгоритм, реализующий второе приближение к методу средней скорости, одношаговый алгоритм третьего порядка точности) при трехкратно меньшем объеме математических вычислений.

Ключевые слова: движущийся объект, параметры Родрига – Гамильтона, алгоритмы ориентации, моделирование, БЛА, полиномы, угловые скорости.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях широкого внедрения навигационных датчиков, выполненных по микроэлектромеханической технологии (МЭМС) и имеющих разброс параметров при изготовлении до 3 %, несмотря на их калибровку при изготовлении, а также высокую чувствительность к внешним возмущениям [1], все большую актуальность приобретает проблема повышения точности бесплатформенных инерциально-навигационных систем (БИНС). Исследования, проводимые отечественными и зарубежными специалистами, показывают, что до 80 % погрешностей БИНС обусловлены погрешностью аналитического построения расчетной системы координат, т. е. системы ориентации [2]. Операция интегрирования является основной в математическом обеспечении БИНС [3–6]. В настоящее время широкое распространение получили алгоритмы инерциальной ориентации БЛА, использующие интегральную первичную информацию о его вращательном движении: «классические» алгоритмы, реализующие метод средней скорости и второе приближение к методу средней скорости, одношаговый алгоритм третьего порядка точности, а также новые алгоритмы: метод последовательного приближения Пикара с использованием формул Кэли и кватернионного кинематического уравнения типа Риккати [7], метод функционального итеративного интегрирования, который в итеративной форме реализует метод последовательных приближений Пикара точного решения линейного дифференциального уравнения для вектора Родрига и кватерниона при использовании аппроксимаций полиномами Чебышева [8–10]. Совсем недавно при непосредственном решении уравнения для матрицы направляющих косинусов [11] был применен подход, основанный на разложении в ряд Тейлора и др. [12–14]. Классические алгоритмы ориентации отличаются простотой и достаточно высокой точностью. Они нашли

свое применение как в космических аппаратах «Союз Т/ТМ/ТМА», «Прогресс», орбитальной станции «МИР», так и в БЛА различных типов. Необходимо отметить, что особенностью рассматриваемых алгоритмов является зависимость точности оценки параметров ориентации от выбора метода вычисления значений угловых скоростей по последовательности выходных сигналов, поступающих от гироскопов [7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Провести сравнительный анализ «классических» алгоритмов ориентации (построенных с помощью метода последовательного приближения Пикара), использующих интегральную первичную информацию от гироскопов, при наличии незатухающих угловых гармонических колебаний БЛА с малыми амплитудами и частотами при выполнении им типового полета по маршруту и канонического движения. Отличительной особенностью проводимых исследований [3, 7, 14] является оценка точности (вычислительного дрейфа) алгоритмов с учетом погрешностей гироскопов и акселерометров при использовании различных методов интегрирования выходных сигналов, полученных от гироскопов (метод трапеций, кусочно-линейная аппроксимация и полиномиальная аппроксимация).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В качестве связанной системы координат блока чувствительных элементов БИНС выбрана правая ортогональная система координат $OXYZ$. Вычисления проводятся в нормальной системе координат $Ox_d Y_d Z_d$ (по ГОСТ 20058-80) с вершиной, совмещенной с центром масс объекта, ось Ox_d которой направлена на север по касательной к меридиану, ось Oz_d – по касательной к параллели на восток, а ось Oy_d – вдоль вертикали места вверх. Оси нормальной системы координат ориентированы по сторонам света. Начало координат (точка O) перемещается вместе с объектом. При расчете в качестве модели фигуры Земли использован эллипсоид вращения с осью симметрии, совпадающей с осью вращения Земли.

Исходные данные для реализации алгоритма инерциальной ориентации БЛА [15]: координаты текущего местоположения БЛА (ортодромическая широта – φ , ортодромическая долгота – λ); высота полета – H ; углы пространственной ориентации БЛА (тангаж – ϑ , крен – γ , курс – ψ).

1) $M = 1$. Алгоритм второго порядка точности, реализующий метод средней скорости для вычисления параметров Эйлера λ_j^* ($j = 1, \dots, 3$) по интегральной информации о вращательном движении объекта, имеет вид

$$\lambda_0^* = \cos \frac{\gamma}{2}; \quad \lambda_j^* = \gamma^{-1} \gamma_i \sin \frac{\gamma}{2}, \quad (i = 1, 2, 3); \quad \gamma_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t) dt; \quad \gamma = (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)^{0.5}. \quad (1)$$

Количество математических операций для выполнения данного алгоритма – 5.

2) $M = 2$. Алгоритм, реализующий второе приближение к методу средней скорости:

$$\lambda_0^* = 1 - \frac{1}{8} \gamma^2; \quad \lambda_j^* = \frac{1}{2} \gamma_i; \quad \gamma_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t) dt; \quad \gamma = (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)^{0.5}.$$

Количество математических операций для выполнения данного алгоритма – 11.

3) $M = 3$. Одношаговый алгоритм третьего порядка точности:

$$\Delta \lambda_0 = 1 - \frac{1}{8} \gamma^2; \quad \Delta \lambda_1 = \alpha \gamma_1 + \beta \gamma_{23}; \quad \Delta \lambda_2 = \alpha \gamma_2 + \beta \gamma_{31}; \quad \Delta \lambda_3 = \alpha \gamma_3 + \beta \gamma_{12};$$

$$\alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{48} \gamma^2; \quad \beta = \frac{1}{24}; \quad \gamma = (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2)^{0.5}; \quad \gamma_{23} = \gamma_3 \gamma_2' - \gamma_2 \gamma_3'; \quad \gamma_{31} = \gamma_1 \gamma_3' - \gamma_3 \gamma_1';$$

$$Y_{12} = Y_2 Y_1' - Y_1 Y_2'; Y_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t) dt; Y_i' = \int_{t_{n-2}}^{t_{n-1}} \omega_i(t) dt.$$

Количество математических операций для выполнения данного алгоритма – 15; t_{n-1} – предыдущий момент времени вычисления.

Формирование значений самолетных углов:

$$\vartheta_M = \arcsin(2\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3); \gamma_M = \arctg\left(\frac{2\lambda_0\lambda_1 - 2\lambda_2\lambda_3}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1}\right); \psi_M = \arctg\left(\frac{2\lambda_0\lambda_2 - 2\lambda_1\lambda_3}{2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1}\right),$$

где $\psi_M, \vartheta_M, \gamma_M$ – вычисленные значения углов ориентации.

Проекция вектора абсолютной угловой скорости географического трехгранника на его оси:

$$\omega_{xg}^n = (U_x + \lambda^{n-1})\cos\varphi^n; \omega_{yg}^n = (U_y + \lambda^{n-1})\sin\varphi^n; \omega_{zg}^n = -\dot{\varphi}^{n-1};$$

$$\lambda^{n-1} = \frac{V_{zg}^{n-1}}{R_1 \cos\varphi^{n-1}}; \dot{\varphi}^{n-1} = \frac{V_{xg}^{n-1}}{R_2^{n-1}},$$

где U_x, U_y – горизонтальная и вертикальная составляющая угловой скорости вращения Земли; R_1, R_2 – радиусы кривизны земного эллипсоида.

Значения погрешностей, характерных для точных БИНС [15, 16]: угловая скорость ухода гироскопа типа GG1342 – 0,01 °/ч = 0,000174 [рад/ч], случайный дрейф по углу – 0,001 °/ч; систематическая ошибка акселерометра типа QA 2000 – 0,01 [м/с²], его нестабильность смещения нуля в запуске – 0,004 [м/с²]; ошибка определения углов крена и тангажа – 0,3' = 8,72·10⁻⁵ [рад]; ошибка определения угла курса – 3' = 8,72·10⁻⁴ [рад]; ошибка в определении начальной скорости – 0,3 [м/с]. Как показали проведенные исследования [17], влияние случайного дрейфа гироскопа по углу на 1–2, а нестабильность смещения нуля в запуске акселерометра более чем на 2 порядка ниже точности современных БИНС. Таким образом, случайный дрейф гироскопа и нестабильность смещения нуля акселерометра при моделировании можно не учитывать.

1. Закон движения объекта (полет по маршруту): $a_{x0} = 2$ [м/с²]; $a_{y0} = 0,1$ [м/с²]; $a_{z0} = 0,1$ [м/с²]; $V_x = 20$ [м/с]; $V_y = 1$ [м/с]; $V_z = 1$ [м/с]; $\omega_{x0} = 0$ [рад/с]; $\omega_{y0} = 0$ [рад/с]; $\omega_{z0} = 0$ [рад/с], изменение углов ориентации задавалось в соответствии с табл. 1. Вычисления проводились с 64-разрядной сеткой. Шаг интегрирования от $t_n = 0,05$ до 0,005 с.

