

Том 21, № 06, 2018

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 21, No. 06, 2018

Издается с 1998 г.

Москва
2018

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.т.н., д.ю.н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

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

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, к.филос.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., к.э.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

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

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

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

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

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

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д.т.н., Москва, Россия;

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

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

Сайдахмедов Р.Х., проф., д.т.н., Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан;

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

Владимир Немец, PhD, Факультет транспортных наук, Отделение воздушного транспорта, Чешский технический университет, Прага, Чешская республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиации, 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, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina Poleshkina, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Members of the chief editorial Board:

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

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

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

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

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

Vacily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia;

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

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

Ravshan H. Saydakhmedov, Professor, Doctor of Sciences, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;

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

Vladimir Nemez, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Department of Air Transport, Czech Technical University in Prague, 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 президиуме РАН, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Самохин А.В., д.т.н., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Evgeniy E. Nechaev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

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

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

Aleksey V. Samokhin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

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

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

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

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТ

Ассоров Н.А., Нечаев Е.Е., Суринт П.С.

К вопросу о переходе на давление QNH в Российской Федерации 8

Кропивенцева С.А.

Улучшение процессов обслуживания пассажиров вылетающего рейса на основе методов управления проектами 20

Нечаев Е.Е., Никулин А.О.

Анализ работы системы «Синхрон» аэропорта Шереметьево в сложных метеорологических условиях 31

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И.

Расчетное исследование влияния геометрической компоновки несущих винтов на КПД на режиме висения на базе нелинейной лопастной вихревой модели 43

Кечин А.В., Левин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В.

Организация энергоснабжения приемников первой категории перспективных воздушных судов гражданской авиации 54

Кульчак А.М., Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю.

Реконфигурация комплексной системы управления воздушного судна при отказах приводов с учетом ограничений на управление 65

Рудельсон Л.Е., Смородский С.Н., Чернышева В.А.

Динамическая дисциплина формирования потоков при совместном использовании общесистемной информации 79

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Антонец И.В., Борсоев В.А., Борсоева В.В., Борисов Р.А.

Разработка конструкций динамометрических датчиков, использующих силовую компенсацию деформации упругого чувствительного элемента от внешних нагрузок 92

Елисеев Б.П., Камзолов А.С.

Концепция построения системы контроля и регулирования транспортно-сервисных услуг 105

Parkhimovich A.V.

Some aspects of aviation service market 113

Рыбалкина А.Л., Трусова Е.И., Шаров В.Д.

Методика оценки риска предстоящего полета для вертолетов с учетом неблагоприятных метеоусловий 124

CONTENTS

TRANSPORT

Assorov N.A., Nechaev E.E., Surint P.S. About the transition to QNH pressure in the Russian Federation	8
Kropiventseva S.A. Improvement of passenger service processes of departing flight based on project management methods	20
Nechaev E.E., Nikulin A.O. The analytical treatment of the system "Synchron" at Sheremetyevo airport in adverse weather conditions	31

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Ignatkin Yu.M., Makeev P.V., Shomov A.I. Calculated research of influence of helicopter main rotors geometry on the efficiency in hover mode based on the nonlinear vortex model	43
Kechin A.V., Levin A.V., Khaliutin S.P., Zhmurov B.V. Organization of power supply of the first category receivers for perspective civil aviation aircraft	54
Kulchak A.M., Kosyanchuk V.V., Zybin E.Yu. Reconfiguration of the aircraft integrated control system regarding control constraints under actuator failures	65
Rudel'son L.E., Smorodskiy S.N., Chernyshyova V.A. Dynamic discipline of parallel service in concept flight and flow – information for a collaborative environment	79

MECHANICAL ENGINEERING AND THEORY OF MACHINES

Antonets I.V., Borsoev V.A., Borsoeva V.V., Borisov R.A. The development of dynamometric gauge constructions using force compensation of the elastic sensing element deformation from external loads	92
Eliseev B.P., Kamzolov A.S. The concept of constructing a system of control and regulation of transport services	105
Parkhimovich A.V. Some aspects of aviation service market	113
Rybalkina A.L., Trusova E.I., Sharov V.D. Risk assessment methodology for a forthcoming flight of helicopters taking into account unfavorable meteorological conditions	124

ТРАНСПОРТ

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-8-19

К ВОПРОСУ О ПЕРЕХОДЕ НА ДАВЛЕНИЕ QNH В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Н.А. АССОРОВ¹, Е.Е. НЕЧАЕВ², П.С. СУРИНТ¹

¹ ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» филиал «МЦ АУВД», г. Москва, Россия

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

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 16-08-00070)

В статье рассматриваются плюсы и минусы перехода на давление QNH. Проведен анализ различных факторов, влияющих на безопасность полетов. Произведен сравнительный анализ двух видов отсчета высоты при подлете к аэродрому. Первый – это отсчет высоты относительно самого аэродрома, когда на поверхности аэродрома высота на высотомере будет равна нулю. Такое давление называется QFE. Второй – это отсчет от уровня моря, в данном случае должно учитываться превышение аэродрома. Такое давление называется QNH. Оба эти давления используются в авиации. Исторически сложилось, что давление QFE использовалось в СССР, и после распада страны продолжили использовать это давление в процессе взлета и посадки. В середине 2000-х годов большинство российских авиакомпаний перешло на использование иностранной техники, преимущественно на воздушные суда, выпущенные компаниями «Боинг» и «Аэрбас». Так как эти воздушные суда произведены в западных странах, они используют давление QNH, поэтому возникают проблемы с правильной установкой высот при подлете к аэродрому, что часто приводит к снижению воздушного судна ниже уровня, определенного схемой захода на посадку, и, как следствие, к снижению ниже минимальной безопасной высоты. На примере использования авиационной техники сделан вывод о необходимости перехода на давление QNH. В статье также объяснено, почему переход на полеты по QNH на территории РФ является первоочередным и необходимым шагом для поддержания должного уровня безопасности полетов.

Ключевые слова: эшелон перехода, давление аэродрома, безопасность полетов, управление воздушным движением.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ QNH В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Несмотря на то, что Российская Федерация осталась единственной страной в мире, в которой полеты ниже высоты перехода выполняются по QFE, изменения в воздушном законодательстве, направленные на переход на давление QNH, постоянно откладываются. На официальном сайте Росавиации в разделе «Деятельность» есть рубрика, посвященная внедрению давления QNH в РФ. Последняя новость в данном разделе датирована апрелем 2015 года, хотя до этой даты новости появлялись регулярно, был проведен ряд совещаний, создана рабочая группа, опубликована «Методика корректировки схем (процедур) маневрирования для аэродромов (вертодромов, посадочных площадок) при полетах воздушных судов (ВС) по давлению, приведенному к уровню моря по стандартной атмосфере (QNH) с учетом указания на аэронавигационных картах высот в футах». В рамках деятельности рабочей группы была проведена научно-исследовательская работа, которая содержала оценку принятого решения о переходе на QNH, а вывод группы ученых, выполнявших данную работу, состоял в том, что риск авиакатастроф в РФ после перехода на QNH уменьшится более чем в 2 раза по сравнению с существующими полетами по QFE. Однако, несмотря на всю проведенную работу и полученные результаты, в России по-прежнему используется давление QFE.

При этом система отчетности и анализа безопасности полетов не отражает текущие проблемы, связанные с использованием QFE в России.

В данной работе показаны проблемы и ошибки, с которыми сталкивается летный и диспетчерский состав при применении давлений QFE и QNH.

В октябре 2017 года в Москве был введен в эксплуатацию новый центр управления воздушным движением. Новое оборудование центра обеспечивает режим S (режим бортового ответчика самолета, передающий больше информации о полете, чем режим C). При помощи радиолокатора, получающего данные от ВС, оборудованных ответчиком режима S, была собрана статистическая информация по количеству ВС, использующих QFE или QNH ниже высоты перехода и выполнявших полеты на аэродромы Внуково и Домодедово.

Для того чтобы статистика лучше отражала особенности применения различных давлений, ВС были разбиты на три категории: ВС российских авиакомпаний иностранного производства, ВС иностранных авиакомпаний и ВС российского производства. Следует отметить, что статистика не включает ВС советского производства (Ту-154, Ту-134, Як-42 и т. д.) по причине отсутствия на них соответствующего оборудования, а в качестве российских ВС считались ВС типа Ту-204, SSJ-100. Для сбора статистики было проанализировано около 100 ВС в каждом аэропорту, выполнявших полеты в различное время суток и в различных метеоусловиях.

Из рис. 1 и табл. 1 видно, что из 112 ВС 102 выполняют полеты по QNH. Часть ВС иностранных авиакомпаний выполняет полеты по давлению QFE, однако практически это авиакомпании стран бывшего СССР (Белавиа, Узбекские авиалинии, Сомон Эйр), в которых пилоты либо имели дело с QFE, либо до сих пор используют QFE. Можно также отметить интересный факт, что на ВС российского производства Ту-204 и SSJ -100, авиакомпании, летающие в Домодедово, все равно выполняют полеты по давлению QNH, вопреки тому, что в России и СССР всегда использовалось QFE как основное давление.

Таблица 1
Table 1

Статистика использования давления QNH и QFE по аэропорту Домодедово
QNH and QFE Domodedovo approach statistics

	QNH	QFE
ВС российских авиакомпаний иностранного производства	82	8
ВС иностранных авиакомпаний	16	2
ВС российского производства	4	0



Рис. 1. Общее количество ВС в аэропорту Домодедово
Fig. 1. Total number of aircraft at Domodedovo airport

Статистика по аэропорту Внуково показывает (рис. 2, табл. 2), что 92 из 107 ВС выполняют полеты по QNH. Ряд иностранных авиакомпаний использует давление QFE, но стоит отметить, что все они являются ВС бизнес-авиации. Возможно, что большинство экипажей данных ВС имели дело с QFE в прошлом, поэтому для них это не вызывает проблем. Из российских авиакомпаний заходы на посадку по QFE используют только авиакомпании, эксплуатирующие ВС типа ATR 72. Так же стоит отметить, что специальный летный отряд «Россия», эксплуатирующий Ту-204, выполняет заходы на посадку по QNH.

Какова причина того, что авиакомпании продолжают использовать QNH, притом что основным давлением в России является QFE, и именно его выдают диспетчеры при снижении ВС ниже эшелона перехода.

Основной причиной этого является то, что использование QNH безопаснее, чем QFE.

Таблица 2
Table 2

Статистика использования давления QNH и QFE по аэропорту Внуково
QNH and QFE Vnukovo approach statistics

	QNH	QFE
ВС российских авиакомпаний иностранного производства	74	5
ВС иностранных авиакомпаний	15	10
ВС российского производства	3	0

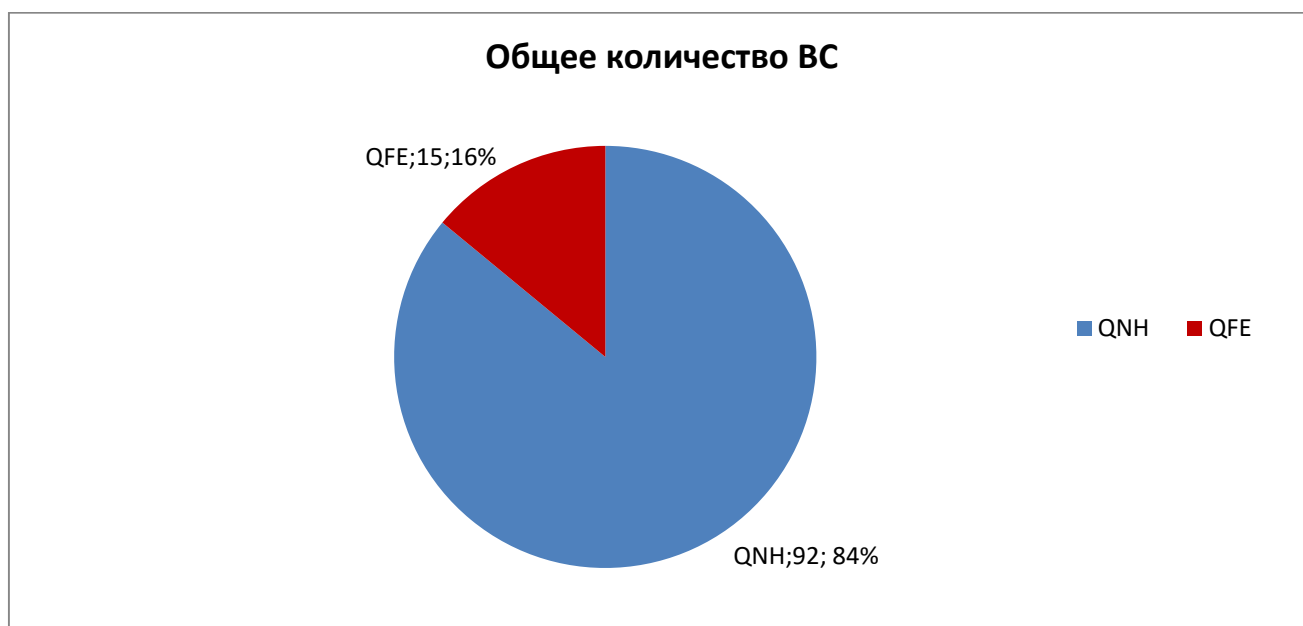


Рис. 2. Общее количество ВС в аэропорту Внуково
Fig. 2. Total number of aircraft at Vnukovo airport

Западная авиационная техника не поддерживает использование QFE, накладывая на него ограничения либо устанавливая QFE на своих самолетах как опцию, которую необходимо заказывать. В российских авиакомпаниях такие опции установлены только на самолетах Аэрофлота.

Для полетов на горных аэродромах QNH также является предпочтительным к использованию давлением. Для примера рассмотрим схему стандартного захода на посадку по приборам горного аэродрома Нальчик (рис. 3). На схеме, опубликованной в АИП РФ, указаны относительные высоты в метрах, абсолютные высоты пролета препятствий, абсолютные высоты рельефа, относительные минимальные безопасные высоты сектора, относительные высоты и номерные эшелоны (соответствующие футовым) зон ограничений в районе аэродрома. Очевидно, что нет необходимости в таком многообразии единиц измерения и систем отчета на одной лишь схеме захода, намного удобнее для понимания будет схема, в которой отчет всех высот шел от одного уровня и был указан в одних единицах измерения.

Еще одной особенностью использования QFE на горных аэродромах является то, что зачастую шкалы установки высотомера не хватает для выставления значения нужного QFE, в данных случаях приходится устанавливать QNH, такое решение было описано даже в основном советском авиационном документе – НПП ГА-85. Также снижается риск столкновения с землей в случае неперестановки давления на эшелоне перехода или ошибочной его установки, т. к. разница между QNH и стандартным давлением 1013 ГПа обычно намного меньше, чем между 1013 ГПа и QFE, в котором еще заложено превышение аэродрома.

В результате ошибочных установок высотомера произошел ряд авиакатастроф, например Ил-76 в Ленинкане в 1988 году, Як-40 в Иркутске в 1988 году, Ил-62 в Гаване в 1977 году, Ан-12 в Ереване в 1989 году.