Таблица 1
Table 1

Законы изменения углов ориентации для различных условий моделирования
Orientation angles change laws for different simulation conditions

$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$\vartheta = 0$	$\vartheta = 0,0000872 \cdot rand(1)$	$\vartheta = 0,000087 \cdot rand(1) + 0,0087 \cdot \sin(\pi)t_n$
$\psi = 0$	$\psi = 0,000872 \cdot rand(1)$	$\psi = 0,000872 \cdot rand(1) + 0,0174 \cdot \sin(\pi)t_n$
$\gamma = 0$	$\gamma = 0,0000872 \cdot rand(1)$	$\gamma = 0,0000872 \cdot rand(1) + 0,0174$
$\omega_{x0} = 0; \omega_{y0} = 0; \omega_{z0} = 0$		
	$k = 3$	$k = 4$
	$\vartheta = \cos(2\pi f)t_n$	$\vartheta = 0,0000872 \cdot rand(1) + \cos(2\pi f)t_n$
	$\psi = \sin(2\pi f)t_n$	$\psi = 0,000872 \cdot rand(1) + \sin(2\pi f)t_n$
	$\gamma = 0$	$\gamma = 0,0000872 \cdot rand(1)$
$\omega_{x0} = 0; \omega_{y0} = \alpha \cdot \sin(2\pi f)t_n; \omega_{z0} = \alpha \cdot \cos(2\pi f)t_n$, где $\alpha = 0,1$ [рад], $f = 0,005$ [Гц]		

Условия моделирования:

– отсутствие незатухающих угловых гармонических колебаний объекта и инструментальных ошибок определения углов ориентации (модель № 0, $k = 0$);

– отсутствие незатухающих угловых гармонических колебаний объекта, но учитываются инструментальные ошибки определения углов ориентации (модель № 1, $k = 1$);

– наличие незатухающих угловых гармонических колебаний объекта [7] с частотами ($f_\psi, f_\psi = 1$ Гц, $f_\gamma = 0,5$ Гц) и с малыми амплитудами ($\psi_+ = 1$ град, $\psi_+ = 0,5$ град, $\gamma_+ = 1$ град) с учетом инструментальных ошибок определения углов ориентации (модель № 2, $k = 2$).

Наличие незатухающих низкочастотных угловых гармонических колебаний объекта с малыми амплитудами объясняется главным образом передачей гармонических колебаний лопастей несущего винта или тягового винта на корпус объекта. Например, непрерывные угловые колебания БЛА типа «Орлан-10» производства ООО «СТЦ» достигают 5^0 с частотами до 1 Гц¹.

2. Закон движения объекта задавался в виде канонического разложения (моделируется колебательным движением по двум переменным [12]): $a_{x0} = 2$ [м/с²]; $a_{y0} = 0$ [м/с²]; $a_{z0} = 0$ [м/с²]; $V_x = 20$ [м/с]; $V_y = 1$ [м/с]; $V_z = 1$ [м/с], углы ориентации и их ошибки задавались в соответствии с табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Значения углов ориентации и их ошибки для различных условий моделирования изменения Orientation angles values and their errors for different simulation conditions

M	Значения углов ориентации [град] при $t = 60$ с							
	$(t_n = 0,05$ с)				$(t_n = 0,005$ с)			
$k = 0$								
	γ	ϑ	ψ	$\Sigma, \%$	γ	ϑ	ψ	$\Sigma, \%$
1	-0,2473	0,0108	-0,0437	7	-0,2476	0,0110	-0,0435	3,6
2	-0,2473	0,0107	-0,0436	4,6	-0,2475	0,0109	-0,0435	2,3
3	-0,2472	0,01099	-0,0435	2,3	-0,2473	0,0109	-0,0434	0
$k = 1$								
1	-0,2455	0,0109	-0,0174	149	-0,2431	0,0135	-0,0245	43
2	-0,2470	0,0116	-0,0196	121	-0,2442	0,0142	-0,0312	39
3	-0,2434	0,0121	-0,0276	57	-0,2463	0,0116	-0,0301	44
$k = 2$								
1	0,7482	0,0985	0,1544	72	0,7530	0,0307	-0,0024	578
2	0,7537	0,0979	0,1604	73	0,7527	0,0263	0,0024	700
3	0,7544	0,0991	0,1516	71	0,7524	0,0291	0,0089	587
$k = 3$								
1	-28,933	61,124	4,194	95	-3,1897	57,889	2,1381	1,5
2	-29,360	60,358	4,258	98	-3,1940	57,222	2,1409	1
3	-29,366	60,359	4,259	98	-3,1947	57,222	2,1413	0
$k = 4$								
1	-84,152	62,879	13,069	510	-51,221	57,770	2,670	24
2	-85,265	61,888	13,353	523	-51,301	57,695	2,687	25
3	-85,271	61,888	13,366	524	-51,298	57,691	2,679	25

¹ Орлан-10 [Электронный ресурс] // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%80%D0%BB%D0%B0%D0%BD-10> (дата обращения: 22.05.2021).

Условия моделирования:

– инструментальные ошибки определения углов ориентации отсутствуют, но в наличии незатухающие угловые гармонические колебания объекта с угловыми скоростями (модель № 3, $k = 3$);

– инструментальные ошибки определения углов ориентации присутствуют, и в наличии незатухающие угловые гармонические колебания объекта с угловыми скоростями (модель № 4, $k = 4$).

В режиме начальной выставки. Значения углов ориентации объекта вычислялись как:
для моделей № 0–2

$$\begin{aligned}\psi^n &= (\psi + \Delta\psi^n) + \psi_a \sin(\omega_\psi + \varphi_1); \\ \vartheta^n &= (\vartheta + \Delta\vartheta^n) + \vartheta_a \sin(\omega_\vartheta + \varphi_2); \\ \gamma^n &= (\gamma + \Delta\gamma^n) + \gamma_a \sin(\omega_\gamma + \varphi_3); \end{aligned}$$

для моделей № 3–4

$$\begin{aligned}\psi^n &= (\psi + \Delta\psi^n) + \psi_a \sin(\omega_\psi + \varphi_1); \\ \vartheta^n &= (\vartheta + \Delta\vartheta^n) + \vartheta_a \cos(\omega_\vartheta + \varphi_2); \\ \gamma^n &= (\gamma + \Delta\gamma^n), \end{aligned}$$

где $\psi_a, \vartheta_a, \gamma_a$ – амплитуды гармонических колебаний объекта; $\omega_\psi, \omega_\vartheta, \omega_\gamma$ – угловые частоты; φ_i ($i = 1, \dots, 3$) – начальные фазы колебаний; $\Delta\psi, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$ – инструментальные ошибки в определении углов ориентации; ψ, ϑ, γ – начальные значения углов ориентации объекта.

В режиме навигации и ориентации. Составляющие угловой скорости вычислялись как:
Для моделей № 0–2:

$$\begin{aligned}\omega_{xg}^n &= \dot{\gamma}^n + \dot{\psi}^n \sin\vartheta^n + \omega_{др}^{xn}; \quad \omega_{yg}^n = \dot{\vartheta}^n \sin\gamma^n + \dot{\psi}^n \cos\vartheta^n \cos\gamma^n + \omega_{др}^{yn}; \\ \omega_{zg}^n &= \dot{\vartheta}^n \cos\gamma^n - \dot{\psi}^n \cos\vartheta^n \sin\gamma^n + \omega_{др}^{zn}, \end{aligned} \quad (4)$$

где формулы для вычисления $\dot{\psi}^n, \dot{\vartheta}^n, \dot{\gamma}^n$:

$$\dot{\psi}^n = \psi_a \omega_\psi \cos(\omega_\psi + \varphi_1) t_n; \quad \dot{\vartheta}^n = \vartheta_a \omega_\vartheta \cos(\omega_\vartheta + \varphi_2) t_n; \quad \dot{\gamma}^n = \gamma_a \omega_\gamma \cos(\omega_\gamma + \varphi_3) t_n.$$

Для моделей № 3–4:

$$\begin{aligned}\omega_{xg}^n &= \dot{\gamma}^n + \dot{\psi}^n \sin\vartheta^n + \omega_{др}^{xn}; \quad \omega_{yg}^n = \dot{\vartheta}^n \sin\gamma^n + \dot{\psi}^n \cos\vartheta^n \cos\gamma^n + \omega_{др}^{yn} + a \sin(2\pi f) t_n; \\ \omega_{zg}^n &= \dot{\vartheta}^n \cos\gamma^n - \dot{\psi}^n \cos\vartheta^n \sin\gamma^n + \omega_{др}^{zn} + a \cos(2\pi f) t_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Формулы для вычисления $\dot{\psi}^n, \dot{\vartheta}^n, \dot{\gamma}^n$:

$$\dot{\psi}^n = \psi_a \omega_\psi \cos(\omega_\psi + \varphi_1) t_n; \quad \dot{\vartheta}^n = -\vartheta_a \omega_\vartheta \sin(\omega_\vartheta + \varphi_2) t_n; \quad \dot{\gamma}^n = 0.$$

Интегралы $\gamma_i = \int_{n-1}^n \omega_{ig}(n) dt_n$ по полученным данным от гироскопов находились с помощью:

– метода трапеций:

$$\gamma_1 = 0,5 t_n (\omega_{xg}^n + \omega_{xg}^{n-1}); \quad \gamma_2 = 0,5 t_n (\omega_{yg}^n + \omega_{yg}^{n-1}); \quad \gamma_3 = 0,5 t_n (\omega_{zg}^n + \omega_{zg}^{n-1}), \quad (6)$$

– кусочно-линейной аппроксимации 3-го порядка:

$$\gamma_1 = 0,5 t_n (\omega_{xg}^n + \omega_{xg}^{n-1}) + \frac{1}{12} t_n^2 (\omega_{xg}^n \cdot \omega_{xg}^{n-1}), \quad (7)$$

– полиномиальной аппроксимации 3-го порядка:

$$\gamma_1 = 0,5t_n(\omega_{xg}^n + \omega_{xg}^{n-1}) + \frac{1}{3}t_n^2((\omega_{xg}^n)^2 + (\omega_{xg}^{n-1})^2) + \frac{1}{4}t_n^3((\omega_{xg}^n)^3 + (\omega_{xg}^{n-1})^3), \quad (8)$$

для γ_2 и γ_3 аналогично.

Для моделей № 0–4 формула для учета:
ошибки акселерометра:

$$a_{x0}^n = 2 + 2 \cdot 0,01 \cdot randn(1), \text{ для } a_{y0}^n \text{ и } a_{z0}^n \text{ аналогично}; \quad (9)$$

ошибки гироскопа:

$$\omega_{др}^{xn} = randn(1) \cdot 2,41 \cdot 10^{-9} \cdot t_n, \text{ (} t_n = 0,05 \text{ с)}, \text{ для } \omega_{др}^{yn} \text{ и } \omega_{др}^{zn} \text{ аналогично}; \quad (10)$$

ошибки вычисления скорости:

$$V_{xg}^n = 20 + 0,3 \cdot randn(1), \text{ для } V_{yg}^n \text{ и } V_{zg}^n, \text{ аналогично}. \quad (11)$$

Вычисления проводились в среде имитационного моделирования *Matlab* [18]. Принимается, что случайные погрешности навигационных датчиков независимы, распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и их предельное отклонение соответствует 3σ [19]. Для моделирования случайных составляющих ошибок измерителей использовалась функция *randn*. Функция формирует массив чисел, распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1.

Интервал движения объекта (интегрирования) – 60 с. Зависимости изменения параметров пространственной ориентации БЛА, угловой скорости дрейфа гироскопа и ошибок акселерометра (при использовании модели № 1) представлены на рис. 1. Значения параметров пространственной ориентации при использовании модели № 2 представлены на рис. 2. На рис. 3 представлены значения нормы кватерниона (1) при различных условиях моделирования ($t_n = 0,05$ с; $f = (6)$).

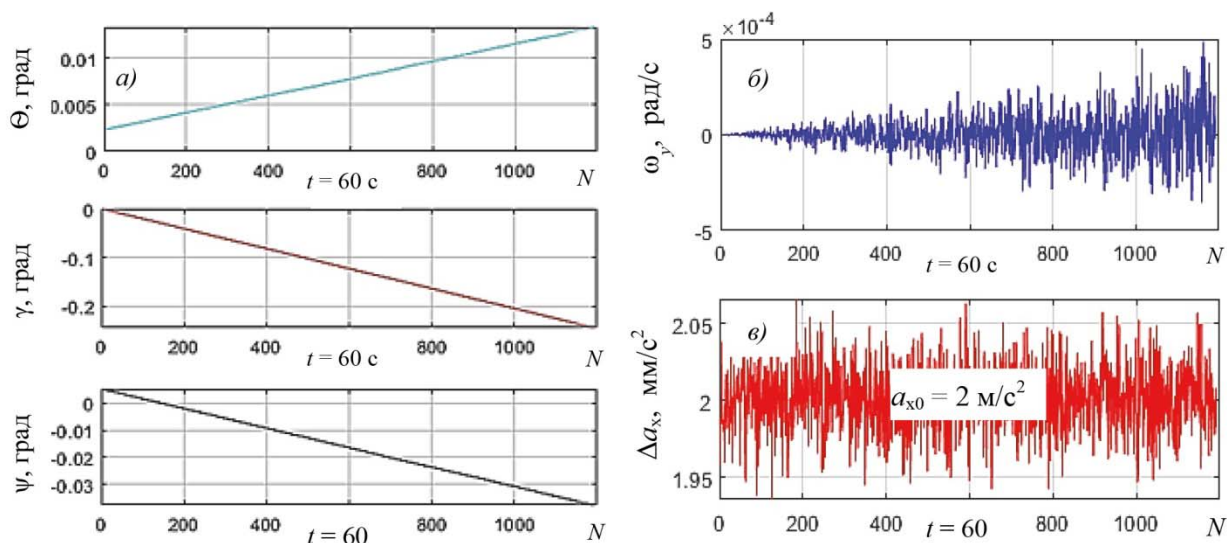


Рис. 1. Зависимости пространственной ориентации (а), угловой скорости ухода гироскопа (б) и ошибки акселерометра (в)

Fig. 1. Dependences of spatial orientation (а), gyroscope drift angular velocity (б) and accelerometer errors (в)

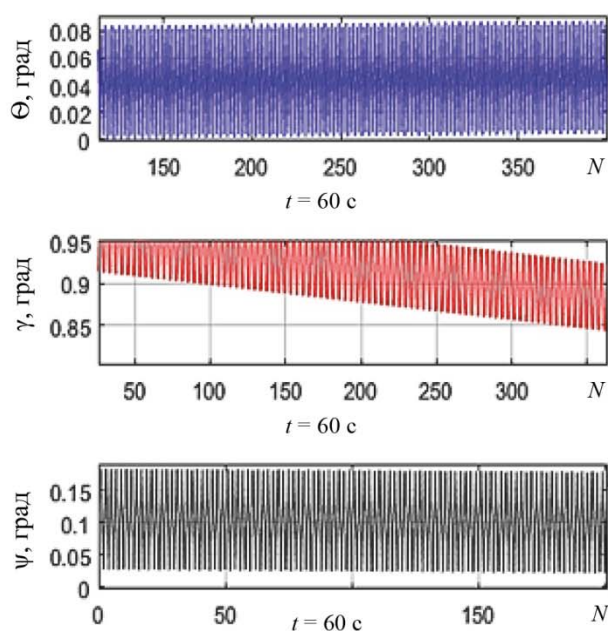


Рис. 2. Значения параметров пространственной ориентации БЛА при использовании модели № 2 ($t_n = 0,05$ с)

Fig. 2. UAV spatial orientation parameters values, while using model No. 2 ($t_n = 0.05$ c)

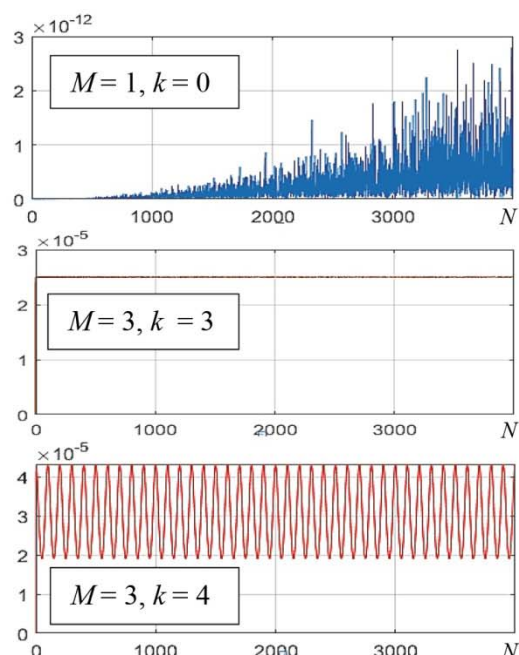


Рис. 3. Значения нормы кватерниона (1) при различных условиях моделирования ($t_n = 0,05$ с; $f = (6)$)

Fig. 3. Quaternion norm values (1), under various simulation conditions, ($t_n = 0.05$ c; $f = (6)$)

В качестве количественной характеристики погрешности в определении углов ориентации использовалась эмпирическая метрика:

$$\Sigma = (\Delta\gamma_M + \Delta v_M + \Delta\psi_M)/3, [\%], \quad (12)$$

где $\Delta\gamma = 100 - (\gamma / \gamma_{\text{э}}) \cdot 100$ %, $\gamma_{\text{э}}$ – вычисленное значение угла при $k = 0$ и $M = 3$, $t_n = 0,005$ с.

Выбор значений параметров k , M , t_n в качестве эталонных обусловлен следующими причинами: методическая накапливающая погрешность алгоритма пропорциональна $\sim t_n^2$ [7] и норма кватерниона тем меньше, чем выше порядок алгоритма.

Как показали проведенные исследования для рассмотренных методов интегрирования (табл. 2), средняя погрешность в определении углов ориентации без учета начальных ошибок их определения (модель № 0) составляет не более 4–5 %, причем с уменьшением шага интегрирования эта погрешность уменьшается до 2–3 %. При наличии ошибок определения углов ориентации (модель № 1) наибольшую вычислительную робастность имеет второй метод (алгоритм интегрирования, реализующий второе приближение к методу средней скорости), причем при уменьшении шага интегрирования с $t_n = 0,05$ до $t_n = 0,005$ с погрешность уменьшается с 149 до 43 %. Противоположная ситуация для значений погрешности в определении углов ориентации при наличии незатухающих угловых гармонических колебаний объекта в совокупности с учетом погрешностей измерителей, независимо от метода интегрирования. При $t_n = 0,05 \approx 73$ %, а при $t_n = 0,005$ – до ≈ 700 %, что характеризуется вычислительной неустойчивостью алгоритмов по углам γ и ψ (неустойчивость обусловлена неустойчивостью вычисления по параметрам Эйлера – λ_1, λ_3 [3]).

При каноническом движении объекта (модели № 3–4), погрешности в вычислении углов составляют 24–25 % (табл. 2), независимо от типа используемого алгоритма, причем по углу крена разница составляет примерно 51 град, что в 17 раз превышает его эталонное значение. Значения ошибок углов ориентации объекта при использовании различных методов вычисления значений угловых скоростей отличаются незначительно – на 5–10 % (табл. 3), в то же время

при использовании метода трапеций (5) количество математических операций примерно в 2 раза меньше по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией (7) и в 7 раз меньше, чем при использовании полиномиальной зависимости (8).

Причем при уменьшении шага интегрирования точность вычисления значений углов ориентации растет.