AIP
RUSSIA

BOOK 1

AD 2.1 URMN-87
07 DEC 17

STANDARD ARRIVAL CHART
INSTRUMENT (STAR) - ICAO

TRANSITION
LEVEL: FL060

NALCHIK, RUSSIA
NALCHIK
RWY 24

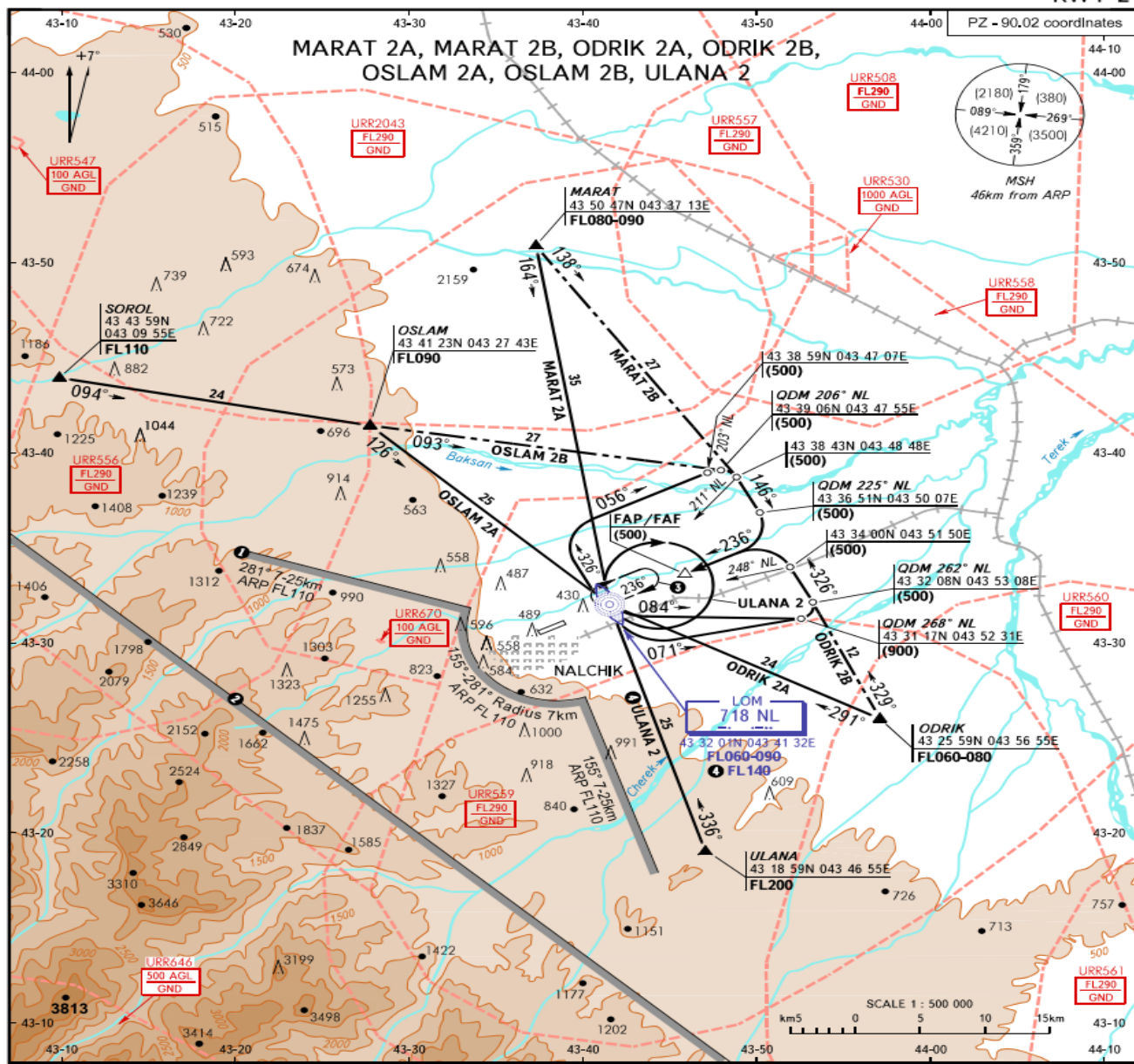


Рис. 3. Карта стандартного прибытия по приборам на аэродром Нальчик
Fig. 3. Chart of standard instrument arrival at Nalchik airport

Очередным недостатком использования QFE в крупных узловых районах, где находятся несколько близкорасположенных аэродромов, является то, что ВС, фактически находящиеся в одном воздушном пространстве, используют разные значения для установки высотомера. Для примера возьмем зону Московского узлового диспетчерского района (МУДР) (рис. 4).

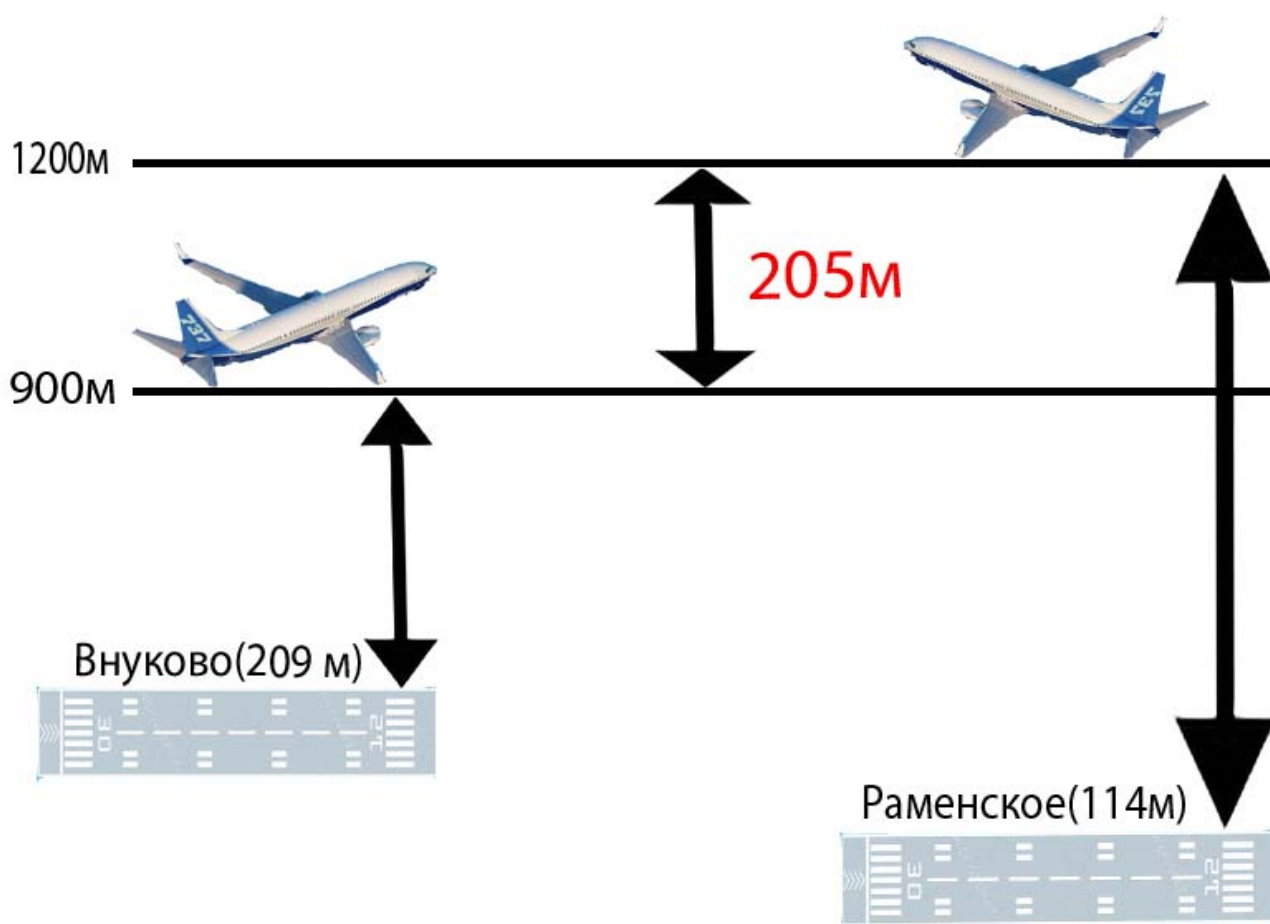


Рис. 4. Пример нарушения вертикального эшелонирования при использовании разного давления
Fig. 4. An example of the vertical separation violation using different pressures

Одно воздушное судно вылетело с ВПП 24 Внуково, превышение торца которой равно 209 метров, второе ВС вылетело с ВПП 30 аэродрома Раменское, превышение торца которой 114 метров. Внуковскому ВС была задана высота 900 метров, раменское ВС набирает высоту и сохраняет 1200 метров. Текущая секторизация МУДР позволяет этим двум ВС находиться на связи у двух разных диспетчерских пунктов и при этом быть эшелонированными только по вертикали, не имея безопасного горизонтального интервала. Таким образом, ВС из Внуково будет выдерживать высоту 900 метров по давлению QFE торца ВПП 24, а ВС из Раменского будет выдерживать 1200 метров по давлению QFE торца ВПП 30, из-за разницы превышений фактический вертикальный интервал между двумя ВС будет 205 метров при минимальном безопасном интервале 300 метров. В качестве дополнительных факторов добавляются ВС, следующие по трассам местных воздушных линий (МВЛ) и ниже нижнего безопасного эшелона, которые выполняют полет по QNH района, находясь при этом в непосредственной близости от ВС, выполняющих полет по QFE аэродрома. В случае использования на аэродромах QNH разница между QNH аэродрома и QNH района обычно была бы несущественной и не несущей в себе угрозы безопасности полетов.

Помимо вышеперечисленных проблем, использование QFE накладывает свой отпечаток на работу диспетчеров. При полетах в воздушном пространстве Российской Федерации при первом разрешении на снижение ниже эшелона перехода ВС дают данные для установки выотомера, на данный момент диспетчер должен выдать относительную высоту снижения и давле-

ние QFE, при этом, в соответствии с ФАП¹, при полетах ниже эшелона перехода экипаж может использовать как QFE, так и QNH². Как показывает статистика, около 90 % экипажей ВС используют эту возможность и выполняют полеты по QNH, и, соответственно, должны устанавливать значение абсолютной высоты и QNH. На практике происходит следующий парадокс: диспетчер говорит одну высоту и давление, экипаж все подтверждает и устанавливает совершенно другую высоту и давление. Давление QNH экипаж берет из радиовещательной передачи АТИС, а значения абсолютных высот публикуются во всех сборниках аэронавигационной информации (ЦАИ ГА, Jeppesen, Lido (рис. 5)), кроме АИП РФ. Очевидно, что ситуация, при которой диспетчер дает одни значения, а экипаж на свое усмотрение устанавливает совершенно другие, не может способствовать повышению безопасности полетов. Также стоит отметить, что описанная ситуация, когда диспетчер дал значение QFE, а экипаж его подтвердил, сам правильно установил QNH и абсолютную высоту, является идеальной, и чаще всего это делают экипажи наших авиакомпаний, привыкшие к такому порядку, а на практике, особенно с иностранными или менее опытными экипажами, возникает множество проблем. Разберем основные из них.

ALT/HEIGHT CONVERSION		
QNH	(QFE)	
4540'	(3947' -	1200m)
3550'	(2957' -	900m)
3220'	(2627' -	800m)
2570'	(1977' -	600m)
2240'	(1647' -	500m)
1340'	(747' -	225m)
1090'	(497' -	150m)

Рис. 5. Пример таблицы перевода высот
Fig. 5. Example of altitude/height conversion table

В качестве примера возьмем типовую ситуацию на секторе Домодедово Круг с ВС СБИ123, хотя данные ситуации происходят на всех секторах с экипажами различных, как иностранных, так и российских авиакомпаний. В первом разрешении на снижение ниже эшелона перехода диспетчер Круга выдает относительную высоту и давление QFE:

СБИ123, снижайтесь 800 метров, QFE 997 Гпа.

На что экипаж должен ответить:

Снижаюсь 800 метров, QFE 997, СБИ123.

В случае выполнения экипажем захода по QFE, flight control unit (FCU) будет иметь следующий вид (рис. 6), если же заход будет выполняться по QNH, то, взяв данные для перевода высот из схемы захода и давление из АТИС, экипаж введет их в FCU, и он будет иметь вид как на рис. 7. Как видно, на датчике высоты ALT установлено 3300 футов, что в таблице перевода (рис. 5) соответствует относительной высоте 800 метров для аэропорта Домодедово.

¹ Об утверждении Федеральных авиационных правил «Организация воздушного движения в Российской Федерации»: приказ Минтранса РФ от 25 ноября 2011 г. № 293 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_124909/ (дата обращения: 23.11.2017).

² Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации»: приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91259/ (дата обращения: 23.11.2017).



Рис. 6. Заход на посадку по давлению QFE
Fig. 6. Approach on QFE pressure



Рис. 7. Заход на посадку по давлению QNH
Fig. 7. Approach on QNH pressure

Наиболее распространенной ошибкой среди летного состава является неправильная установка одного из параметров, высоты или давления. Намереваясь выполнять заход по QNH, экипаж устанавливает при снижении значение QNH, но при этом на датчике высоты экипаж по ошибке (обычно это происходит машинально, из-за невнимательности, незнания местных особенностей, малого опыта заходов по QFE и т. д.) устанавливает высоту 800 метров (2600 футов) (рис. 8), продолжая при этом выполнение снижения по QNH. Естественно, при таких параметрах ВС окажется ниже разрешенной ему высоты, что может привести к нарушению интервалов, снижению ниже минимальной безопасной высоты, срабатыванию системы предупреждения столкновения с землей.

Отмечается также обратный вариант этой ошибки, когда, взяв правильную высоту из таблицы перевода, экипаж вводит давление, которое ему сказал диспетчер (рис. 9).



Рис. 8. Ошибочная установка высоты при заходе на посадку по давлению QNH
Fig. 8. Incorrect altitude setting during approach on QNH



Рис. 9. Ошибочная установка давления QNH
Fig. 9. Incorrect setting of QNH pressure

Подобные ошибки наиболее часто проявляются при интенсивном движении, когда диспетчером выдается множество команд относительно курса, скорости, а также неоднократное изменение высоты полета, все это повышает нагрузку на экипаж, который и так находится на самом ответственном этапе полета и должен, помимо всего прочего, выполнять ряд стандартных процедур для захода. В подобной обстановке, когда диспетчер постоянно выдает новую высоту, которую не нужно устанавливать, а нужно сначала пересчитать, а также при изменениях диспетчер может дать новое давление, которое тоже не нужно устанавливать. Совокупность всех этих факторов регулярно приводит к ошибкам со стороны экипажей ВС.

Еще одним фактором, осложняющим обслуживание воздушного движения по QFE, является то, что в соответствии с порядком осуществления радиосвязи диспетчер должен добиться от экипажа квитанции на свое указание, в данном случае это не всегда бывает просто. После указания на снижение от диспетчера, экипажи часто просят сообщить им значение QNH, а затем в квитанции подтверждают QNH и снижение до относительной высоты, в таком случае перед диспетчером встает вопрос – добиться от экипажа подтверждения значения QFE, которое экипажу не нужно и которое он устанавливать не собирается, либо пропустить это, фактически нарушив правила радиообмена. Технологии работы диспетчеров в данных ситуациях не отражают действительности и не могут реально помочь. По технологии экипажу дают высоты в футах и QNH только после его запроса, что на практике происходит очень редко, также существует требование передавать экипажу превышение порога ВПП. Такая информация ставит экипаж в тупик, т. к. непонятно, что ему с ней делать и зачем ему диспетчер ее выдает, ведь никаких расчетов на практике экипажи не проводят, а все данные берут из схем захода на посадку. Дополнительную нагрузку вызывает то, что в случае доклада экипажа о том, что он выполняет заход по QNH, диспетчер Круга обязан сообщить об этом диспетчеру Вышки, хотя фактически все ВС заходят по QNH, и никакой разницы в отсчете высоты для Круга и для Вышки нет. Все вышеперечисленные факторы превращают саму по себе не сложную процедуру захода, которая должна ограничиваться парой указаний и подтверждений в избыточный радиообмен, загрузку эфира, дополнительные пультные операции и согласования, снижая тем самым пропускную способность сектора, повышая нагрузку на экипаж и диспетчера. Это негативно сказывается на качестве предоставляемого обслуживания, уменьшает взаимопонимание между диспетчерами и экипажами ВС, повышая при этом количество инцидентов в зоне ответственности диспетчеров Круга.

Особенно явно подобные проблемы проявляются с экипажами бизнес-авиации и экипажами иностранных авиакомпаний, которые или имеют низкий уровень подготовки, и/или малый опыт полетов в МУДР.

ВЫВОДЫ

Проанализировав полученные статистические данные, а также возможные ошибки при использовании QFE, описанные в статье, можно сделать вывод о том, что необходимость перехода на QNH является не просто плановым шагом к переходу на новый уровень обслуживания воздушного движения, а требуемой мерой по повышению безопасности полетов. Необходимо на основе уже готовой методики по внедрению QNH в кратчайшие сроки провести процедуру перехода. Стандартизация процедур использования QNH во всем мире положительно повлияет на уровень безопасности полетов: уменьшение нагрузки на летный состав, единые процедуры при полетах как в пределах Российской Федерации, так и в зарубежные страны, отсутствие неофициальных пересчетов, таких как высота превышения порога аэродрома, высоты на схеме (SID, STAR), высота принятия решения. Говоря о снятии нагрузки на экипаж воздушного судна, не стоит забывать и об авиадиспетчерах. Работа по организации воздушного движения в районе аэродрома требует постоянной концентрации за счет ограниченного пространства и постоянного дефицита времени в условиях повышенного движения. Постоянный контроль выдерживания высот по схеме, в случае их нарушения из-за неправильного установленного давления, может вызвать сбой в уже сформировавшейся очереди на посадку. Процесс выяснения причин невыдерживания высот, как правило, занимает значительную часть полета по схеме, так как чаще всего это происходит с иностранными экипажами. Опираясь на примеры, приведенные в статье, можно однозначно сказать, что использование давления QNH положительно отразится на безопасности полетов в районе аэродрома, а игнорирование данного факта и продолжение полетов по QFE не только оставит ее на прежнем уровне, но и может привести к различным инцидентам. Политика реакционного решения вопроса неприемлема в данном случае, необходимо заранее произвести переход на QNH, не дожидаясь очередного авиационного инцидента, результатом, которого будут рекомендации о переходе на QNH.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Затонский В.М., Санников В.А.** Технология управления воздушным движением при возникновении потенциально-конфликтных ситуаций: учебное пособие. СПб.: СПГУ ГА, 2001.
2. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Обеспечение безопасности полетов при управлении воздушным движением: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2011.
3. **Рудельсон Л.Е.** Программное обеспечение АС УВД: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2007.
4. **Затонский В.М., Казаков В.А., Князевский Д.А.** Обслуживание воздушного движения на международных воздушных линиях. Ульяновск: УВАУ ГА, 2001. 190 с.
5. **Ассоров Н.А., Нечаев Е.Е., Чехов И.А.** К вопросу о высоте перехода в воздушном пространстве Российской Федерации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 226. С. 5–11. DOI: 10.26467/2079-0619-2016-0-226-5-11
6. **Пятко С.Г.** Повышение эффективности управления воздушным движением в Московской зоне ЕС ОрВД [Электронный ресурс] // Aviation explorer. Режим доступа: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (дата обращения: 22.12.2017).
7. **Ассоров Н.А.** Анализ организации воздушного движения в некоторых крупных аэропортах мира // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 5–12. DOI: 10.26467/2079-0619-2015--221-5-12
8. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Метод снижения конфликтности на стандартных маршрутах вылета и прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 117–123.

9. Михайлов Н.А. Международные полеты: учебное пособие. СПб., 2000.

10. Липин А.В., Попов К.С. Выполнение международных полетов. Кн. 4. Обслуживание воздушного движения. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Академия ГА: Центр автоматизированного обучения, 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ассоров Никита Александрович, авиадиспетчер МЦ АУВД, nikssor@yandex.ru.

Нечаев Евгений Евгеньевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, eenetchaev@mail.ru.

Суринт Павел Сергеевич, авиадиспетчер МЦ АУВД, pavelsurint@gmail.com.

ABOUT THE TRANSITION TO QNH PRESSURE IN THE RUSSIAN FEDERATION

Nikita A. Assorov¹, Evgeniy E. Nechaev², Pavel S. Surint¹

¹Federal State Unitary Enterprise "State ATM Corporation", Moscow, Russia

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

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 16-08-00070

ABSTRACT

This article discusses the advantages and disadvantages of transition to QNH pressure. The analysis of various factors affecting the flight safety has been conducted. A comparative analysis of the two types of altitude reading while approaching the airport has been carried out. The first type is the altitude reading relative to the airfield when at an aerodrome surface an altimeter altitude is equal to zero. This pressure is called QFE. The second one is estimated relatively to the sea level; in this case the aerodrome elevation must be taken into account. Such pressure is called QNH. These both pressures are used in aviation. Historically, QFE pressure was used in the USSR, and after the disintegration of the Soviet Union this type of pressure was used during takeoff and landing. In the mid - 2000s, the majority of Russian airlines began to use the foreign aircraft, mainly the airplanes produced by Boeing and Airbus Companies. Since these aircraft are produced in Western countries, they use QNH pressure, so there are some difficulties of correct altitude setting while approaching an aerodrome, this causes an aircraft descent below the level prescribed by STAR, consequently, decent below minimum safe altitude. The conclusion of necessary transition to QNH pressure was made using the example of aircraft. The article also explains why the transition to QNH pressure flights in the Russian Federation is a top priority and a necessary step for maintaining proper level of flight safety.

Key words: transition level, airfield pressure, flight safety, air traffic control.

REFERENCES

1. Zatonskiy, V.M. and Sannikov, V.A. (2001). *Tekhnologiya upravleniya vozdushnym dvizheniem pri vozniknovenii potentsialno-konfliktnykh situatsiy* [The technology of air traffic control in the case of potential-conflict situations]. *Uchebnoe posobie* [Tutorial]. St. Petersburg: SPSU CA. (in Russian)
2. Malygin, V.B. and Nechaev, E.E. (2011). *Obespechenie bezopasnosti poletov pri upravlenii vozdushnym dvizheniem* [Accidents prevention during air traffic control]. *Uchebnoe posobie* [Tutorial]. Moscow: MSTUCA. (in Russian)

3. Rudelson, L.E. (2007). *Programmnoe obespechenie AS UVD* [Software of ATC AS]. Uchebnoe posobie. Tutorial. Moscow: MSTUCA. (in Russian)
4. Zatonskiy, V.M., Kazakov, V.A. and Knyazevskiy, D.A. (2001). *Obsluzhivanie vozdušnogo dvizheniya na mezhdunarodnykh vozdušnykh liniyakh* [Air traffic service of international airlines]. Ulyanovsk: UVAU GA, 2001. 190 p. (in Russian)
5. Assorov, N.A., Nechaev, E.E. and Chekhov, I.A. (2016). *K voprosu o vysote perekhoda v vozdušnom prostranstve Rossiyskoy Federatsii* [About transition altitude in the Russian Federation air space]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 226, pp. 5–11. DOI:10.26467/2079-0619-2016-0-226-5-11 (in Russian)
6. Pyatko, S.G. (2017). *Povyshenie effektivnosti upravleniya vozdušnim dvizheniem v Moskovskoy zone ES OrVD* [Improving the efficiency of air traffic management in Moscow zone of Joint ATM system]. Aviation explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (accessed 12.22.2017). (in Russian)
7. Assorov, N.A. (2015). *Analiz organizatsii vozdušnogo dvizheniya v nekotorykh krupnykh aeroportakh mira* [Analysis of air traffic management in some major airports of the world]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 5–12. DOI: 10.26467/2079-0619-2015--221-5-12 (in Russian)
8. Malygin, V.B. and Nechaev, E.E. (2014). *Metod snizheniya konfliktnosti na standartnykh marshrutakh vyleta i pribytiya* [The method of lowering conflict situations of standard departure and arrival routes]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 117–123. (in Russian)
9. Mikhaylov, N.A. (2000). *Mezhdunarodnye polety* [International flights]. Uchebnoe posobie [Tutorial]. St. Petersburg. (in Russian)
10. Lipin, A.V. and Popov, K.S. (2005). *Vypolnenie mezhdunarodnykh poletov. Obsluzhivanie vozdušnogo dvizheniya* [International flight operation. Air traffic service]. Vol. 4. 2nd ed. St. Petersburg: SPSU CA; Automated training center. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita A. Assorov, Air Traffic Controller at Moscow Centre of Air Traffic Management Automation, nikssor@yandex.ru.

Evgeniy E. Nechaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, eenetchaev@mail.ru.

Pavel S. Surint, Air Traffic Controller at Moscow Centre of Air Traffic Management Automation, pavelsurint@gmail.com.

Поступила в редакцию 16.03.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 16.03.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 658.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-20-30

УЛУЧШЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ ВЫЛЕТАЮЩЕГО РЕЙСА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

С.А. КРОПИВЕНЦЕВА¹

¹*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия*

В статье рассматривается формализация технологии обслуживания пассажиров вылетающего рейса в сетевую модель, которая является хорошей основой для улучшения и совершенствования технологии обслуживания, контроля за выполнением работ, определяющих длительность процесса, а также оптимизации услуги по стоимости и ресурсам. В статье приводится результат формализации технологии обслуживания пассажиров вылетающего рейса в сетевую модель, найден критический путь и определена длительность обслуживания. Для отыскания критического пути сетевого графа рекомендовано применять алгоритм пометок Дейкстры, он позволяет выявить все критические пути из начальной вершины в конечную, если таких путей несколько. Совершенствование процесса обслуживания возможно за счет сокращения длительности работ, лежащих на критическом пути, а также улучшения технологии обслуживания. При обслуживании пассажиров вылетающего рейса возможно появление факторов, приводящих к задержке вылета рейса по вине службы организации пассажирских перевозок. При анализе процесса обслуживания пассажиров вылетающего рейса учитываются дополнительные работы по устранению факторов задержки вылета рейса. Показана сетевая модель обслуживания в случае несвоевременного снятия багажа пассажира, неявившегося на рейс, определена длительность обслуживания и выявлены работы критического пути, требующие особого внимания. В анализе результатов приводится перечень работ критических путей сетевых моделей по нескольким причинам нарушения регулярности отправок. Сделан вывод о необходимости сокращать длительность выполнения работ критического пути графа для обеспечения вылета рейса по расписанию. Оптимизация сетевой модели предполагает рассмотрение нескольких возможных технологий обслуживания пассажиров вылетающего рейса с учетом дополнительных работ по устранению факторов, приводящих к задержке отправления рейса из аэропорта, с целью составления такой технологии обслуживания, которая обеспечила бы минимальные затраты при заданной длительности процесса обслуживания.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, сетевой график, методы управления проектами, критический путь.

ВВЕДЕНИЕ

Предоставление полного спектра качественных аэропортовых услуг и возможности авиаперевозчикам снижать расходы на наземное обслуживание улучшают конкурентные позиции аэропорта. Необходимым условием для снижения тарифов на наземное обслуживание являются комплекс работ по совершенствованию производственной деятельности подразделений аэропорта и уменьшению расходов на ее осуществление [1].

Хорошей основой для улучшения процессов по обслуживанию пассажиров вылетающего рейса являются методы управления проектами, применение которых пока не является обычной практикой в производственной деятельности службы организации пассажирских перевозок.

Процессы предполетного обслуживания рейса подробно описываются технологическими графиками, регламентирующими структуру работ и последовательность их выполнения. Применение сетевых моделей в службе организации пассажирских перевозок позволит улучшать и совершенствовать технологию обслуживания пассажиров вылетающего рейса [2]. Технология обслуживания пассажиров пока не формализована в виде типовых, оптимизированных по времени и ресурсам сетевых моделей. Тогда как это хорошая основа для организации процесса обслуживания пассажирских перевозок в аэропорту и оптимизации по стоимости и длительности выполнения.

Формализация технологии обслуживания пассажиров вылетающего рейса в виде сетевой модели дает полный перечень работ, выполняемых при обслуживании вылетающего рейса. А формализация действий при возникновении ситуаций, приводящих к нарушению регулярности отправок из аэропорта, позволит свести к минимуму временные потери [3]. В дальнейшем улучшение процессов обслуживания на основе методов управления проектами затронет изменение сетевого графика – появится новая совокупность работ и произойдет перераспределение ресурсов.

В данной статье на примере технологии обслуживания пассажиров вылетающего внутрироссийского рейса сформирована совокупность работ, определена их последовательность и взаимосвязи, построен соответствующий сетевой график. Найден критический путь и рассчитана длительность для рассматриваемой технологии обслуживания. Рассмотрен случай неявки пассажира на посадку, требующий выявления багажа такого пассажира и снятия его с борта самолета, для этого случая построен сетевой график работ, выявлен перечень работ, включенных в критический путь, и рассчитана длительность процесса обслуживания.

ОБСЛУЖИВАНИЕ ПАССАЖИРОВ ВЫЛЕТАЮЩЕГО РЕЙСА

Процесс обслуживания вылетающих пассажиров включает в себя следующие этапы: предполетный досмотр пассажира и его вещей; регистрацию билетов и оформление багажа; посадку пассажиров в воздушное судно (ВС). Предполагается, что предполетный досмотр и регистрация выполняются одновременно и параллельно друг другу. Представим эти этапы в виде совокупности работ и зададим последовательность их выполнения. Укрупненный список работ по обслуживанию вылетающих пассажиров, последовательность и длительность их выполнения запишем в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Список работ по обслуживанию пассажиров вылетающего рейса
The list of services for departing flight passengers

Шифр	Название работы	После работы	V_i	V_j	d_{ij}
О	Подготовка к регистрации	–	1	2	5
А	Регистрация пассажиров	О	2	3	80
В	Комплектование багажа	О	2	4	80
С	Комплектование питания	–	1	4	30
Д	Итоги регистрации. Центровочный график	А	3	4	5
Е	Доставка и загрузка багажа в ВС	А, В, Д	4	5	20
Ф	Загрузка в ВС бортипитания	А, Д	4	6	20
Г	Контроль выхода пассажиров	Д	4	7	10
Н	Доставка и посадка пассажиров в ВС	Г	7	8	20
И	Прием-передача багажа. Оформление документации	Е	5	8	5
Ж	Снятие-дозагрузка бортипитания. Оформление документов	Ф	6	8	5
К	Передача перевозочной документации на рейс	Н, И, Ж	8	9	10

Начало работы А «Регистрация пассажиров» (2,3) совпадает с получением разрешения на регистрацию, а начало работы Г «Контроль выхода пассажиров» (4,7) совпадает с готовностью воздушного судна к принятию пассажиров на борт (окончание заправки самолета). По окончании работы К «Передача перевозочной документации» (8,9) начинается закрытие люков и дверей самолета и отгон трапов.