Таблица 3
Table 3

Значения углов ориентации и их ошибки для различных условий моделирования
Orientation angles values and their errors for different simulation conditions

$k = 0, M = 3, (t_n = 0,05 \text{ с})$				$k = 0, M = 3, (t_n = 0,005 \text{ с})$		
f	γ	ϑ	ψ	γ	ϑ	ψ
(6)	-0,2473	0,0108	-0,0437	-0,2476	0,0110	-0,043
(7)	-0,2469	0,0110	-0,0433	-0,2475	0,0109	-0,043
(8)	-0,2472	0,0109	-0,0434	-0,2474	0,0110	-0,043
$k = 3, M = 3, (t_n = 0,05 \text{ с})$				$k = 3, M = 3, (t_n = 0,005 \text{ с})$		
(6)	-28,933	61,124	4,194	-3,1897	57,288	2,138
(7)	-29,365	60,351	4,259	-3,1946	57,222	2,141
(8)	-30,410	60,465	5,528	2,2411	57,248	3,284
$k = 4, M = 3, (t_n = 0,05 \text{ с})$				$k = 4, M = 3, (t_n = 0,005 \text{ с})$		
(6)	-84,152	62,879	13,069	-51,221	57,770	2,670
(7)	-85,272	61,888	13,341	-51,302	57,693	2,707
(8)	-86,256	61,953	14,551	-51,381	57,721	2,761

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ «классических» алгоритмов ориентации (построенных с помощью метода последовательного приближения Пикара), использующих интегральную первичную информацию от гироскопов при наличии незатухающих угловых гармонических колебаний БЛА с малыми амплитудами и частотами при выполнении им типового полета по маршруту, и канонического движения с использованием вычислительной среды Matlab. Для БЛА, у которых отсутствуют или минимальны незатухающие угловые гармонические колебания его корпуса, при выполнении типового полета по маршруту наилучшим по точности и объему вычислений является алгоритм второго порядка точности, реализующий метод средней скорости. Его средняя погрешность вычисления углов составляет от 3,6 до 43 %, что примерно равно значениям погрешностей при использовании рассмотренных методов при втрое меньшем объеме математических вычислений. Наличие незатухающих низкочастотных гармонических колебаний объекта с угловыми скоростями с большими амплитудами приводит к потере вычислительной устойчивости рассмотренных алгоритмов, причем независимо от рассмотренных методов вычисления угловых скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капля В.И., Савицкий И.В., Мاستиков Д.А. Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений с различной ориентацией [Электронный ресурс] // Инженерный

вестник Дона. 2018. № 2. 7 с. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_161_Karlya_Savitskyi.pdf_a5a49df4f3.pdf (дата обращения: 18.10.2021).

2. Кивокурцев А.Л., Мишин С.В. Особенности алгоритмического обеспечения авиационной бесплатформенной инерциальной навигационной системы и возможность синтеза высокоточного безразгонного экономичного алгоритма блока ориентации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 120–126.

3. Ву Ю., Литманович Ю.А. Определение угловой ориентации в БИНС: Сравнение традиционных подходов и метода функционального итеративного интегрирования // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 4 (111). С. 16–36. DOI: 10.17285/0869-7035.0047

4. Litmanovich Y.A., Lesyuchevsky V.M., Gusinsky V.Z. Two new classes of strapdown navigation algorithms // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. January-February 2000. Vol. 23, no. 1. P. 34–44.

5. Лобусов Е.С., Фомичев А.В. Разработка и исследование алгоритмического обеспечения для основных режимов функционирования бесплатформенной инерциальной системы управления движением и навигации малогабаритного космического аппарата [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10 (22). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-1095 (дата обращения: 18.10.2021).

6. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006. 512 с.

7. Челноков Ю.Н., Переляев С.Е., Челнокова Л.А. Исследование алгоритмов определения инерциальной ориентации движущегося объекта // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16, № 1. С. 80–95. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-1-80-95

8. Wu Y. RodFIter: attitude reconstruction from inertial measurement by functional iteration // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2018. Vol. 54, iss. 5. P. 2131–2142. DOI: 10.1109/TAES.2018.2808078

9. Wu Y., Cai Q., Truong T.K. Fast RodFIter for attitude reconstruction from inertial measurement // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2019. Vol. 55, iss. 1. P. 419–428. DOI: 10.1109/TAES.2018.2866034

10. Wu Y., Yan G. Attitude reconstruction from inertial measurements: QuatFIter and its comparison with RodFIter // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2019. Vol. 55, iss. 6. P. 3629–3639. DOI: 10.1109/TAES.2019.2910360

11. Xu Z. Accurate direct strapdown direction cosine algorithm / Z. Xu, J. Xie, Z. Zhou, J. Zhao, Z. Xu // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2019. Vol. 55, iss. 4. P. 2045–2053. DOI: 10.1109/TAES.2018.2881353

12. Челноков Ю.Н., Переляев С.Е., Челнокова Л.А. Дифференциальные кинематические уравнения вращательного движения твердого тела в четырехмерных кососимметрических операторах и новые алгоритмы ориентации БИНС // Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Саратов, 25–27 сентября 2013 г. ИПТМУ РАН. Саратов: «Наука», 2013. С. 315–320.

13. Челноков Ю.Н., Переляев С.Е. Новые уравнения и алгоритмы ориентации и навигации БИНС в четырехмерных кососимметрических операторах // Интегрированные навигационные системы: сборник материалов XXI Санкт-Петербургской международной конференции. Санкт-Петербург, 26–28 мая 2014 г. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. С. 308–312.

14. Переляев С.Е., Челноков Ю.Н. Новые алгоритмы определения инерциальной ориентации объекта // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78, № 6. С. 778–789.

15. Маркелова В.В. Моделирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы в составе стенда навигационного комплекса летательного аппарата / В.В. Маркелова, А.В. Шукалов, М.О. Костишин, И.О. Жаринов, О.О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17, № 5. С. 903–909. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-903-909

16. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.

17. Михеев А.В. Разработка и применение модели шумов датчиков первичной информации при математическом моделировании работы бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 2, № 1 (38). С. 150–160.

18. Дьяконов В.П. MATLAB 7./R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.

19. Головач С.В. Методы испытаний и калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем: дисс. ... канд. техн. наук. Киев: Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени И. Сикорского", 2017. 170 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Санько Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», min.777.144@mail.ru.

Шейников Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», hobat097@yandex.ru.

ANGULAR ORIENTATION DETERMINATION IN SINS: TRADITIONAL ALGORITHMS COMPARISON

Andrey A. Sanko¹, Aleksey A. Sheinikov²

¹*Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus*

²*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

ABSTRACT

The principle of organization of strap-down inertial navigation systems is based on numerical integration of angular velocities and accelerations. The purpose of numerical integration algorithms is to approximate the behavior of a dynamic system (unmanned aerial vehicle – UAV) with continuous time using a digital computer. The efficiency of numerical integration is determined by the accuracy and stability of the computational process. The integration algorithm may have a small integration error, but at the same time be inefficient due to the instability of the numerical method when the step or conditions of integration change. The standard way to test integration algorithms for stability is to test them under control operating conditions (when performing a typical UAV flight along the route and canonical movement). The article presents the results of simulation modeling of traditional numerical integration algorithms in the conditions of rectilinear and conical UAV motion, when calculating the values of angular velocities by various methods. The analysis of the obtained research results is carried out, which allows us to choose an algorithm that has an advantage with respect to accuracy and computational simplicity, depending on the flight conditions. For a UAV that has no or minimal undamped angular harmonic oscillations of its body, when performing a typical flight along the route, the best, in terms of accuracy and volume of calculations, is a second-order accuracy algorithm implementing the average speed method. Its average error in calculating angles ranges from 3.6 to 43%, which is approximately equal to the errors values when using the considered algorithms (an algorithm implementing a second approximation to the average speed method, a one-step algorithm of the third-order of accuracy), with a three-fold smaller amount of mathematical calculations.

Key words: moving object, Rodrigues-Hamilton parameters, orientation algorithms, modeling, UAV, polynomials, angular velocities.

REFERENCES

1. **Kaplya, V.I., Savitsky, I.V. and Mastikov, D.A.** (2018). *Calibrating the triaxial accelerometer according to a number of measurements with different orientation*. Engineering journal of Don, no. 2, 7 p. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_161_Kaplya_Savitskyi.pdf_a5a49df4f3.pdf (accessed: 18.10.2021). (in Russian)
2. **Kivokurtsev, A.L. and Mishin, S.V.** (2013). *Algorithmic features of aviation strapdown inertial navigation system and the possibility of synthesis of a highly-precise efficient orientation unit algorithm without accelerating*. Modern technologies. System analysis. Modeling, no. 3 (39), p. 120–126. (in Russian)
3. **Wu, Yu. and Litmanovich, Yu.A.** (2020). *Strapdown attitude computation: functional iterative integration versus taylor series expansion*. Gyroscopy and Navigation, vol. 11, no. 4, p. 263–276. DOI: 10.1134/S2075108720040124
4. **Litmanovich, Yu.A., Lesyuchevsky, V.M. and Gusinsky, V.Z.** (2000). *Two new classes of strapdown navigation algorithms*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, January-February, vol. 23, no. 1, p. 34–44.
5. **Lobusov, E.S. and Fomichev, A.V.** (2013). *Research and development of algorithmic support for the main modes of operation of the strapdown inertial motion control and navigation of small-sized spacecraft*. Engineering journal: science and innovations, no. 10 (22). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-10-1095 (accessed: 18.10.2021). (in Russian)
6. **Chelnokov, Yu.N.** (2006). *Kvaternionnyye i bikvaternionnyye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya* [Quaternion and biquaternion models and methods of rigid body mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion]. Moscow: Fizmatlit, 512 p. (in Russian)
7. **Chelnokov, Yu.N., Perelyaev, S.E. and Chelnokova, L.A.** (2016). *An investigation of algorithms for estimating the inertial orientation of a moving object*. Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics, vol. 16, no. 1, p. 80–95. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-1-80-95 (in Russian)
8. **Wu, Yu.** (2018). *RodFIter: attitude reconstruction from inertial measurement by functional iteration*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 54, issue 5, p. 2131–2142. DOI: 10.1109/TAES.2018.2808078
9. **Wu, Yu., Cai, Q. and Truong, T.K.** (2019). *Fast RodFIter for attitude reconstruction from inertial measurement*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, issue 1, p. 419–428. DOI: 10.1109/TAES.2018.2866034
10. **Wu, Y. and Yan, G.** (2019). *Attitude reconstruction from inertial measurements: QuatFIter and its comparison with RodFIter*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, issue 6, p. 3629–3639. DOI: 10.1109/TAES.2019.2910360
11. **Xu, Z., Xie, J., Zhou, Z., Zhao, J. and Xu, Z.** (2019). *Accurate direct strapdown direction cosine algorithm*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, issue 4, p. 2045–2053. DOI: 10.1109/TAES.2018.2881353
12. **Chelnokov, Yu.N., Perelyaev, S.E. and Chelnokova, L.A.** (2013). *Differentsialnyye kinematicheskiye uravneniya vrashchatelnogo dvizheniya tverdogo tela v chetyrekhmernykh kososimmetricheskikh operatorakh i novyye algoritmy oriyentatsii BINS* [Differential kinematic equations of a rigid body rotational motion in four-dimensional skew-symmetric operators and new algorithms of orientation of BINS]. Problemy kriticheskikh situatsiy v tochnoy mekhanike i upravlenii: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem [Problems of critical situations in precision mechanics and control: materials of the All-Russian Scientific Conference]. Saratov: "Nauka", p. 315–320. (in Russian)

13. Chelnokov, Yu.N. and Perelyaev, S.E. (2014). *New equations and algorithms of sins orientation and navigation in four-dimensional skew-symmetric operators*. Proceedings 21st Saint-Petersburg International conference on integrated navigation systems. ICINS 2014, p. 365–369.

14. Perelyaev, S.E. and Chelnokov, Y.N. (2014). *New algorithms for determining the inertial orientation of an object*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol. 78, no. 6, p. 560–567. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2015.04.003

15. Markelova, V.V., Shukalov, A.V., Kostishin, M.O., Zharinov, I.O. and Zharinov, O.O. (2017). *Modeling of non-platform inertial navigation system as a component of aircraft navigation computer stand*. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, vol. 17, no. 5, p. 903–909. DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-903-909

16. Matveev, V.V. and Raspopov, V.Ya. (2009). *Osnovy postroyeniya besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem* [Fundamentals of free-form inertial navigation systems construction]. St.Petersburg: OAO "Kontsern "TsNII "Elektropribor", 280 p. (in Russian)

17. Mikheyev, A.V. (2009). *Sensors noise model development and application for mathematical simulation of the strapdown inertial navigation system functioning*. Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, vol. 2, no. 1 (38), p. 150–160. (in Russian)

18. Diakonov, V.P. (2008). *MATLAB 7./R2006/R2007: samouchitel* [MATLAB 7./R2006/R2007: Tutorial]. Moscow: DMK Press, 768 p. (in Russian)

19. Golovach, S.V. (2017). *Metody ispytaniy i kalibrovki besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Testing and calibration methods of strapless inertial navigation systems: Dissertation of Cand. Tech. Sc.]. Kiev: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 170 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Sanko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Belarusian State Academy of Aviation, min.777.144@mail.ru.

Aliaksey A. Sheinikau, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department, Belarusian Military Academy, af.varb.ao@yandex.ru.

Поступила в редакцию 06.10.2021
Принята в печать 25.01.2022

Received 06.10.2021
Accepted for publication 25.01.2022

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: 623.746.519

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-89-99

DESIGN OF THE THERMOMECHANICAL CLAMP JOINT OF MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

YA.A. KUPRIYANOVA^{1,2}

¹*Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Dolgoprudny, Russia*

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

Currently, materials with shape memory effect (SME) are widely utilized in the field of joining thin-walled shells. The application of SME materials in the joining of unmanned aerial vehicle (UAV) compartments makes it possible to increase the accuracy, high assembly manufacturability to perform multiple joint assembly-disassembly work and ensures the forces transfer from UAV different surfaces in compliance with the specified strength conditions. The paper considers a design technique for a detachable clamp (tape) joint, made up of SME material, of UAV small-diameter compartments. The clamp is an open shell made up of SME material. Before installation, the clamp is cooled, and the required shape is given to it. When heated, its diameter reduces to the specified to ensure tightness and absence of clearances in the design. The critical parameters were specified. They are required to solve the problem of parametric optimization of the clamp joint, whereby the joint will meet the strength requirements and have the minimum mass. Based on the calculation of a clamped joint, the calculation algorithm, that allows the calculation of tape connections for various diameters UAV compartments, was obtained. A computer model of joining in CAD Solid Works with the parameters that comply with the structural strength requirements was created. Based on geometry of the model and the properties of the stated materials, the calculation of structural mass under various values of the inclination angle of the clamp surface was carried out. The method of designing a clamp joint, made up of titanium nickel, is represented. The dependences of compartments joints strength on the clamp parameters and a set of parameters, allowing us to design the working structure of the clamp joint with the lowest mass, are found.

Key words: unmanned aerial vehicle, clamp joint, shape memory effect.

INTRODUCTION

When designing small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) with a mid-ship diameter less than 800 mm, in addition to the classic tasks of reducing weight and increasing the strength of the design, problems of ensuring the article high technological effectiveness arise.

Currently, the two types of joints: point and contour, are primarily used in UAV designs for connecting compartments to each other. The use of point (flange) joints leads to the necessity of making numerous threaded holes and flanges, which increases the structural mass [1]. Therefore, the contour joint is prevalent for connecting small diameter UAV compartments. These joints are comprised of telescopic and clamp (tape) connections. A telescopic one has a number of drawbacks – big length, the requirement of high accuracy for frames surfaces, the complex structural assembly [2]. As a result, it is more efficient to use clamp (tape) joints to connect UAV compartments of small diameter. The disadvantages of this joint involve available tightening bolts that are necessary to ensure the sufficient tension of the clamp, which affects the UAV performance. A possible solution to this problem may be

SME materials utilization in the construction. The effect of shape memory is the property of the extensive class of materials, which possess the reversibility of inelastic deformation [3–11]. SME alloys have been widely utilized in aerospace engineering, which is represented in works [12–15], e.g. as special couplings that provide the required tension. The use of SME detachable clamps for missile bodies will not only allow us to ensure all the forces transfer from one part of the UAV to another in conformity with the conditions of strength and rigidity, but also to fulfill the key technological requirements i.e., to automate a process of assembly, improve its accuracy, create the possibility of high-quality compartments joining without special tools and cooperative processing of compartments mating surfaces.

This article solves the designing problem of a clamp joint for small-diameter UAV compartments using SME materials, which have high manufacturability and meet the strength conditions.

SOLUTION ALGORITHM

The design of the studied clamp (tape) demountable joint is shown in Figure 1. A clamp tape is an open envelope made up of SME material. When heated, its diameter decreases to the specified to provide tightness and absence of clearances in the structure. The application of SME clamp ensures absence of after-assembly residual stress and makes it possible to fulfill a hidden threaded coupling that is flush with the article caliber, which has a positive effect on the UAV performance. Compartments are connected by means of a projection on one of the frames [16] in order to limit radial displacements. Thus, the clamp is utilized to prevent axial movements and shells turnover along the axis of rotation.

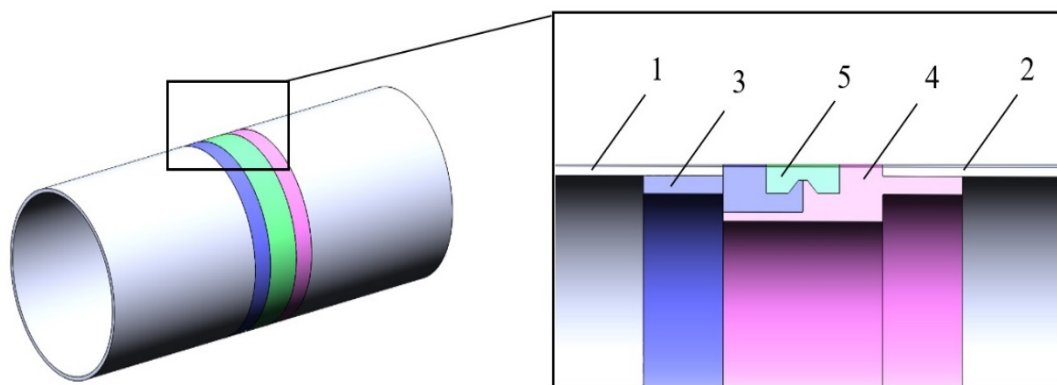


Fig. 1. The clamp (tape) demountable joint of the UAV compartments:
1, 2 – UAV compartments body; 3, 4 – joint frames; 5 – the clamp

AMg6 aluminum (which has breaking strength $\sigma_b = 300$ MPa) and titanium nickel TN-1 ($\sigma_b = 800$ MPa) were selected as the model materials for the UAV body and clamp, respectively.

At the first stage of designing, it is necessary to establish an initial set of clamp geometric parameters stemming from the limitations imposed on the UAV body (fig. 2). After identifying the parameters for the purpose of reducing the joint unit mass and increasing its strength performance, it is essential to accomplish a task of parametric structure optimization [17]. At the same time, establishing the optimal parameters for the clamp joint, under which the joint will satisfy the strength, resistance to aerodynamic heating requirements and have the minimal mass, is required.