Работа В «Комплектование багажа» (2,4) выполняется параллельно работе А «Регистрация пассажиров» (2,3), по окончании работы по комплектованию багажа начинается выполнение работы Е «Доставка и загрузка багажа в ВС» (4,5). Работа Д «Итоги регистрации. Центровочный график» (3,4) начинается сразу после окончания регистрации. Окончание работы Д (3,4) инициирует начало работы F «Загрузка в ВС бортипитания» (4,6) и работы Г «Контроль выхода пассажиров» (4,7).

На рис. 1 показан сетевой график, описывающий процесс обслуживания пассажиров вылетающего рейса. Здесь и далее сетевые графики построены с использованием программы, написанной в среде VBA Excel [4, с. 523–529, с. 556–564].

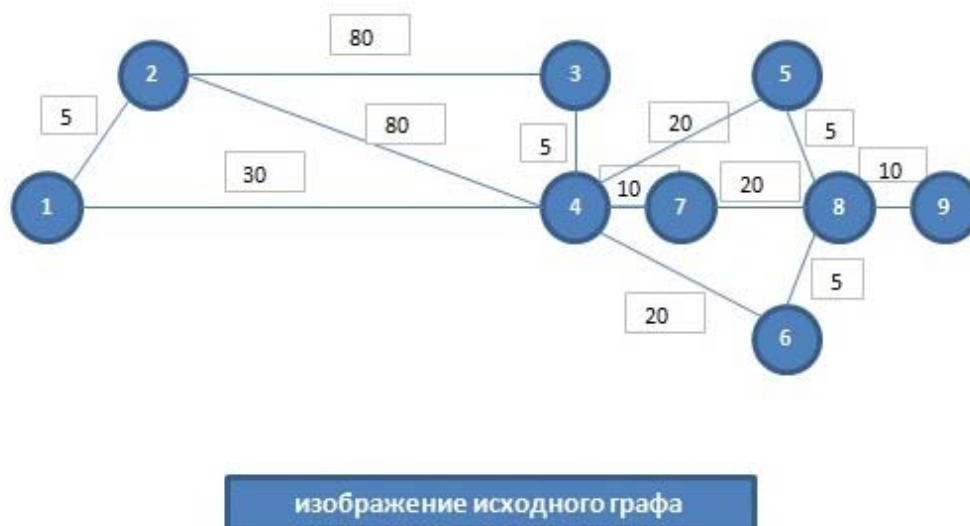


Рис. 1. Сетевая модель обслуживания вылетающих пассажиров
Fig. 1. Network model of departing passengers service

При определении критического пути на сетевом графике целесообразно использовать алгоритм пометок Дейкстры, так как он позволяет найти все максимальные пути между начальной и конечной вершинами ориентированного графа в том случае, если таких путей несколько [4, с. 339]. Это важно в целях выявления всего комплекса работ, требующих контроля своевременности их выполнения со стороны диспетчера службы. На рис. 2 показан критический путь, величина которого определяет общую длительность обслуживания вылетающих пассажиров. Общая длительность обслуживания вылетающих пассажиров составила 130 минут.

Критический путь составляют работы (1,2)–(2,3)–(3,4)–(4,7)–(7,8)–(8,9), высокую значимость имеют работы:

- подготовка к регистрации (1,2),
- регистрация пассажиров (2,3),
- передача итогов регистрации (3,4),
- контроль выхода пассажиров на посадку (4,7),
- доставка и посадка пассажиров в самолет (7,8),
- передача перевозочной документации на рейс (8,9).



Рис. 2. Критический путь сетевой модели обслуживания пассажиров вылетающего рейса
Fig. 2. The critical path of the network model of departing passengers service

Сокращение длительности обслуживания пассажиров вылетающего рейса

Совершенствование технологии обслуживания вылетающих пассажиров заключается в поиске возможности ускорить выполнение работ, составляющих критический путь. Например, сокращение длительности регистрации обеспечивает внедрение автоматизированной системы отправки и автоматизации работ по внутривокзальной сортировке багажа. Открытие дополнительных стоек регистрации также ускоряет процесс регистрации рейса.

Непрерывно-поточный метод посадки пассажиров в самолет позволит выполнять работы по контролю выхода пассажиров на посадку и посадке в самолет пассажиров одновременно и сразу после прохождения пассажиром регистрации, таким образом, работы G (4,7) и H (7,8) можно было бы выполнять после окончания подготовки к регистрации, после работы O (1,2). Такое изменение технологии обслуживания вылетающих пассажиров позволит существенно сократить длительность обслуживания.

УЧЕТ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ ВЫЛЕТАЮЩЕГО РЕЙСА

Любая нестандартная ситуация, возникающая при обслуживании пассажиров, должна быть урегулирована в строго заданные сроки, иначе она станет причиной задержки вылета самолета и нарушения регулярности отправок. Поэтому в построенной ранее сетевой модели следует учесть все возможные нестандартные ситуации, возникающие в ходе обслуживания вылетающих пассажиров, так как для устранения факторов задержки вылета рейса по расписанию выполняется комплекс дополнительных работ.

Из всей совокупности причин задержек со стороны службы обслуживания пассажирских перевозок¹ наиболее частыми причинами нарушения регулярности отправок можно считать следующие:

- несвоевременное снятие багажа пассажиров, не явившихся к вылету;
- нарушение центровки и установленной очередности загрузки багажа;
- несвоевременную разгрузку и загрузку ВС бортипитанием.

Рассмотрим, как неявка пассажира на посадку увеличивает длительность процесса обслуживания вылетающих пассажиров. При обнаружении неявки на посадку пассажира сотрудники

¹ Руководство по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации СССР (ППП ГА-90). Режим доступа: <http://avia.rostransnadzor.ru/wp-content/uploads/sites/2/2016/12/97.Rukovodstvo-po-obespecheniyu-i-uchetu-regulyarnosti-poletov-vozdushny-h-sudov-grazhdanskoj-aviatsii.pdf> (дата обращения: 10.05.2018)

службы организации пассажирских перевозок должны выявить, есть ли у него зарегистрированный багаж, определить номер багажных бирок, передать указание на снятие багажа, передать информацию о снятии порции бортипитания, а также внести изменения в багажную ведомость.

В табл. 2 записаны работы, которые необходимо выполнить в случае неявки пассажира на посадку, а также указана длительность и последовательность их выполнения.

Таблица 2
Table 2

Список работ по обслуживанию в случае неявки пассажира на посадку
The list of services in case of no-show passenger

Шифр	Название операции	После работы	Vi	Vj	dij
О	Подготовка к регистрации	–	1	2	5
А	Регистрация пассажиров	О	2	3	80
В	Комплектование багажа	О	2	4	80
С	Комплектование питания	–	1	4	30
Д	Итоги регистрации. Центровочный график	А	3	4	5
Е	Доставка и загрузка багажа в ВС	А, В, Д	4	7	20
F	Загрузка в ВС бортипитания	А, Д	4	8	20
Г	Контроль выхода пассажиров	Д	4	5	10
Л	Неявка пассажира на посадку. Выявление зарегистрированного багажа	Г	5	6	5
М	Указание номеров багажных мест, подлежащих снятию	Л	6	7	2
Н	Указание на снятие порции бортипитания	Л	6	8	2
Р	Идентификация и снятие мест багажа	М	7	9	15
Н	Доставка и посадка пассажиров в ВС	Г	6	10	20
І	Прием-передача багажа и оформление документации	Е	9	10	5
Ј	Снятие-дозагрузка бортипитания. Оформление документов	F	8	10	5
К	Передача перевозочной документации на рейс	Н, І, Ј	10	11	10

Важно, что в процессе работы Г «Контроль выхода пассажиров» (4,5) выявляется неявившийся на рейс пассажир. После этого необходимо оперативно определить, имеется ли у него зарегистрированный багаж, для этого выполняется работа Л «Неявка пассажира на посадку. Выявление зарегистрированного багажа» (5,6). После этого выполняются все необходимые работы для снятия этого багажа с самолета и корректировки перевозочной документации:

- работа М «Указание номеров багажных мест, подлежащих снятию» (6,7),
- работа Р «Идентификация и снятие мест багажа» (7,9),
- работа І «Прием-передача багажа и оформление документации» (9,10).

При этом корректировка перевозочной документации (пассажирский манифест, багажная ведомость, сводно-загрузочная ведомость) выполняется параллельно с работами по выявлению и снятию багажа неявившегося на посадку пассажира.

На рис. 3 показана сетевая модель, описывающая процесс обслуживания вылетающих пассажиров рейса в случае неявки пассажира на посадку.



Рис. 3. Сетевая модель обслуживания в случае неявки пассажира на посадку
Fig. 3. Network model of service in case of no-show passenger

На рис. 4 показан критический путь, величина которого определяет общую длительность обслуживания при неявке пассажира на посадку. Длительность работ составила 140 минут.



Рис. 4. Критический путь сетевой модели обслуживания в случае неявки пассажира на посадку
Fig. 4. The critical path of the network model of service in case of no-show passenger

Критический путь составляют работы (1,2)–(2,3)–(3,4)–(4,7)–(7,9)–(9,10)–(10,11), это означает, что от начала и окончания каждой из этих работ зависит общая длительность обслуживания вылетающих пассажиров, нельзя как задерживать начало выполнения каждой из них, так и увеличивать их длительность. Высокую значимость по соблюдению момента начала и окончания имеют работы:

- подготовка к регистрации (1,2),
- регистрация пассажиров (2,3),
- передача итогов регистрации (3,4),
- доставка и загрузка багажа в ВС (4,7),

- идентификация и снятие мест багажа (7,9),
- прием-передача багажа и оформление документации (9,10),
- передача перевозочной документации (10,11).

Критический путь на графе, описывающем процесс обслуживания вылетающих пассажиров рейса в случае неявки пассажира на посадку, отличается от критического пути в случае штатного обслуживания, вместо работ G «Контроль выхода пассажиров» и H «Доставка и посадка пассажиров в ВС» выполняются работы E «Доставка и загрузка багажа в ВС», P «Идентификация и снятие мест багажа» и I «Прием-передача багажа и оформление документации».

В случае неявки зарегистрированного пассажира на посадку общая длительность обслуживания вылетающих пассажиров увеличится на 10 минут и составит 140 минут. Момент окончания работы по передаче перевозочной документации сместится на 10 минут, что напрямую влияет на время отправки ВС из аэропорта. Поэтому окончание обслуживания вылетающих пассажиров в установленные сроки возможно за счет осуществления мероприятий по сокращению длительности работ критического пути (1,2)–(2,3)–(3,4)–(4,7)–(7,9)–(9,10)–(10,11). И добиваться, очевидно, следует сокращения длительности работ по доставке и загрузке багажа в ВС (4,7), а также по выявлению и снятию зарегистрированного багажа неявившегося на посадку пассажира (7,9). Варианты для сокращения этих работ также существуют.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследовании проведен анализ нескольких нештатных ситуаций, для которых выявлены работы критического пути, результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Работы критического пути при нарушении регулярности отправок
Critical path works in case of departure violation and regularity

Причина задержки вылета по РРП ГА 90	Перечень работ критического пути
П12. Снятие багажа не явившихся к вылету пассажиров	– подготовка к регистрации; – регистрация пассажиров; – передача итогов регистрации; – доставка и загрузка багажа в ВС; – идентификация и снятие мест багажа; – прием-передача багажа и оформление документации; – передача перевозочной документации
П10. Неправильный расчет и нарушение расчетной центровки. П03. Несвоевременная разгрузка и загрузка ВС багажом	– регистрация и досмотр пассажиров; – подведение итогов регистрации; – выгрузка багажа; – погрузка багажа в другие отсеки; – передача документов по багажу
П06. Несвоевременная разгрузка и загрузка ВС борпитанием	– регистрация и досмотр пассажиров; – сверка количества борпитания; – подготовка дополнительных порций; – доставка борпитания к самолету; – погрузка борпитания; – передача документов по питанию

Проанализировав и формализовав процесс обслуживания в каждом случае появления причины задержки вылета рейса, получаем совокупность сетевых графиков, описывающих процессы обслуживания пассажиров вылетающего рейса.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть все возможные варианты осуществления процесса обслуживания пассажиров вылетающего рейса (несколько технологий обслуживания) и выполнить оптимизацию сетевой модели с учетом ограничений на ресурсы, длительность и стоимость выполнения работ [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов управления проектами в обслуживании пассажиров вылетающего рейса позволяет структурировать процесс путем декомпозиции его на этапы, задачи и подзадачи, получить сетевую модель, выявить работы критического пути, осуществить перераспределение ресурсов, контролировать загрузку ресурсов и т. д. [5–7].

Анализ процесса обслуживания вылетающих пассажиров с применением методов управления проектами позволяет выявлять и своевременно контролировать наиболее ответственные работы, выполняемые последовательно друг за другом, длительность которых определяет длительность самого процесса обслуживания [8–9].

Улучшение процесса обслуживания затрагивает не только изменение технологии обслуживания, но и сокращение длительности работ по обслуживанию вылетающих пассажиров. Задача оптимального распределения ресурсов при изменении длительности выполнения работ с учетом дополнительных работ по устранению факторов задержки вылета рейса также является актуальной. В тех случаях, когда существует много различных комбинаций продолжительностей и стоимостей работ, каждая комбинация может давать различные длительности и стоимости всего процесса обслуживания вылетающих пассажиров [10].

Процедуры выбора компромиссного соотношения между длительностью и стоимостью выполнения работ имеют целью составление такой технологии обслуживания, которая обеспечила бы минимальные затраты при заданной длительности процесса обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов А.А., Зайцев Е.Н., Тецлав И.А. Управление коммерческой подготовкой воздушного судна в аэропорту // Вестник СПбГУ ГА. 2012. № 2(4). С. 91–100.
2. Сорокина Т.В., Кропивенцева С.А. Исследование путей сокращения длительности наземного обслуживания пассажиров внутрироссийского рейса // Сб. трудов Международной молодежной научной конференции «XIII Королёвские чтения», г. Самара, 6–8 октября 2015. 2015. Т. 1. С. 186.
3. Радаева Ю.А., Кропивенцева С.А. Исследование мероприятий по повышению качества наземного обслуживания авиаперевозок в аэропорту // Сб. трудов Международной молодежной научной конференции с международным участием «XIV Королёвские чтения», г. Самара, 3–5 октября 2017. 2017. Т. 1. С. 316.
4. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 704 с.
5. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
6. Сетевые модели в управлении: сб. статей // под ред. Д.А. Новикова, О.П. Кузнецова, М.В. Губко. М.: Эгвес, 2011. 443 с.