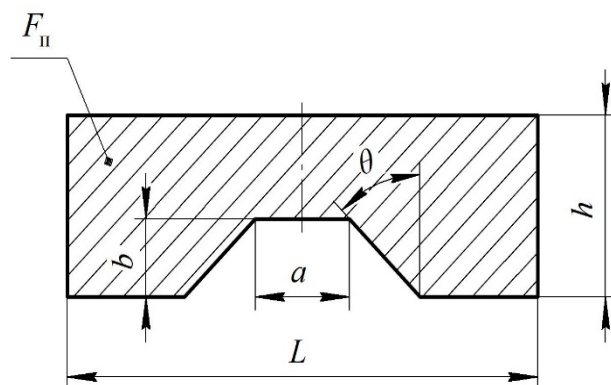


Fig. 2. Geometric parameters of the clamp cross-section

The major parameters for this problem solution are as follows:

- the average radius of clamp R ;
- the angle of clamp surface inclination θ ;
- the area of clamp cross-section $F_{II} = hL - ab - b^2tg\theta$ (fig. 2);
- the area of joint section $F = 2\pi\bar{R}\delta$.

While contour connecting, loading from one UAV compartment to another is imposed along the entire perimeter, which makes the skin operate in full (fig. 3).

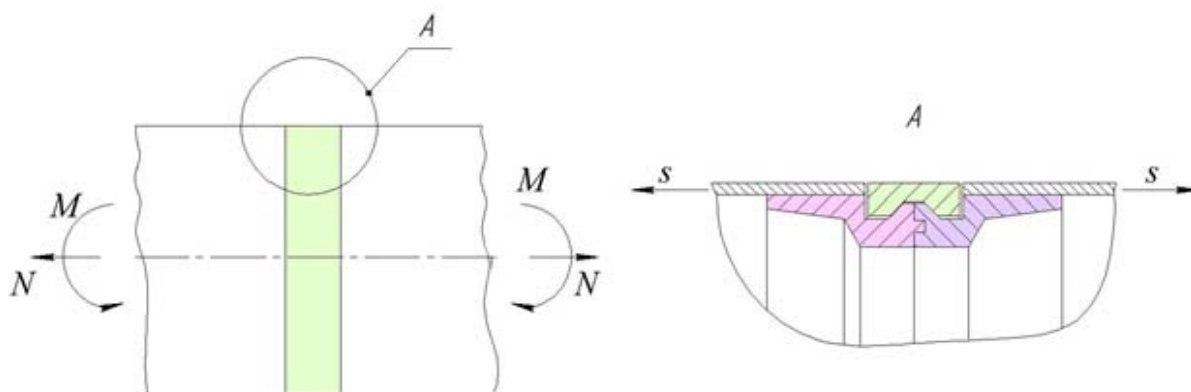


Fig. 3. Loading scheme of the clamp joint

Linear load on the joint is calculated on the basis of the plane sections hypothesis:

$$s = \left(\frac{M}{J} R \cos\varphi + \frac{N}{F} \right) \delta = \frac{M}{\pi \bar{R}^2} \cos\varphi + \frac{N}{2\pi \bar{R}}, \quad (1)$$

where M is the bending moment; N is the longitudinal force; J is the inertia moment; φ is the circumferential coordinate; δ is the wall thickness; \bar{R} is the average radius.

In the loading case, the clamp is the element responding merely to tensile loads. Load s exerts pressure q from the frame side on the contact surface with the clamp and friction forces μq within the contact plane (fig. 4, δ).

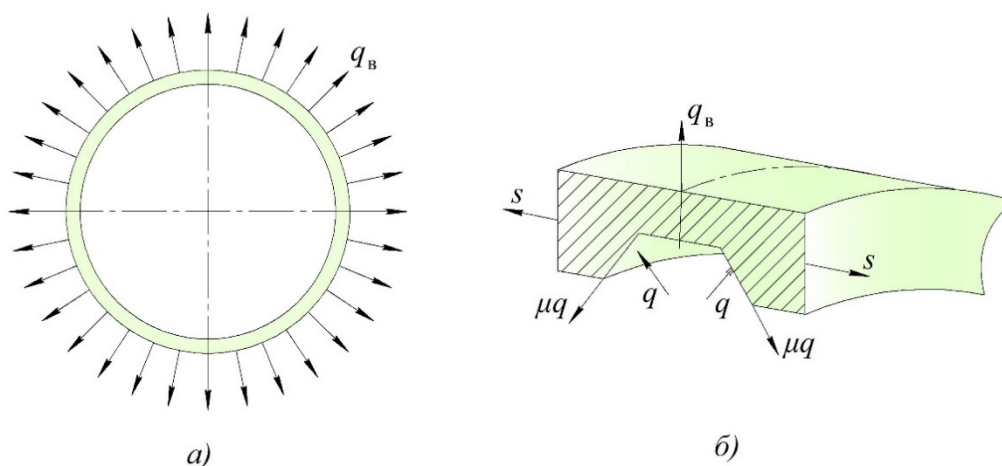


Fig. 4. Loading scheme of the clamp

The projection of these forces on the horizontal line should be equal to s :

$$q \cos \theta + \mu q \sin \theta = s \tag{2}$$

From which

$$q = \frac{s}{\cos \theta + \mu \sin \theta} \tag{3}$$

If the value of q is known, you can find the resulting vertical component q_B

$$q_B = 2q(\sin \theta - \mu \cos \theta) \tag{4}$$

Since the friction coefficient depends on many factors and can be very small, it can be accepted as $\mu = 0$, and the load can be determined by the following formulas:

$$q = \frac{s}{\cos \theta}, \quad q_B = 2s \operatorname{tg} \theta \tag{5}$$

Distributed forces q_B (fig. 4, a), acting around the clamp circumference, cause the clamp elongation. The value of the tensile forces N_φ can be found on the basis of the equilibrium condition, mentally cutting the clamp by a horizontal diametrical section (fig. 5). The acting force on the clamp element will be equal to $q_B R d\varphi$, where $d\varphi$ is the central angle corresponding to the element.

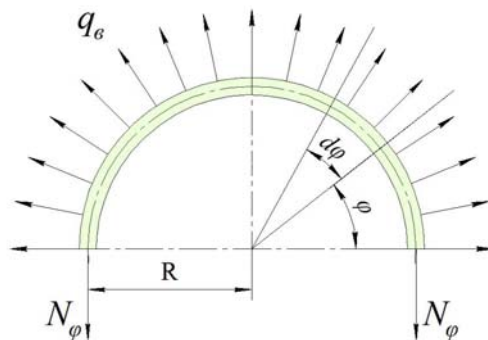


Fig. 5. Tensile forces in the clamp section

Having taken the sum of the forces vertical components acting on half a clamp, we obtain the following equilibrium equation:

$$2N_{\varphi} = 2 \int_0^{\pi/2} q_B R \sin \varphi d\varphi \tag{6}$$

From which

$$N_{\varphi} = q_B R \tag{7}$$

Tensile stress in the clamp, which determines the condition of strength, can be obtained by means of dividing the force of N_{φ} by the cross-sectional area of the clamp F_{Π} :

$$\sigma_{max} = \frac{N_{\varphi}}{F_{\Pi}} \leq [\sigma] \tag{8}$$

Further, a stress analysis is executed. The factor of safety: $n = \sigma_B / \sigma$ is equal to 1.5.

If the condition (8) is not met, the checking calculation is repeated under a new set of parameters.

Figure 6 shows the algorithm of designing computation for the clamp demountable joint, which can be utilized to compute joints of UAV compartments with different diameters.

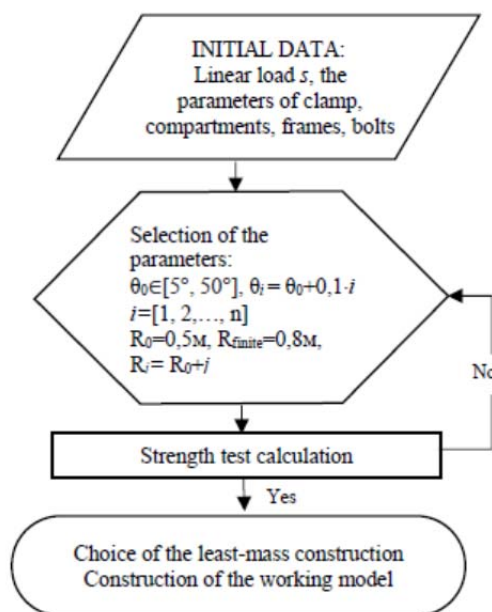


Fig. 6. The algorithm for computation of the clamp detachable joint parameters

CALCULATION RESULTS

On the basis of the developed algorithm, some calculations were carried out, the results of which are graphically displayed in Figures 7–10. The calculation was conducted for the following parameter values: $L = 50$ mm, $a = 20$ mm, $b = 13$ mm selected from the condition of the highest manufacturability.

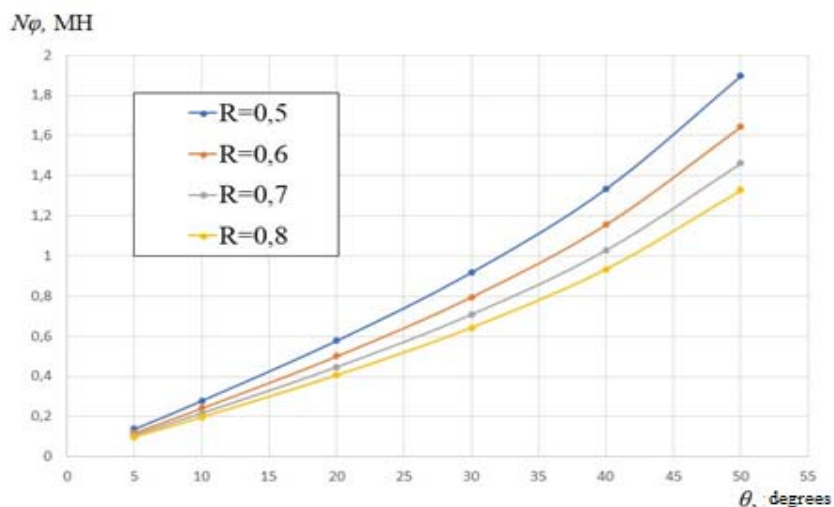


Fig. 7. Dependence of the tensile force on the surface inclination angle θ

Figure 7 illustrates that the tensile force increases steadily as the inclination angle of surface θ does. Herewith, the radius of the clamp connection R influences its increase: the greater the value of R , the lower the value of N_ϕ .

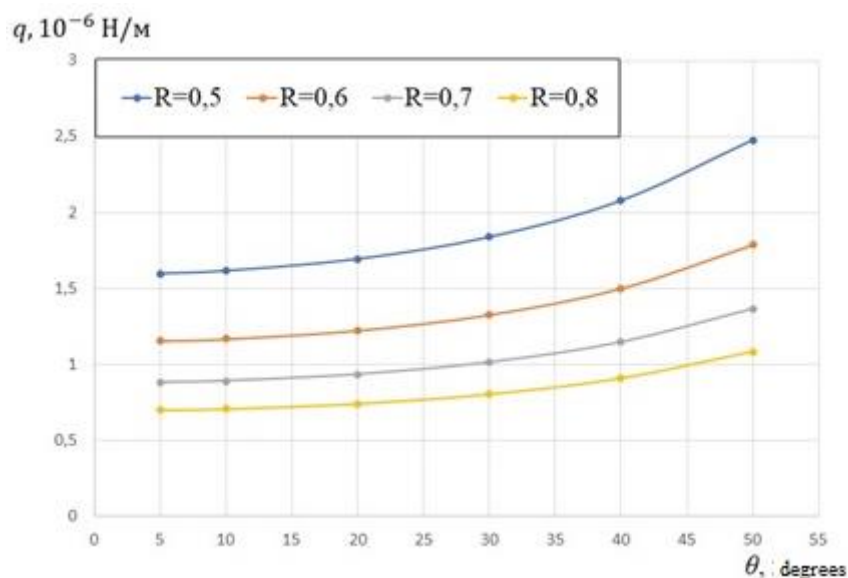


Fig. 8. Dependence of the frame pressure on the clamp on the inclination angle of the clamp surface θ

Figure 8 gives that the pressure from the frame side on a clamp increases steadily along with the angle increase θ . Likewise, in Figure 9, a dependence of the value q_θ on the value of R is noticeable: the greater the value of R , the lower the value of q_θ , which indicates that when choosing an optimal diameter of a clamp connection from a variety of options, from the point of view of strength, a clamp joint with the maximum value of R is preferable.

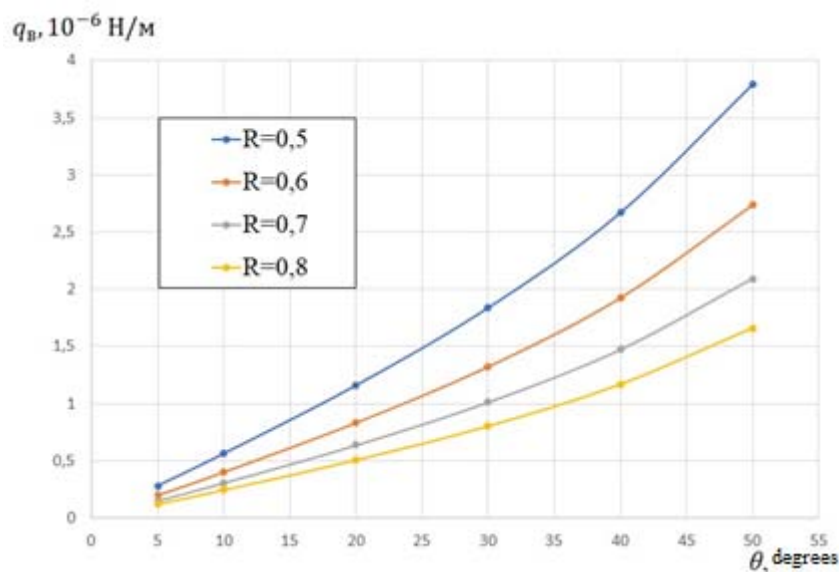


Fig. 9. Dependence of the resulting vertical component on the angle of inclination of the clamp surface

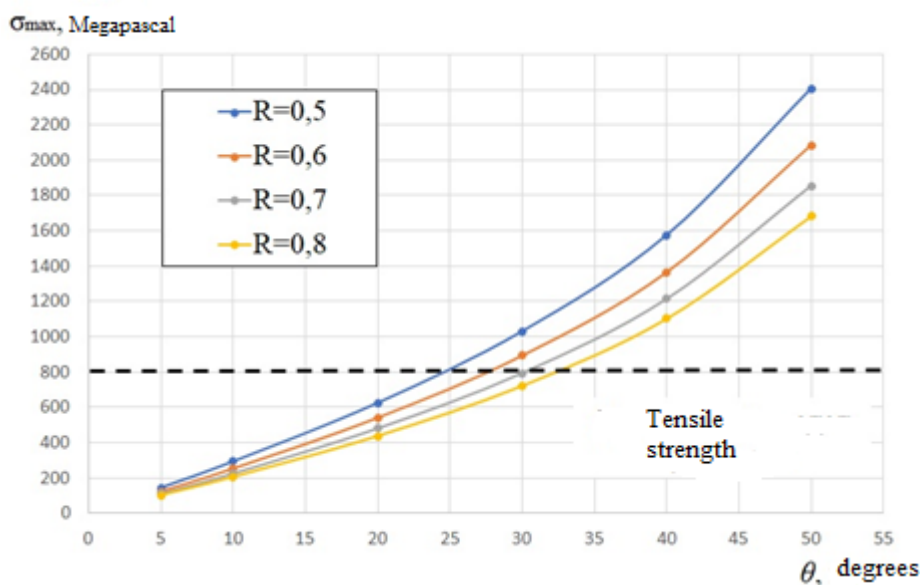


Fig. 10. Dependence of the joint strength on the angle of inclination of the clamp surface

Figure 10 illustrates the area within which the strength condition for TN-1type material with SME (this area is below the tolerance limit) is met. In accordance with Figure 10, one can find the maximum allowable values of clamp surface inclination angles for different radii of clamp fitting under which the strength condition for the nitinol clamp is fulfilled:

- $\theta \leq 24^\circ$ for $R = 0.5$ m;
- $\theta \leq 27^\circ$ for $R = 0.6$ m;
- $\theta \leq 30^\circ$ for $R = 0.7$ m;
- $\theta \leq 32^\circ$ for $R = 0.8$ m.

At the angles of θ , exceeding the specified values, the tensile force and the pressure, acting on a clamp from the side of frame, fall outside the allowable maximum load, as it is depicted in Figure 10.

Based on the computation results of the ANSYS software solutions, a parametric finite element clamp model was designed. Using the "Response Surface Optimization" module, the analysis of the model with the parameters of the clamp geometry, physical and mechanical characteristics of the material and the maximum values of stresses and deflection under limitations was carried out:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}$$

$$w_{\max} \leq w_{\text{доп}}$$

where $\sigma_{\text{доп}}$ and $w_{\text{доп}}$ are the tolerance values of stresses and deflection, w_{\max} is the maximal deflection value.

Multi-purpose search was adopted as an optimization algorithm. As a result of optimization, the region of compromise solutions, which visualization is represented in Figure 11, was obtained. The criterion of minimum mass was selected as the major optimization one. According to this criterion, the optimal design and engineering solution of the clamp construction was selected from a variety of the obtained compromises. The value of the optimal parameters of a clamp joint is given in Table 1.

The resulting set of parameters allows you to design the working structure of a clamp joint with the lowest mass.

Table 1

Parameter	Value
θ , degrees	32
R , meters	0.8
h , m	0.025

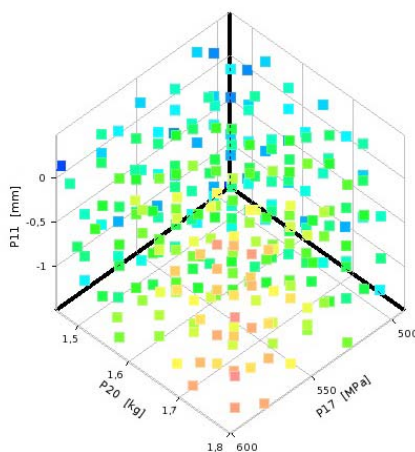


Fig. 11. Region of compromise between the equivalent values of stresses, deflections and clamp mass

CONCLUSION

The design problem of a clamp joint of small diameter, using SME materials, was set and solved.

The computations with the use of the ANSYS and SolidWorks software solutions enabled us to design the optimal clamp joint construction that meets the conditions of strength and minimum mass.