7. Сесекин Н.А. Сетевое экономико-математическое моделирование оптимизации мелкосерийного производства на предприятии // Вестник ПГПУ. Сер. № 3. Гуманитарные и общественные науки. 2016. № 1. С. 51–55.

8. Буценко Е.В., Шориков А.Ф. Реализация сетевого экономико-математического моделирования для процесса бизнес-планирования // Вестник УРФУ. Сер. Экономика и управление. 2015. Т. 14, № 6. С. 935–953. DOI: 10.15826/vestnik.2015.14.6.051

9. Ширишков Б.Ф. Минимизация продолжительности возведения объектов на основе использования информационно-динамических сетевых моделей / А.М. Славин, В.С. Степанова, С.О. Михеев // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 2. С. 70–75.

10. Буценко Е.В. Метод критического пути как критерий оптимизации процесса бизнес-планирования // Известия ДВФУ. Экономика и управление. 2016. № 3. С. 40–50. DOI: 10.5281/zenodo.163476

11. Камышев А.И. Эффективность СМК. Ч. 3. Методы улучшения процессов // Методы менеджмента качества. 2013. № 12. С. 10–16.

12. Коникина Е.В. Система поддержки принятия решения при оперативном управлении наземным обеспечением авиаперевозок // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 118. С. 146–152.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кропивенцева Светлана Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент по специальности «Управление процессами перевозок», доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте ФГАОУ ВПО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», kropivenceva.sa@ssau.com.

IMPROVEMENT OF PASSENGER SERVICE PROCESSES OF DEPARTING FLIGHT BASED ON PROJECT MANAGEMENT METHODS

Svetlana A. Kropiventseva¹

¹Samara National Research University, Samara, Russia

ABSTRACT

The article considers the formalization of the service technology of departing passengers into network model, which is a good basis for improving the service technology, monitoring the performance that determines the process duration and service optimization in cost and resources. The article shows the formalization result of the service technology of departing passengers into network model; the critical path is found, and the duration of service is determined. In order to find the critical path of the network graph it is recommended to apply the Dijkstra algorithm. It allows us to identify all critical paths from the initial vertex to the final one if there are several. Improving the service process is possible by reducing the performance duration on the critical path and upgrading the service technology. When servicing the departing passengers, there may be factors that lead to the flight departure delay due to the fault of the passenger transportation organization. While analyzing the service for departing passengers, additional work to eliminate the flight delay factors is considered. The service network model is shown in case of untimely removal of the baggage, belonged to the passenger who has not arrived for the flight; the service duration has been determined and critical path activities requiring special attention have been identified. The results analysis provides a list of critical path activities for several reasons of departure violation. It is concluded that it is necessary to reduce the performance duration of critical path graph to ensure the departure of a scheduled flight. Optimization of network model involves consideration of several possible service technologies of departing flight, taking into account the additional work to eliminate the factors leading to the flight delay from the airport and then creation of such service technology which would provide the minimum expenses at given service process duration.

Key words: passenger transportation, network graph, project management methods, critical path.

REFERENCES

1. **Bogdanov, A.A., Zaytsev, E.N. and Tetslav, I.A.** (2012). *Upravlenie kommercheskoy podgotovkoy vozdushnogo sudna v aeroportu* [Management of commercial preparation of the aircraft at the airport]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Bulletin of St. Petersburg State University of Civil Aviation], no. 2(4), pp. 91–100. (in Russian)
2. **Sorokina, T.V. and Kropiventseva, S.A.** (2015). *Issledovanie putey sokrashcheniya dlitelnosti nazemnogo obsluzhivaniya passazhirov vnutrirossiyskogo reysa* [Research of ways to reduce the duration of passenger ground service on domestic flights]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodyozhnoy nauchnoy konferentsii «XIII Korolevskie chteniya», Samara, 6–8 oktyabrya 2015* [Proceedings of international conference "XIII Korolyovskie chteniya"], vol. 1, pp. 186. (in Russian)
3. **Radaeva, Yu.A. and Kropiventseva, S.A.** (2017). *Issledovanie meropriyatiy po povysheniyu kachestva nazemnogo obsluzhivaniya aviaperevozok v aeroportu* [Research of steps to improve the quality of ground servicing of air transportation at the airport]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodyozhnoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «XIV Korolevskie chteniya», Samara, 3–5 oktyabrya 2017* [Proceedings of international conference "XIV Korolyovskie chteniya"], vol. 1, pp. 316. (in Russian)
4. **Leonenkov, A.V.** (2005). *Reshenie zadach optimizatsii v srede MS Excel* [Solution of optimization problems in MS Excel]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 704 p. (in Russian)
5. **Novikov, D.A.** (2005). *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of organizational systems management]. Moscow: MPSI. 584 p. (in Russian)
6. *Setevye modeli v upravlenii* (2011). [Network models in management] *Sbornik statey* [Festschrift]. Ed. D.A. Novikova, O.P. Kuznecova, M.V. Gubko. Moscow: Egves. 443 p. (in Russian)
7. **Sesekin, N.A.** (2016). *Setevoe ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie optimizatsii melkoserijnogo proizvodstva na predpriyatii* [Network economic and mathematical modeling of small-scale production optimization at the enterprise]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta. Ser. № 3. Gumanitarnye i obshestvennye nauki* [Bulletin of Perm State Humanitarian and Pedagogical University. Iss. no. 3. Humanities and Social Sciences], no. 1, pp. 51–55. (in Russian)
8. **Butsenko, E.V. and Shorikov, A.F.** (2015). *Realizatsiya setevogo ekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya dlya protsessa biznes-planirovaniya* [Implementation of network economic-mathematical modeling for business planning process]. *Vestnik URFU. Ser. Ekonomika i upravlenie* [Bulletin URFU. Iss. Economics and Management], no. 6, vol. 14, pp. 935–953. DOI: 10.15826/vestnik.2015.14.6.051 (in Russian)
9. **Shirshikov, B.F., Slavin, A.M., Stepanova, V.S. and Mikheev, S.O.** (2016). *Minimizatsiya prodolzhitelnosti vozvedeniya obektov na osnove ispolzovaniya informatsionno-dinamicheskikh setevykh modeley* [Minimization of duration of objects construction through the use of information and dynamic network models]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering], no. 2, pp. 70–75. (in Russian)
10. **Butsenko, E.V.** (2016). *Metod kriticheskogo puti kak kriteriy optimizatsii protsessa biznes-planirovaniya* [Critical path method as a criterion for optimizing the business planning process]. *Izvestiya Dalnevostochnogo federalnogo universiteta. Ekonomika i upravlenie* [The Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management], no. 3, pp. 40–50. DOI: 10.5281/zenodo.163476 (in Russian)
11. **Kamyshev, A.I.** (2013). *Effektivnost SMK. Ch. 3. Metody uluchsheniya protsessov* [Efficiency of QMS. Part 3. Methods for improving processes]. *Metody menedzhmenta kachestva* [Methods of quality Management], no. 12, pp. 10–16. (in Russian)
12. **Konikova, E.V.** (2007). *Sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri operativnom upravlenii nazemnym obespecheniem aviaperevozok* [Decision support system for operational management

of ground support of air transportation]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 118, pp.146–152. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Svetlana A. Kropiventseva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Transportation Management and Control Chair, Samara National Research University, kropivenceva.sa@ssau.com.

Поступила в редакцию 14.08.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 14.08.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ «СИНХРОН» АЭРОПОРТА ШЕРЕМЕТЬЕВО В СЛОЖНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Е.Е. НЕЧАЕВ¹, А.О. НИКУЛИН²

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

²Международный аэропорт Шереметьево, г. Москва, Россия

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 16-08-00070)

Система совместного принятия решений в аэропорту (A-CDM) – это инструмент для совместного управления процессами в соответствии с согласованными процедурами для повышения эффективности работы всех партнеров в любых ситуациях. Система A-CDM для аэропорта является звеном в цикле процессов управления прилетающим и вылетающим потоками воздушных судов, наземным обслуживанием и управлением по маршрутам полета. Внедрение элемента A-CDM «Неблагоприятные условия» в аэропорту Шереметьево позволяет контролировать снижение пропускной способности аэропорта и облегчает процесс быстрого ее восстановления. Данные по повышению показателей прогнозируемости после внедрения элемента A-CDM «Неблагоприятные условия» в аэропорту Шереметьево следующие: прогнозируемость времени посадки воздушного судна (ВС) – 98,7 % (повышение на 12,9 %); прогнозируемость времени занятости места стоянки (МС) – 93,1 % (повышение на 17,1 %); прогнозируемость времени руления ВС – 92,6 % (повышение на 2,5 %); прогнозируемость времени отправления ВС – 97,2 % (повышение на 2,1 %); пунктуальность отправления ВС по расписанию – 83,55 % (повышение на 0,3 %); пунктуальность отправления ВС по расчетному времени – 94 % (повышение на 1,2 %); количество задержанных рейсов более 15 мин – 16,45 % (сокращение на 22,6 %); среднее время руления от посадки до прибытия ВС – 7,5 мин (сокращение на 7 %); среднее время руления от отправления до взлета ВС – 11,9 мин (сокращение на 3 %). Разработанное совместно с ПАО «Аэрофлот» и специалистами Шереметьевского центра ОВД «Соглашение об утверждении сценариев расчета взлетно-посадочных операций для обеспечения максимального значения пропускной способности комплекса ИВПП» привязано к уровню изменения пропускной способности, что повышает гибкость системы планирования.

Ключевые слова: система совместного принятия решений в аэропорту (A-CDM), сложные метеорологические условия, аэропорт.

ВВЕДЕНИЕ

Зимний период работы любого аэропорта всегда характеризуется сложными метеорологическими условиями и опасными явлениями (ливневой снег, замерзающий дождь и т. п.), которые могут нарушить нормальное функционирование аэропорта и снизить его пропускную способность до уровня, который будет существенно ниже, чем при работе в штатном режиме [1, 2, 9–11].

Перечень наиболее значимых прогнозируемых неблагоприятных условий:

- погода и соответствующее состояние взлетно-посадочной полосы и рулежных дорожек;
- ветер, который оказывает особенно сильное влияние на выполнение взлетно-посадочных операций.

Состояние погоды и ветра в основном и определяет пропускную способность аэродрома, которая возможна в данный период времени в аэропорту.

Необходимость проведения противообледенительной обработки воздушных судов (ВС) также сказывается на пропускной способности.

Сложные метеорологические условия могут быть оценены с более или менее высокой точностью на основании метеопрогнозов, а их влияние и возможные последствия предсказаны на основании опыта работы персонала аэропорта. Поэтому при формировании мероприятий по работе аэропорта в неблагоприятных метеоусловиях требуется расширенное планирование.

В европейских аэропортах при наступлении сложных метеорологических условий и опасных метеоявлений отменяются сотни рейсов, десятки тысяч пассажиров скапливаются в терминалах в ожидании возможности улететь по своему направлению, что подтверждается негативными отзывами в прессе и социальных сетях¹.

В Европе 26 аэропортов под руководством Евроконтроля полностью внедрили систему совместного принятия решений (A-CDM)², но реализованные мероприятия не всегда спасают от сбойной ситуации. Большинство аэропортов разработало определенные процедуры и определило конкретные меры при работе в неблагоприятных условиях. На данный момент не все процедуры одинаково эффективны, и они часто применяются непоследовательно или без надлежащей координации между партнерами, задействованными в процессе обеспечения полетов.

Влияние прогнозируемых неблагоприятных условий в европейских аэропортах сопоставимо с различными «аварийными уровнями». Для каждого аварийного уровня назначены определенные процедуры. Когда партнеры получают информацию о природе нарушения, им также направляется предупреждающее сообщение, соответствующее уровню возникающего неблагоприятного условия. Основным требованием при возникновении неблагоприятных условий является то, что все партнеры должны выполнять предварительно согласованные процедуры, соответствующим образом распределять свои ресурсы и сводить влияние неблагоприятных условий к минимуму.

На сегодняшний день не существует единой методики, которая позволила бы проанализировать эффективность процедур и идентифицировать области, которые нуждаются в улучшении. Однако есть определенные общие показатели, которые являются основой для всех процедур независимо от их локальных различий³.

Для эффективной работы аэропорта в сложных метеоусловиях необходимо:

- сформировать перечень процедур и мер для работы в неблагоприятных условиях или план действий в кризисных ситуациях;
- убедиться, что процедуры совпадают с процедурами, применимыми при работе в штатном режиме;
- убедиться, что все партнеры знакомы с процедурами;
- назначить руководителя, который будет ответственен за координацию действий.

¹ Hundreds of passengers stranded at Schiphol as snow disrupts planes, trains and roads [Электронный ресурс] // Dutchnews.nl. Режим доступа: <http://www.dutchnews.nl/news/archives/2017/12/hundreds-of-passengers-stranded-at-schiphol-as-snow-disrupts-planes-trains-and-roads/> (дата обращения: 31.08.2018); Calder S. British airways: 50,000 passengers stranded after de-icing meltdown at Heathrow [Электронный ресурс] // Independent. Режим доступа: <http://www.independent.co.uk/travel/news-and-advice/british-airways-50000-passengers-stranded-de-icing-meltdown-heathrow-delays-diversions-a8102761.html> (дата обращения: 30.08.2018); Burrows T. Airports plunged into snow meltdown: Thousands of British Airways, Emirates, easyJet and Ryanair passengers are stranded around world as weather sparks chaos [Электронный ресурс] // Mail online. Режим доступа: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-5166433/Airports-plunged-snow-meltdown.html> (дата обращения 29.08.2018); Haag M. Passengers Face Hourslong Delays as Snowstorm Snarls Heathrow Airport [Электронный ресурс] // The New York Times. Режим доступа: <https://www.nytimes.com/2017/12/10/travel/heathrow-airport-snow-delays.html> (дата обращения: 28.08.2018); Snow disrupts schools, travel in UK, Netherlands [Электронный ресурс] // Reuters. Режим доступа: <https://www.reuters.com/article/us-netherlands-britain-weather/snow-disrupts-schools-travel-in-uk-netherlands-idUSKBN1E51R1> (дата обращения: 28.08.2018).

² Проект документа Евроконтроля по A-CDM [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eurocontrol.int/articles/airport-collaborative-decision-making-cdm> (дата обращения: 28.08.2018).

³ Информационный бюллетень FlightStats [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.flightstats.com/company/monthly-performance-reports/airports/> (дата обращения: 02.09.2018).

Специалисты аэропорта Шереметьево совместно с ПАО «Аэрофлот» и ФГУП ГК ОрВД проанализировали практику работы зарубежных аэропортов по применению процедур минимизации неблагоприятных последствий.

Для этих целей разработаны и внедрены инструменты эффективного управления аэропортом:

- элементы концепции системы совместного принятия решений (A-CDM);
- методики взаимодействия аэропорта, операторов, эксплуатантов ВС и ГК ОрВД по управлению действиями на аэродроме;
- алгоритмы действий персонала при работе аэродрома Шереметьево в условиях сильного бокового ветра, грозы над аэродромом, корректировки сроков закрытия взлетно-посадочных полос с искусственным покрытием (ИВПП) на очистку и снижения пропускной способности аэродрома.