REFERENCES

1. Afanasev, P.P., Golubev, I.S., Levochkin, S.B., Novikov, V.N., Parafes, S.G., Pestov, M.D. and Turkin, I.K. (2010). *Bespilotnyye letatelnyye apparaty. Osnovy ustroystva i funktsionirovaniya* [Unmanned aircraft. Structure and functioning fundamentals], in Golubev I.S., Turkin I.K. (Eds.). Moscow: Izdatelstvo MAI, 654 p. (in Russian)
2. Zakharov, L.G., Kopylov, Ju.D., Drizgalovich, E.M. and Mast, S.V. (2015). *Guided missile*. Patent RU 2542679C1, February 20, 2015, Bull. № 5. (in Russian)
3. Ootsuka, K., Simidzu, K. and Sudzuki, Yu. (1990). *Splavy s efektom pamyati formy* [Shape memory alloys]. Translated from Japanese, in H. Funakubo (Ed.). Moscow: Metallurgiya, 224 p. (in Russian)
4. Warden, K. (2006). *Novyye intellektualnyye materialy i konstruksii* [New intellectual materials and structures]. Moscow: Tekhnosfera, 224 p. (in Russian)
5. Beloshenko, V.A. and Varyukhin, V.N. (2005). *Effekt pamyati formy v polimerakh i yego primeneniye* [Shape memory effect in polymers and its application]. Kiev: Naukova Dumka, 191 p. (in Russian)
6. Beloshenko, V.A., Varyukhin, V.N. and Voznyak, Yu.V. (2005). *The shape memory effect in polymers*. Russian Chemical Reviews, vol. 74, no. 3, p. 265–283. DOI: 10.1070/RC2005v074n03ABEH000876
7. Malukhina, O.A. and Khusainov, M.A. (2013). *Stability of shape memory spherical segments*. Vestnik NOVSVU, no. 75-2, p. 103–104. (in Russian)
8. Khusainov, M.A. (2006). *Ustoychivost elementov s pamyatyu formy* [Stability of elements with shape memory]. In book: Alloys with memory of the form. A Part I. Structure, phase transformations and properties, in Pushin V.G. (Ed.). Ekaterinburg: Institut fiziki metallov UrO RAN, p. 226–242. (in Russian)
9. Likhachev, V.A., Kuzmin, S.L. and Kamentseva, Z.P. (1987). *Effekt pamyati formy* [Shape memory effect]. Leningrad: Izdatelstvo LGU, 215 p. (in Russian)
10. Michutta, J., Somsen, Ch., Yawny, A., Dlouhy, A. and Eggeler, G. (2006). *Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni₄Ti₃ precipitates*. Acta Materialia, vol. 54, issue 13, p. 3525–3542. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.03.036
11. Nam, T.-H., Kim, J.-H., Choi, M.-S., Lee, H.-W. and Kim, Y.-W. (2003). *Phase transformation behavior in Ti-Ni alloy ribbons fabricated by melt spinning*. Journal de Physique IV France, vol. 112, p. 893–896. DOI: 10.1051/jp4:20031025
12. Blednova, Zh.M. (2016). *Poverkhnostnoye modifitsirovaniye materiala s efektom pamyati formy v inzhenernykh prilozheniyakh: nauchno-obrazovatelnyy kurs* [Surface modification with shape memory materials in engineering applications: scientific and educational course]. Krasnodar, 138 p. (in Russian)
13. Blednova, Zh.M. and Stepanenko, M.A. (2012). *Rol splavov s efektom pamyati formy v sovremennom mashinostroyenii: nauchno-obrazovatelnyy kurs* [The role of shape memory alloys in modern mechanical engineering: scientific and educational course]. Krasnodar, 69 p. (in Russian)
14. Kayumov, R.A., Mukhametshin, A.T., Mukhamedova, I.Z. and Strakhov, D.E. (2015). *Chislennoye modelirovaniye povedeniya polimernoy mufty s efektom pamyati formy* [Numerical modeling of the behavior of a polymer coupling with shape memory effect]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, vol. 18, no. 3, p. 259–262. (in Russian)
15. Alekseev, K.P., Stroganov, V.F., Strakhov, D.E. and Stroganov, I.V. (2002). *Ekspiermentalnoye issledovaniye mekhanicheskikh kharakteristik mufto-kleyevykh soyedineniy truboprovodov s termousazhivayushchimysya muftami iz termoreaktivnykh materialov* [Experimental study of the me-

chanical characteristics of coupling-adhesive joints of pipelines with heat-shrinkable couplings made of thermosetting materials]. Problems of Strength and Plasticity, no. 64, p. 138–141. (in Russian)

16. **Figurovskiy, V.I.** (1973). *Raschet na prochnost bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Calculation of the strength of unmanned aircrafts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 359 p. (in Russian)

17. **Parafes, S.G.** (2009). *Metody strukturno-parametricheskoy optimizatsii konstruksii bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Methods of structural and parametric optimization of the unmanned aircraft design]. Moscow: Izdatelstvo MAI-PRINT, 315 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yanina A. Kupriyanova, Engineer of Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Post-graduate Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), janina.kupriyanova@yandex.ru.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ХОМУТОВОГО СТЫКА ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Я.А. Куприянова^{1,2}

¹ Долгопрудненское научно-производственное предприятие, г. Долгопрудный, Россия

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

В настоящее время материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ) нашли широкое применение в области соединения тонкостенных оболочек. Использование материалов с ЭПФ в соединении отсеков беспилотного летательного аппарата (БПЛА) позволяет повысить точность и технологичность сборки, выполнять многократную сборку-разборку стыка и обеспечивает передачу усилий с разных поверхностей БПЛА с соблюдением заданных условий прочности. Рассмотрена методика проектирования разъемного хомутового (ленточного) стыка, выполненного из материала с эффектом памяти формы ЭПФ, отсеков БПЛА малого диаметра. Хомут представляет собой незамкнутую оболочку, выполненную из материала с ЭПФ. Перед установкой хомут охлаждается, и ему задают необходимую форму. При нагреве его диаметр уменьшается до заданного для обеспечения герметичности и отсутствия зазоров в конструкции. Были определены основные параметры, необходимые для решения задачи параметрической оптимизации хомутового стыка, при которых соединение будет отвечать требованиям прочности и иметь минимальную массу. На основе расчета хомутового стыка был получен алгоритм расчета, позволяющий проводить расчет ленточных соединений отсеков БПЛА различных диаметров. Была создана компьютерная модель соединения в САПР SolidWorks с параметрами, отвечающими требованиям прочности конструкции. На основе геометрии модели и свойств указанных материалов был проведен расчет массы конструкции при различных значениях угла наклона поверхности хомута. Приведена методика проектирования хомутового стыка, изготовленного из никелида титана. Найдены зависимости прочности соединения отсеков от параметров хомута и набор параметров, позволяющий спроектировать рабочую конструкцию хомутового соединения с наименьшей массой.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, хомутовый стык, эффект памяти формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев П.П.** Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, С.Б. Левочкин, В.Н. Новиков, С.Г. Парафесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин, под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина. М.: Изд-во МАИ, 2010. 654 с.

2. **Захаров Л.Г.** Управляемая ракета / Л.Г. Захаров, Ю.Д. Копылов, Е.М. Дризгалович, С.В. Маст. Патент RU 2542679C1, 20.02.2015. Бюл. № 5.

3. **Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю.** Сплавы с эффектом памяти формы / Пер. с японского, под ред. Х. Фунакубо. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
4. **Уорден К.** Новые интеллектуальные материалы и конструкции. М.: Техносфера, 2006. 224 с.
5. **Белошенко В.А., Варюхин В.Н.** Эффект памяти формы в полимерах и его применение. Киев: Наукова думка, 2005. 191 с.
6. **Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Возняк Ю.В.** Эффект памяти формы в полимерах // Успехи химии. 2005. Т. 74, № 3. С. 285–306.
7. **Малухина О.А., Хусаинов М.А.** Устойчивость сферических сегментов с эффектом памяти формы // Вестник Новгородского государственного университета. 2013. № 75-2. С. 103–104.
8. **Хусаинов М.А.** Устойчивость элементов с памятью формы. В кн.: Сплавы никелида титана с памятью формы: монография. Ч. 1. Структура, фазовые превращения и свойства / Под ред. В.Г. Пушина. Екатеринбург: Институт физики металлов УрО РАН, 2006. С. 226–242.
9. **Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П.** Эффект памяти формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 215 с.
10. **Michutta J.** Elementary martensitic transformation processes in Ni-rich NiTi single crystals with Ni₄Ti₃ precipitates / J. Michutta, Ch. Somsen, A. Yawny, A. Dlouhy, G. Eggeler // Acta Materialia. 2006. Vol. 54, iss. 13. P. 3525–3542. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.03.036
11. **Nam T.-H.** Phase transformation behavior in Ti-Ni alloy ribbons fabricated by melt spinning / T.-H. Nam, J.-H. Kim, M.-S. Choi, H.-W. Lee, Y.-W. Kim // Journal de Physique IV France. 2003. Vol. 112. P. 893–896. DOI: 10.1051/jp4:20031025
12. **Бледнова Ж.М.** Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы в инженерных приложениях: научно-образовательный курс. Краснодар, 2016. 138 с.
13. **Бледнова Ж.М., Степаненко М.А.** Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении: научно-образовательный курс. Краснодар, 2012. 69 с.
14. **Каюмов Р.А.** Численное моделирование поведения полимерной муфты с эффектом памяти формы / Р.А. Каюмов, А.Т. Мухаметшин, И.З. Мухамедова, Д.Е. Страхов // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 3. С. 259–262.
15. **Алексеев К.П.** Экспериментальное исследование механических характеристик муфто-клеевых соединений трубопроводов с термоусаживающимися муфтами из терморезистивных материалов / К.П. Алексеев, В.Ф. Строганов, Д.Е. Страхов, И.В. Строганов // Проблемы прочности и пластичности. 2002. № 64. С. 138–141.
16. **Фигуровский В.И.** Расчет на прочность беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 359 с.
17. **Парафесь С.Г.** Методы структурно-параметрической оптимизации конструкции беспилотных летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 315 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Куприянова Янина Алексеевна, инженер Долгопрудненского научно-производственного предприятия, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета), janina.kuprianova@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

18.07.2021
25.01.2022

Received
Accepted for publication

18.07.2021
25.01.2022

ББК 05
Н 34
Св. план 2022

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 25, № 01, 2022
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 25, No. 01, 2022

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 25.01.2022.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

10,25 усл. печ. л.

Заказ № 881 / 17

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н.Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2022