Внедрение элемента A-CDM «Неблагоприятные условия» в аэропорту Шереметьево позволяет контролировать снижение пропускной способности и облегчает процесс быстрого ее восстановления. Внедрение данного элемента гарантирует, что противообледенительная обработка на месте стоянки становится частью общего процесса наземного обслуживания воздушного судна. Время, необходимое для проведения противообледенительной обработки, учитывается в расчетах различных плановых временных показателей.

Данные по повышению показателей прогнозируемости после внедрения элемента A-CDM «Неблагоприятные условия» в аэропорту Шереметьево следующие:

- прогнозируемость времени посадки ВС – 98,7 % (повышение на 12,9 %);
- прогнозируемость времени занятости места стоянки (МС) – 93,1 % (повышение на 17,1 %);
- прогнозируемость времени руления ВС – 92,6 % (повышение на 2,5 %);
- прогнозируемость времени отправления ВС – 97,2 % (повышение на 2,1 %);
- пунктуальность отправления ВС по расписанию – 83,55 % (повышение на 0,3 %);
- пунктуальность отправления ВС по расчетному времени – 94 % (повышение на 1,2 %);
- количество задержанных рейсов более 15 минут – 16,45 % (сокращение на 22,6 %);
- среднее время руления от посадки до прибытия ВС – 7,5 мин (сокращение на 7 %);
- среднее время руления от отправления до взлета ВС – 11,9 мин (сокращение на 3 %).

Разработанное совместно с ПАО «Аэрофлот» и специалистами Шереметьевского центра ОВД «Соглашение об утверждении сценариев расчета взлетно-посадочных операций для обеспечения максимального значения пропускной способности комплекса ИВПП» не связано с определенным видом неблагоприятных метеоусловий, а привязано к уровню изменения пропускной способности, что повышает гибкость системы планирования.

Оперативное управление производственной деятельностью в аэропорту Шереметьево осуществляется Центром управления аэропортом (ЦУА). ЦУА включает в себя представителей 15 ключевых подразделений аэропорта, а также сторонних операторов, авиакомпаний и госорганов. ЦУА, созданный с учетом лучших европейских стандартов по управлению производственной деятельностью, является уникальным объектом для аэропортов России.

При работе в штатных и нештатных ситуациях ЦУА отвечает за:

- организацию и координацию работы всех участников (аэропорта, авиакомпаний, государственных органов и операторов);
- стратегическое и тактическое планирование деятельности аэропорта;
- выявление и прогнозирование факторов, способных привести к сбою в работе;
- оперативное информирование всех участников;
- принятие стратегических решений в сбойных ситуациях;

- проведение тренировок по отработке действий персонала, партнеров и государственных органов в сбойных и чрезвычайных ситуациях;
- подготовку к работе и управление деятельностью.

Оперативным ответственным за координацию деятельности обслуживающих операторов и производственных процессов является сменный начальник аэропорта ЦУА, досконально знающий процедуры при работе в неблагоприятных условиях и взаимодействующий с лицами, заинтересованными в данном вопросе и принимающими необходимые решения.

Сменный начальник аэропорта и применяемые процедуры элемента А-СДМ «Неблагоприятные условия» играют центральную роль в выполнении обязательств по информированию Центра ОВД о снижении пропускной способности аэропорта или о повышении вероятности дальнейшего ее снижения, что может оказать положительное влияние на работу всей сети организации потоков воздушного движения (ОПВД).

Даже если для неблагоприятных условий были назначены стандартные процедуры, часто возникает необходимость в их утверждении, особенно если фактическая ситуация немного отличается от той, которая была спрогнозирована. Органом оперативных действий и решений в сбойной ситуации в аэропорту Шереметьево является оперативный штаб. Работа оперативного штаба с использованием имеющихся инструментариев, методик и технологий позволяет в кратчайшие сроки устранить развитие сбойной ситуации и обеспечить качественное обслуживание пассажиров.

С целью поддержания готовности персонала структурных подразделений аэропорта, операторов, авиакомпаний и органов организации воздушного движения (ОВД) в аэропорту Шереметьево еженедельно проводятся специальные тренировки по действиям в нештатных и сбойных ситуациях:

- 17 видов специальных тренировок (отработка нештатных и сбойных ситуаций);
- 7 видов специальных тренировок (отработка аварийного плана).

Действия участников тренировок регламентированы:

- 12 алгоритмами;
- 93 контрольными листами.

Качественная подготовка персонала является одним из ключевых моментов эффективной работы в сбойных ситуациях, поэтому тренировки проводятся по утвержденным сценариям с привлечением рядовых работников и руководителей организаций.

МЕРОПРИЯТИЯ В АЭРОПОРТУ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Для обеспечения соответствующей пропускной способности каждый аэропорт имеет набор технических ресурсов, доступность которых контролируется. Если уровень доступности ресурсов изменяется, то оценивается влияние такого изменения на пропускную способность аэродрома. Данная информация в аэропорту Шереметьево незамедлительно распространяется среди всех партнеров А-СДМ.

При прогнозировании неблагоприятных погодных условий на предтактическом этапе планирования полетов сменный начальник аэропорта организует мероприятия по планированию деятельности аэропорта в период прогнозируемых сложных метеорологических условий.

Для этих целей обеспечивается:

- сбор и сопоставление важной информации о сложных метеоусловиях (прогноз от ФГБУ ГАМЦ ТАФ/SPECI (рис. 1), табель выделения ресурсов и резервы), влияющей на снижение пропускной способности аэропорта;
- принятие совместных решений на более высоком уровне, касающихся деятельности аэропорта в период неблагоприятных условий;
- определение ограничивающих факторов, оказывающих максимальное влияние на пропускную способность аэропорта;

- оповещение производственных подразделений и обслуживающих операторов о событии;
- оповещение эксплуатантов ВС и операторов о прогнозируемых условиях и мероприятиях в аэропорту средствами электронной почты и телеграфных каналов связи;
- проведение анализа суточного плана полетов и прогнозируемой пропускной способности аэропорта;
- определение значения пропускной способности комплекса ИВПП по согласованным сценариям с ФГУП ГК ОрВД;
- опубликование НОТАМ о сложных метеорологических условиях и снижении пропускной способности аэродрома;
- корректировка суточного плана полетов совместно с эксплуатантами ВС в соответствии с пропускной способностью аэродрома.

На тактическом этапе планирования полетов сменный начальник аэропорта организует мероприятия по планированию и координированию деятельности в период сложных метеорологических условий.

Для этих целей обеспечивается:

- проведение постоянного контроля над влиянием фактических погодных условий на пропускную способность аэродрома (рис. 1);
- оценка и объявление фактической пропускной способности аэропорта, а при необходимости ее корректировка;
- проведение телефонных переговоров с эксплуатантами ВС, обслуживающими операторами и производственными подразделениями аэропорта;
- постановка задач, определение резервов ресурсов, доведение планируемых мероприятий до всех партнеров;
- координирование запуска по мере необходимости специальных процедур и решений;
- контроль над партнерами по применению согласованных в аэропорту процедур;
- оперативная корректировка суточного плана полетов;
- предоставление соответствующим сторонам информации о текущей ситуации в аэропорту;
- проведение анализа и оценка выполнения процедур и действий партнеров;
- определение времени восстановления работоспособности аэропорта после неблагоприятных условий по согласованным ключевым показателям эффективности.

ПОДГОТОВКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ К ВЫЛЕТУ

Основные процессы A-CDM в аэропорту начинаются с момента поступления данных о расчетном времени посадки ВС. При поступлении точных данных о расчетном времени посадки ВС в IT-платформу A-CDM, информация обрабатывается и распространяется всем партнерам для планирования своих операций и предоставления информации по модифицированным временам.

От расчетного времени посадки ВС, с учетом индивидуализированного времени руления, вычисляется время прибытия ВС на стоянку. Определяется технологическое время наземного обслуживания ВС и плановое время отправления ВС с места стоянки.

С учетом индивидуализированного времени руления ВС на вылет и пропускной способности комплекса ИВПП от планового времени отправления ВС с места стоянки вычисляется расчетное время взлета, которое распространяется всем партнерам для планирования своих операций.

Интерфейс суточного плана полетов в центральной аэропортовой базе данных (ЦАБД) «Синхрон» для прилетающих рейсов предоставляет партнерам по A-CDM модифицированную информацию о статусе прилетающих рейсов, местоположении, расчетном и фактическом вре-

мени посадки и прибытия на МС. Расчетное время посадки постоянно обновляется от момента входа в Московскую зону до окончательного захода на посадку. Эти данные позволяют операторам более точно спрогнозировать распределение ресурсов для обслуживания прилетающего рейса и определить скорректированное время отправления ВС с места стоянки, если фактическое время прибытия ВС отличается от времени по расписанию. Эксплуатанты ВС могут заблаговременно скорректировать ротацию ВС и спрогнозировать время отправления ВС при ожидании групп трансферных пассажиров.

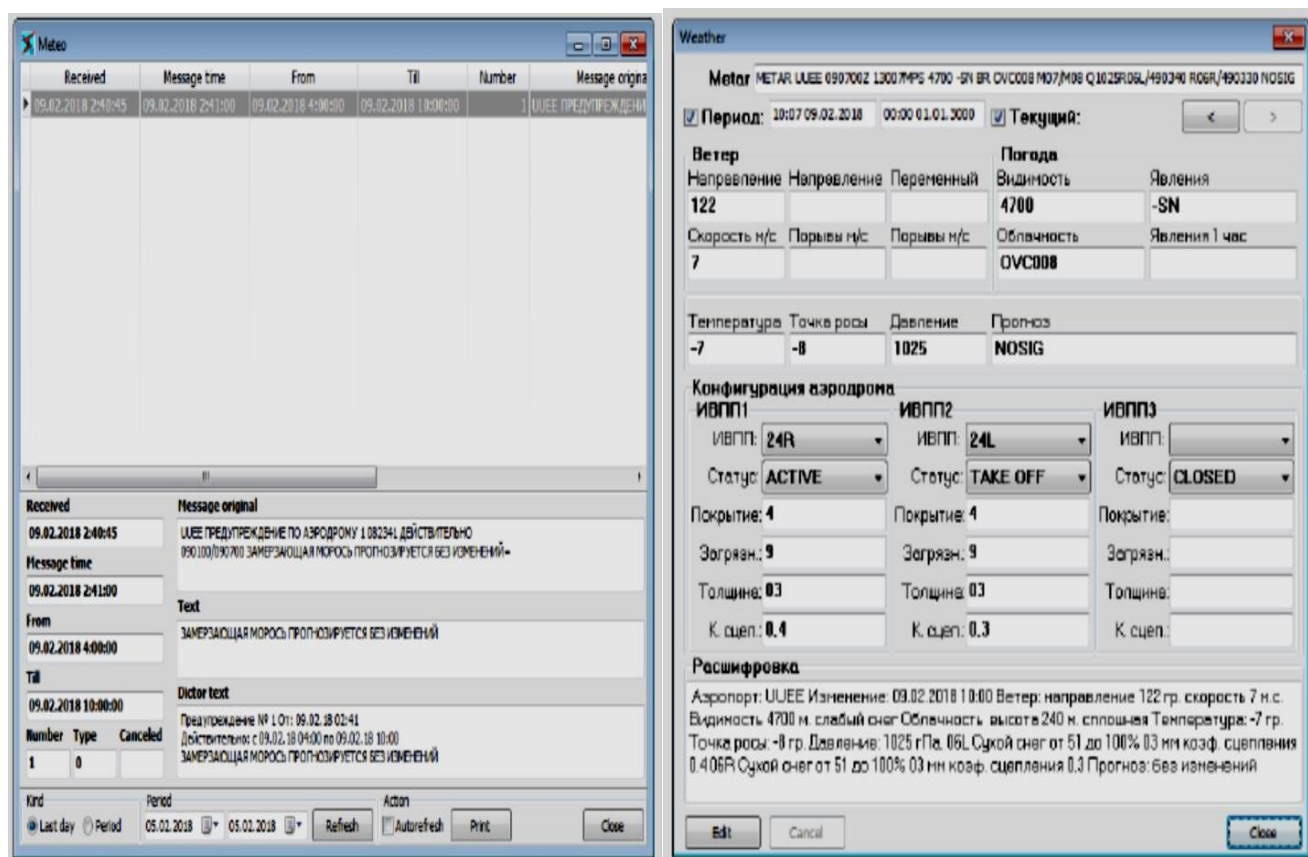


Рис. 1. Интерфейсы «Синхрон». Сводки METAR/SPECI
Fig. 1. Interfaces "Synchron". Reports METAR/SPECI

Если расчетное время прибытия ВС раньше времени по расписанию, то в строке прилетного рейса отображается информация о занятости места стоянки, что позволяет диспетчеру, ответственному за распределение МС, своевременно назначить новое место стоянки непунктуально прибывающему рейсу и проинформировать всех партнеров А-СДМ.

Интерфейс суточного плана полетов в ЦАБД «Синхрон» для вылетающих рейсов предоставляет партнерам по А-СДМ модифицированную информацию о статусе рейсов: время начала наземного обслуживания ВС, готовность ВС к посадке пассажиров и окончание посадки, разрешение АТС Clearance, целевое и фактическое время запроса, подтверждения запуска двигателей, целевое и фактическое время руления, отправления и взлета, плановое и фактическое время противообледенительной обработки ВС и т. п.

На основании данных по прилетающему рейсу вычисляется минимальное время разворота ВС и определяется целевое время отправления и запуска двигателей, которое доводится до заинтересованных партнеров для дальнейшего планирования операций в зоне своей ответственности.

Данные о фактической пропускной способности комплекса ИВПП при публикации НОТАМ, ввода интервалов, ограничивающих вылет, ограничений по боковой составляющей ветра по типам ВС и/или снижении пропускной способности при закрытии одной из полос на очистку, оперативно предоставляются партнерам по А-СДМ через интерфейс Day Runway в ЦАБД «Синхрон». Расчет текущей пропускной способности комплекса ИВПП производится автоматически при вводе данных, ограничивающих пропускную способность ВПП, методом дифференцированной оценки «скользящего часа» с учетом безопасных временных интервалов по турбулентности спутного следа.

Дополнительно через интерфейс Day Runway распространяется информация по сводке METAR (бегущая строка), о статусе рейсов на прилет и вылет, приоритетах авиакомпаний по очередности вылета рейсов.

ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Противообледенительная обработка оказывает существенное влияние на пропускную способность аэропорта Шереметьево и делает ее важным элементом при работе в неблагоприятных условиях.

Чтобы сформировать эффективную последовательность действий в случае необходимости проведения противообледенительной обработки, партнерам выдается следующая информация:

- планируемое (целевое) время начала движения ВС;
- планируемое (целевое) время получения разрешения к запуску двигателей;
- расчетное/ожидаемое/планируемое (целевое) время взлета;
- место проведения противообледенительной обработки ВС (на месте стоянки или удаленно);
- тип воздушного судна.

Для учета времени, затрачиваемого на противообледенительную обработку, определены дополнительные важные временные параметры:

- назначенное/расчетное/фактическое время готовности ВС к противообледенительной обработке;
- назначенное/расчетное/фактическое время начала противообледенительной обработки ВС;
- назначенное/расчетное/фактическое время окончания противообледенительной обработки ВС;
- расчетное/фактическое время продолжительности противообледенительной обработки ВС.

Противообледенительная обработка ВС в аэропорту Шереметьево может проводиться на местах стоянки ВС или на удаленных специализированных площадках. В штатных условиях обработка ВС производится в основном на удаленных специализированных площадках. Но при необходимости массового облива ВС и в целях исключения создания очередей на маршрутах руления обработка ВС производится и на местах стоянки.

Противообледенительная обработка на месте стоянки в аэропорту Шереметьево – это часть процесса обслуживания ВС на стоянке, за данный процесс несет ответственность оператор, осуществляющий противообледенительную обработку и наземное обслуживание. Продолжительность противообледенительной обработки учитывается в качестве параметра при расчете планового времени отправления ВС.

По каждому рейсу оператор, осуществляющий наземное обслуживание ВС, предоставляет оператору, осуществляющему противообледенительную обработку ВС, предполагаемые временные значения, характеризующие момент, когда воздушное судно будет готово к прове-

дению противообледенительных мероприятий. Оператор, осуществляющий наземное обслуживание ВС, определяет последовательность проведения обработки для всех рейсов на основе предоставленных расчетных времен готовности ВС. Затем для каждого рейса оператор, осуществляющий противообледенительную обработку, определяет приблизительное время начала и продолжительности обработки ВС. Такая последовательность обработки обновляется в режиме реального времени, принимая во внимание текущий статус рейса.

Для конкретного рейса оператор, осуществляющий наземное обслуживание, определяет плановое время начала движения ВС. Центр управления аэропортом определяет последовательность отправки рейсов для противообледенительной обработки. В результате для каждого рейса определена величина планового времени разрешения запуска и расчетное значение времени начала противообледенительной обработки, эти оба расчетных параметра тесно связаны друг с другом, а также с расчетным временем выруливания с места стоянки.

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПАРТНЕРАМИ И ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЦЕДУР, СВЯЗАННЫХ С НЕБЛАГОПРИЯТНЫМИ МЕТЕОУСЛОВИЯМИ

Для проведения анализа и оценки числа задержанных рейсов в аэропорту Шереметьево применяются следующие ключевые показатели эффективности.

1. Определение эффективности организации работы:
 - определение периода воздействия неблагоприятных условий: «время окончания действия неблагоприятных условий» – «время начала действия неблагоприятных условий»;
 - определение периода сниженной заявленной пропускной способности аэропорта (ПСА): «время окончания сниженной заявленной ПСА» – «время начала сниженной ПСА»;
 - сравнение длительности: «периода сниженной заявленной ПСА» с длительностью «периода действия неблагоприятных условий»;
 - определение времени возвращения к нормальной работе: «период нормальной заявленной ПСА» – «время окончания действия неблагоприятных условий»;
 - сравнение длительности: «периода возвращения к нормальной работе» с длительностью «периода действия неблагоприятных условий».
2. Определение числа рейсов, которые пострадали:
 - определение числа взлетно-посадочных операций (ВПО), которые не были выполнены в период действия неблагоприятных условий (включая отмены);
 - определение степени пунктуальности (прилет/вылет) в период действия неблагоприятных условий;
 - определение средней продолжительности задержки рейса (в минутах) в период действия неблагоприятных условий: «сумма задержек в минутах/количество задержанных рейсов».
3. Определение степени выполнения операций по наземному обслуживанию:
 - определение числа операций, которые не были выполнены в период действия неблагоприятных условий (включая отмены);
 - определение средней продолжительности задержки выполнения операций в период действия неблагоприятных условий.

За счет повышения точности прогнозирования времени выполнения операций в аэропорту повышается предсказуемость и точность данных для центра ОВД и всех заинтересованных сторон, что способствует сокращению задержек и затрачиваемого времени на планирование ресурсов. Система совместного принятия решений для аэропорта объединяет партнеров, работающих на территории аэродрома и принимающих решения, основываясь на более точной и бо-

лее качественной информации, где каждый бит информации имеет одинаковое значение для каждого участника.

Реализация технологий CDM позволяет каждому партнеру, участвующему в применении данной системы, оптимизировать свои решения, принимая во внимание предпочтения и ограничения, а также реальную и прогнозируемую ситуацию.

На сегодняшний день при обслуживании воздушного движения применяется принцип приоритетности для прилетающего потока ВС. В штатных ситуациях данный принцип не оказывает критического влияния на работоспособность аэропорта при условии соответствующей пунктуальности и сбалансированного расписания полетов. При наступлении сложных метеоусловий центром ОВД вводятся ограничения для вылетающих рейсов. ВС начинают скапливаться на маршрутах руления, свободные и резервные места стоянок заполняются, и возникают *«инфраструктурные ограничения аэропорта»*.

В зарубежных аэропортах давно применяются технологии управления потоками воздушного движения (AMAN/DMAN). Под управлением понимается организация прилетающего и вылетающего потока ВС как непрерывность цикла для снятия критических нагрузок на инфраструктуру аэропорта и воздушного пространства за счет формирования конфигураций операций «посадка-взлет». В 1990-х годах это называли «схемой ипподром».

Технологии AMAN/DMAN позволяют регулировать (кратковременно задерживать) выполнение операций по взлету и посадке за счет назначения целевых времен (target landing time (TLDT) и calculated take off time (CTOT)/target take off time (TTOT)). За счет выполнения процедур слотирования, операций «взлет-посадка» и достигается непрерывность цикла, исключающего искусственное создание перегрузок инфраструктуры аэропорта и воздушного пространства в районе аэродрома.

Анализируя объемы перевозок и прогнозируя увеличение показателей в соответствии с тенденцией роста перевозок, аэропорт Шереметьево комплексно подходит к развитию инфраструктуры, полностью обеспечивающей спрос на авиаперевозки.

Развитие элементов инфраструктуры следующее:

2018 г.:

- терминал В с пропускной способностью 20 млн пассажиров в год;
- межтерминальный переход – пропускная способность 11,5 млн пассажиров в год;
- топливозаправочный комплекс – проектная мощность до 1 млн тонн в год;
- автоматизированный грузовой комплекс с пропускной способностью 380 тыс. тонн в год;
- ИВП-3 – до 90 взлетно-посадочных операций на аэродроме (комплекс из трех ВПП);

2019 г.: терминал С1 – пропускная способность до 20 млн пассажиров в год;

2024 г.: терминал С2 – пропускная способность до 10 млн пассажиров в год.

В целях оптимизации процессов обмена информацией о статусах рейсов и полетах с марта по июнь 2017 года специалистами АО «МАШ» и ООО «НИТА» проделана комплексная работа по отладке и тестированию сопряжения IT-платформы А-CDM (ЦАБД «Синхрон») и КСА УВД «Альфа» из состава РК «Москва-Резерв» в части сопряжения и обмена информацией о статусе рейсов. Внедренные мероприятия базируются на документах EUROCONTROL Specification for ATS Data Exchange Presentation (ADEXP) Edition 3.1, ED-145 и обеспечивают техническую возможность реализации процедур AMAN/DMAN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При прогнозировании неблагоприятных метеоусловий необходимо проводить совместный с органами ОрВД/ОВД комплексный анализ прогнозируемой интенсивности движения ВС на аэродроме и в воздушном пространстве в рамках авиационного узла, а не только

одного аэропорта. По итогам анализа необходимо разрабатывать и в дальнейшем применять координирующие, а не ограничивающие меры, которые должны быть понятны всем участникам процесса.

Внедренные процедуры и действия партнеров должны выполняться, анализироваться и оцениваться после каждого случая наступления неблагоприятных условий. Цель мероприятий состоит в оценке эффективности, а именно: как долго удавалось поддерживать плановый уровень пропускной способности аэропорта и как близко было значение времени «возврата к нормальной пропускной способности».

С целью предотвращения возникновения сбойной ситуации или скорейшей ее локализации в период сложных метеоусловий в аэропорту Шереметьево внедрены инновационные технологии и IT-решения, методики и сценарии управления производственной деятельностью по всем видам сбойных ситуаций [3–8].

Применяемые IT-решения обеспечивают:

- единое информационное поле для работы всех операторов в аэропорту;
- мониторинг работы аэропорта более чем по 900 параметрам при работе в штатных и сбойных ситуациях;
- оперативное информирование всех партнеров с принятием необходимых производственных решений;
- формирование единой базы данных по выявленным и отремонтированным участкам аэродромных покрытий;
- обеспечение контроля текущего состояния искусственных покрытий аэродрома;
- прогнозирование и планирование объемов средств и ресурсов, требуемых для выполнения работ по текущему ремонту аэродромных покрытий.

Качественная подготовка персонала является одним из ключевых моментов эффективной работы аэропорта. Анализ, внедрение рекомендаций по результатам работы в сложных метеоусловиях, обучение персонала обеспечивают постоянное совершенствование процессов управления производственной деятельностью в условиях сбойной ситуации.

Работа оперативного штаба с использованием имеющегося инструментария, методик и технологий позволяет в кратчайшие сроки устранить развитие сбойной ситуации и обеспечить качественное обслуживание пассажиров.

Система совместного принятия решений в аэропорту (A-CDM) – это инструмент для совместного управления процессами в соответствии с согласованными процедурами для повышения эффективности работы всех партнеров в любых ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с. С. 351–414.
2. **Никулин А.О., Попов А.А.** Внедрение процедур A-CDM в аэропорту Шереметьево // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.
3. **Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.** Метод снижения конфликтности на стандартных маршрутах вылета и прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 117–123.
4. **Пятко С.Г.** Повышение эффективности управления воздушным движением в Московской зоне ЕС ОрВД [Электронный ресурс] // Aviation explorer. Режим доступа: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (дата обращения: 22.12.2017).
5. **Людмир А.В., Орлов В.С.** Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве // Прикладная информатика. 2014. № 5(53). С. 89–97.

6. Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х. Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 94–114.
7. Ozlem Sahin Meric. Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. № 3. С. 449–452.
8. Paninski L. Design of experiments via information theory / ed. S. Thrun, L.K. Saul, B. Schölkopf. Advances in Neural Information Processing Systems 16. MIT Press, 2004. Pp. 1319–1326.
9. Белинский И.А., Смородов Ю.А., Соколов В.С. Зимнее содержание аэродромов. М.: Транспорт, 1982. 158 с.
10. Часовников В.Г. Исследование глиссирования колес самолетов на мокрых аэродромных покрытиях: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1972.
11. Gerthoffert J. Modelling of aircraft braking coefficient from IMAG friction measurements / C. Grosjean, V. Cerezo, Minh-Tan. Do // Airports in Urban Networks. 2014. Paris.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нечаев Евгений Евгеньевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, eenetchaev@mail.ru.

Никулин Андрей Олегович, первый заместитель генерального директора международного аэропорта Шереметьево по производству, nao@svo.aero.

THE ANALYTICAL TREATMENT OF THE SYSTEM "SYNCHRON" AT SHEREMETYEVO AIRPORT IN ADVERSE WEATHER CONDITIONS

Evgeniy E. Nechaev¹, Andrey O. Nikulin²

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

²*Sheremetyevo international airport, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 16-08-00070

Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) is a collaborative process management tool in accordance with agreed procedures to improve the performance of all partners in all situations. The A-CDM system for the airport is a part in the control process cycle of arriving and departing aircraft flows, ground handling operation and management along the routes of the flight. The introduction of the A-CDM element "Adverse Conditions" at Sheremetyevo airport makes it possible to control the reduction of the airport capacity and facilitates the process of its rapid recovery. Data on the increase in predictability after the introduction of the element A-CDM "Adverse Conditions" at Sheremetyevo airport are: predictability time of the landing aircraft is – 98.7% (increased by 12.9%); predictability time of employment parking areas (PA) is – 93.1% (increased by 17.1%); predictability time of the taxiing aircraft is – 92.6% (increase by 2.5%); predictability of the departure time of the aircraft – 97.2% (increased by 2.1%); punctuality of scheduled the aircraft departure – 83.55% (increase by 0.3%); punctuality of the departure aircraft at the estimated time – 94% (increased by 1.2%); number of delayed flights more than 15 minutes – 16.45% (decrease by 22.6%); average taxiing time from planting to the arrival – 7.5 minutes (a reduction of 7%); average taxiing time from the departure to take-off aircraft – 11.9 min (decrease by 3%). "The agreement on approval of scenarios for calculating take-off and landing operations to ensure the maximum capacity of the runway complex" was developed jointly PJSC "Aeroflot" and the specialists of Sheremetyevo ATC center, is tied to the level of capacity change, which increases the flexibility of the planning system.

Key words: Airport Collaborative Decision Making (A-CDM), adverse weather conditions, an airport.

REFERENCES

1. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozdušnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radiotekhnika, 432 p., pp. 351–414. (in Russian)
2. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Vnedrenie protsedur A-CDM v aeroportu Sheremetevo* [Implementation of A-CDM procedures at Sheremetyevo airport]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 221, pp. 68–80. (in Russian)
3. **Malygin, V.B. and Nechaev, E.E.** (2014). *Metod snizheniya konfliktnosti na standartnikh marshrutakh vyleta i pribitiya* [Method of conflict resolution on standard departure and arrival routes]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 117–123. (in Russian)
4. **Pyatko, S.G.** (2017). *Povishenie effektivnosti upravleniya vozdušnim dvizheniem v Moskovskoy zone ES OrVD* [Improving the efficiency of air traffic management in Moscow zone of the ATM]. Aviation explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/4/2017/12/22/2701> (accessed 22.12.2017). (in Russian)
5. **Lyudomir, A.V. and Orlov, V.S.** (2014). *Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskoy vozdušnoy obstanovki v upravlyaemom vozdušnom prostranstve* [Simulation modeling of dynamic air conditions in controlled airspace]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], vol. 5, no. 53, pp. 89–97. (in Russian)
6. **Zolotukhin, V.V., Isaev, V.K. and Davidson, B.Kh.** (2009). *Nekotorye aktualnye zadachi upravleniya vozdušnym dvizheniem* [Some actual problems of air traffic control]. Proceedings of MIPT, vol. 1, no. 3. pp. 94–114. (in Russian)
7. **Ozlem, Sahin Meric** (2015). *Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency*. Journal of Power and Energy Engineering, no. 3, pp. 449–452.
8. **Paninski, L.** (2004). *Design of experiments via information theory*. Ed. S. Thrun, L.K. Saul and B. Schölkopf. Advances in Neural Information Processing Systems 16, pp. 1319–1326. MIT Press.
9. **Belinskiy, I.A., Smorodov, Yu.A. and Sokolov, V.S.** (1982). *Zimnee soderzhanie aerodromov* [Winter maintenance of airfields]. Moscow: Transport, 158 p. (in Russian)
10. **Chasovnikov, V.G.** (1972). *Issledovanie glissirovaniya koles samoletov na mokryikh aerodromnykh pokryitiyakh: dis. ... kand. tehn. nauk* [Research glissirovaniya wheels of planes on wet air field coverings: the dissertation of a Cand. Tech. Sci.]. Leningrad. (in Russian)
11. **Gerthoffert, J., Grosjean, C., Cerezo, V. and Do, Minh-Tan.** (2014). *Modelling of aircraft braking coefficient from IMAG friction measurements*. Airports in Urban Networks. Paris.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy E. Nechaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, eenetchaev@mail.ru.

Andrey O. Nikulin, First Deputy General Director in Production of Sheremetyevo International Airport, nao@svo.aero.

Поступила в редакцию
Принята в печать

09.02.2018
20.11.2018

Received
Accepted for publication

09.02.2018
20.11.2018

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-43-53

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ НЕСУЩИХ ВИНТОВ НА КПД НА РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЛОПАСТНОЙ ВИХРЕВОЙ МОДЕЛИ

Ю.М. ИГНАТКИН¹, П.В. МАКЕЕВ¹, А.И. ШОМОВ¹

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

Эффективность работы несущего винта (НВ) вертолета на режиме висения очень важна, поскольку этот режим в значительной степени определяет летно-технические характеристики вертолета. Особенностью аэродинамики НВ является значительное индуктивное влияние друг на друга его лопастей, в существенной мере определяющее его аэродинамические характеристики на большинстве режимов. В статье рассмотрены вопросы влияния величины крутки лопасти и пространственной геометрической компоновки НВ на его аэродинамические характеристики на режиме висения для фиксированных значений заполнения. В качестве критерия эффективности работы винта на висении используется относительный коэффициент полезного действия (КПД). Результаты получены методом численного моделирования на основе нелинейной лопастной вихревой модели винта, разработанной на кафедре «проектирование вертолетов» МАИ. Модель позволяет учесть сложную пространственную форму свободного вихревого следа, отходящего от лопастей и определяющего их взаимовлияние. На примере четырехлопастного НВ с прямоугольными в плане лопастями проведено исследование влияния величины крутки лопастей на относительный КПД на режиме висения. Для различных значений тяги винта определены значения и диапазоны углов крутки лопасти, обеспечивающие максимальный положительный эффект прироста КПД на висении. Для фиксированного значения крутки прямоугольной в плане лопасти, величины заполнения НВ и одинаковых условий работы проведено исследование влияния различных схем и компоновок НВ на его КПД на висении. Рассмотрены одиночные НВ с различным количеством лопастей (от 2 до 6), Х-образный НВ, соосные НВ, НВ с перекрещивающимися лопастями типа «синхроптер». Получены значения прироста КПД на висении в зависимости от компоновки НВ по сравнению с базовым двухлопастным винтом. Представлен сравнительный анализ эпюр индуктивных скоростей и характера обтекания НВ схемы «синхроптер», НВ соосной схемы и эквивалентного соосному НВ одиночного НВ. Полученные результаты могут быть полезны на этапе предварительного проектирования вертикально взлетающих летательных аппаратов при выборе параметров их несущей системы.

Ключевые слова: вертолет, несущий винт, режим висения, нелинейная вихревая модель, крутка лопасти, число лопастей, соосный винт, винт «синхроптер», Х-образный винт, КПД винта.

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная геометрическая компоновка несущего винта вертолета, заключающаяся во взаимном расположении в пространстве различного количества лопастей винта, в значительной мере определяет его аэродинамические характеристики, поскольку на большинстве режимов работы винта его лопасти оказывают друг на друга значительное индуктивное влияние. При аэродинамическом проектировании несущей системы вертолета вопрос влияния компоновки винта на его аэродинамические характеристики представляет большой интерес. В частности, важнейшее значение имеет величина относительного КПД винта η_0 , определяющая в значительной степени взлетно-посадочные характеристики вертолета.

Рассмотрим наиболее распространенные варианты компоновок несущей системы вертолета: одиночный винт с различным количеством лопастей, соосный винт с различным количеством лопастей, винт с перекрещивающимися лопастями вертолета схемы «синхроптер», а так-

же получившую распространение для рулевых винтов вертолета компоновку Х-образного винта [2].

Приведенные в работе материалы дополняют информацию по данной тематике, имеющуюся в настоящее время, полученную на основании расчетов, выполненных по приближенным расчетным моделям, а также полученную из экспериментов [3–12].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Представленные результаты получены на базе нелинейной лопастной вихревой модели винта, разработанной на кафедре «проектирование вертолетов» МАИ [1].

Рассмотрим некоторые результаты, подтверждающие достоверность применяемой модели при расчете аэродинамических характеристик винтов с различной геометрической компоновкой на режимах висения.

На рис. 1 приведены результаты расчетов модельного одиночного винта, испытанного в ЦАГИ [11]. Винт имел различное количество лопастей $k_L = 2, 3, 6$ при фиксированном заполнении $\sigma = 0,113$, крутке лопасти $\Delta\varphi_\Sigma = 7,7^\circ$ и окружной скорости вращения $\omega R = 118$ м/с. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, а также с расчетами Е.С. Вожаева [11]. На рис. 2 представлены результаты расчетов модельных соосного и эквивалентного ему одиночного винтов, испытанных в ЦАГИ [12]. Оба винта имели по 6 лопастей при фиксированном заполнении $\sigma = 0,15$, крутке лопасти $\Delta\varphi_\Sigma = 6^\circ$ и окружной скорости вращения $\omega R = 53$ м/с. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [12]. На рис. 3 приведены результаты расчетов модельных соосных винтов, испытанных в ЦАГИ [12]. Винты имели по 6 лопастей при фиксированном заполнении $\sigma = 0,15$. Величины крутки трех винтов составляли, соответственно, $\Delta\varphi_\Sigma = 0; 5,3; 14^\circ$. Окружная скорость вращения лопастей винтов составляла $\omega R = 66$ м/с. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [12].

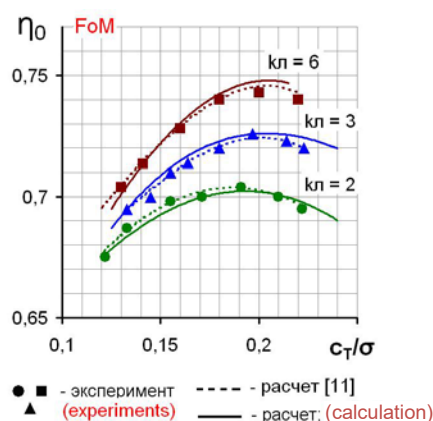


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные зависимости КПД на висении для винтов с различным количеством лопастей при $\sigma = \text{const}$

Fig. 1. Calculated and experimental dependences of the efficiency in hover (FoM) for the rotors with different number of blades with $\sigma = \text{const}$

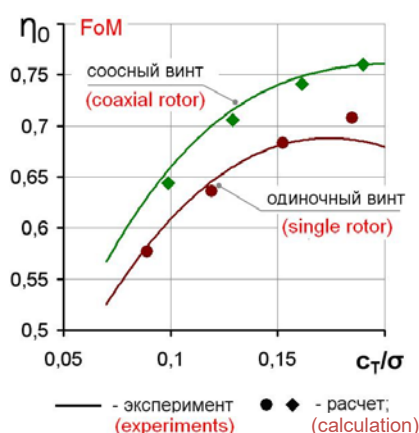


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости КПД на висении для соосного и одиночного винтов при $\sigma = \text{const}$

Fig. 2. Calculated and experimental dependences of the efficiency in hover (FoM) for coaxial and single rotors with $\sigma = \text{const}$

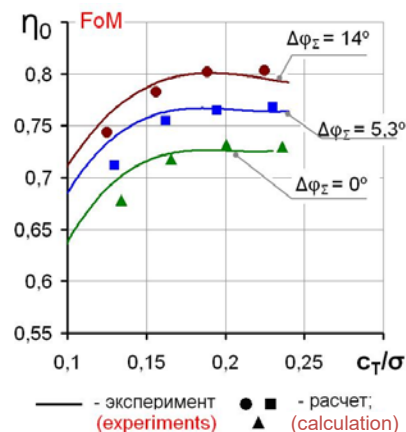


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости КПД на висении для соосных винтов с различной круткой лопастей $\Delta\varphi_\Sigma$ при $\sigma = \text{const}$

Fig. 3. Calculated and experimental dependences of the efficiency in hover (FoM) for coaxial rotors with different twist of the blades $\Delta\varphi_\Sigma$ with $\sigma = \text{const}$

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В исследовании были приняты следующие базовые параметры винтов: лопасти прямоугольной формы в плане, линейный закон крутки, радиус винта $R = 10$ м, коэффициент заполнения $\sigma = 0,08$. Профиль лопасти NACA 230-12 по всей длине. Окружная скорость вращения лопастей винта $\omega R = 220$ м/с. Лопасти винта в расчетах принимались абсолютно жесткими и не совершали махового движения относительно горизонтальных шарниров. Винты соосной схемы в расчетах балансировались по крутящему моменту при помощи дифференциального шага.

Рассмотренные варианты компоновки винта схематично представлены на рис. 4. Влияние фюзеляжа на аэродинамические характеристики вертолета не учитывалось.

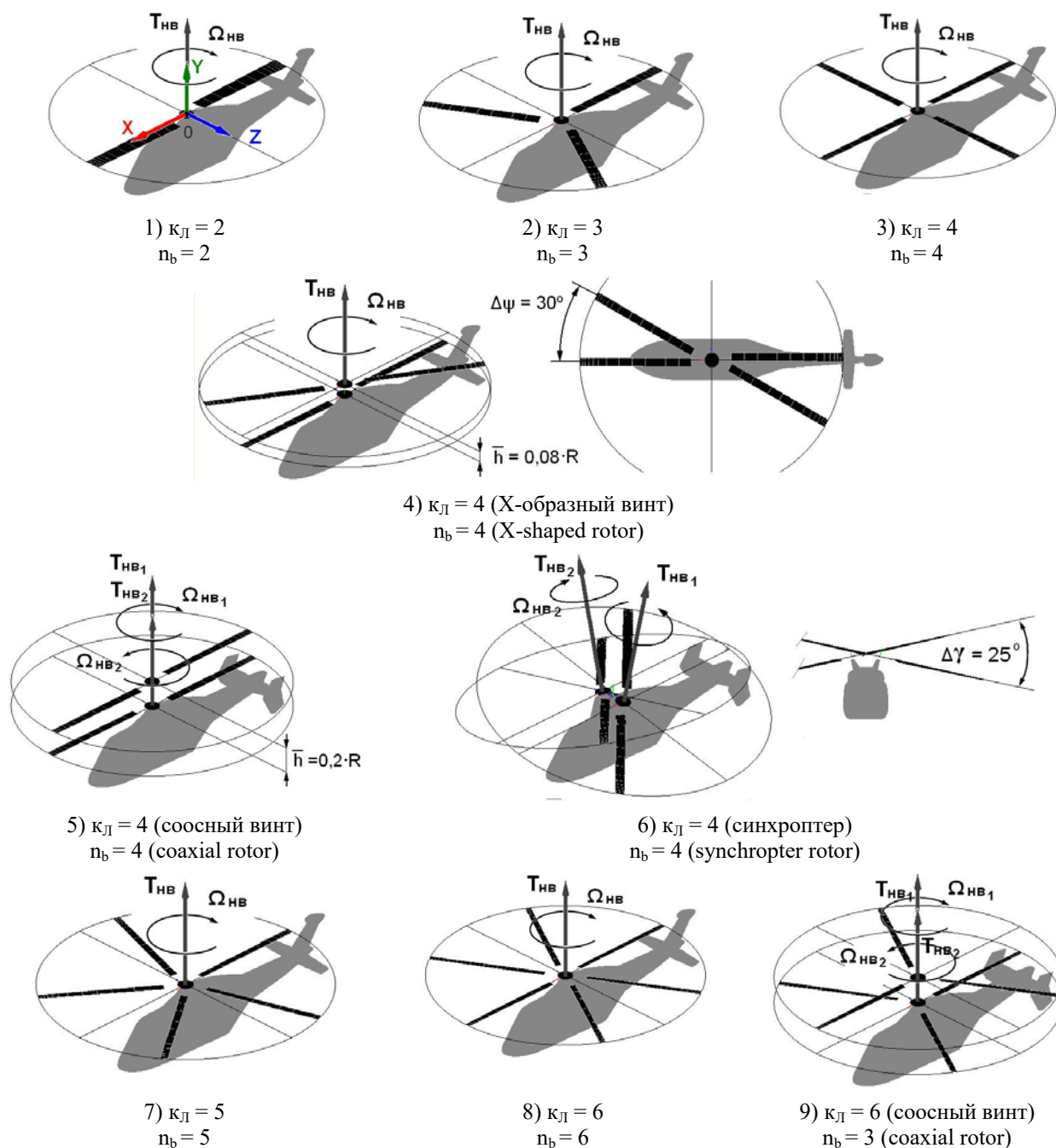


Рис. 4. Типы геометрической компоновки винта, использованные для расчетов (κ_L – количество лопастей)
Fig. 4. Types of the rotor geometry used for calculations (n_b – the number of blades)

Применение нелинейной вихревой модели позволило, в отличие от линейных моделей, построить сложную пространственную форму вихревого следа за винтом, определяющую аэродинамическую интерференцию лопастей.

Для примера форма нелинейного вихревого следа за винтом для нескольких характерных компоновок винта приведена на рис. 5, где показаны концевые вихри, отходящие от концов каждой из лопастей.

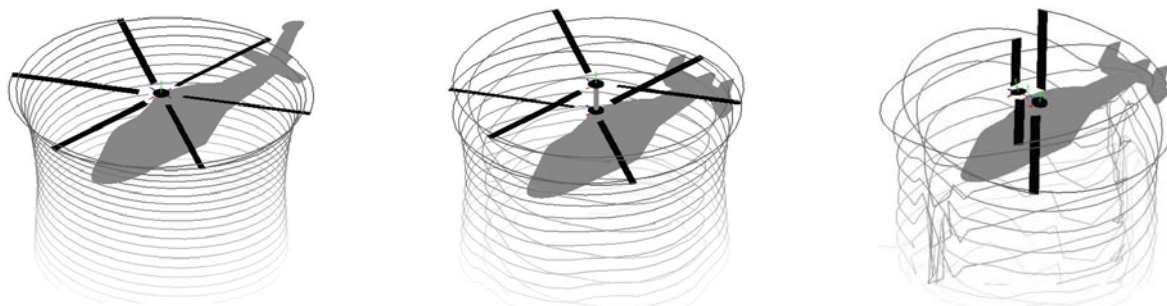


Рис. 5. Примеры расчета формы нелинейного вихревого следа для одиночного шестилопастного ($k_L = 6$), соосного ($k_L = 6$) винта и винта синхроптера ($k_L = 4$), полученные при $c_T/\sigma \approx 0,15$

Fig. 5. Calculation examples of the nonlinear vortex path for the single rotor ($n_b = 6$), coaxial rotor ($n_b = 6$) and synchropter rotor ($n_b = 4$) obtained with $c_T/\sigma \approx 0.15$

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ КРУТКИ ЛОПАСТЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ КПД НЕСУЩЕГО ВИНТА НА РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ

На рис. 6 представлены результаты расчетов для 4-лопастного винта ($k_L = 4$) с лопастями, имеющими различные значения суммарной величины линейной крутки $\Delta\varphi_\Sigma$ в диапазоне $\Delta\varphi_\Sigma = 0 \dots 26^\circ$ с шагом 2° . Результаты приведены в виде графика зависимости КПД от величины c_T/σ , где c_T – коэффициент тяги винта. Из приведенных графиков видно, что увеличение крутки дает значительный эффект прироста КПД винта, однако при больших значениях крутки ее эффективность падает. При $c_T/\sigma < 0,15$ значительное увеличение крутки дает отрицательный эффект падения КПД винта.

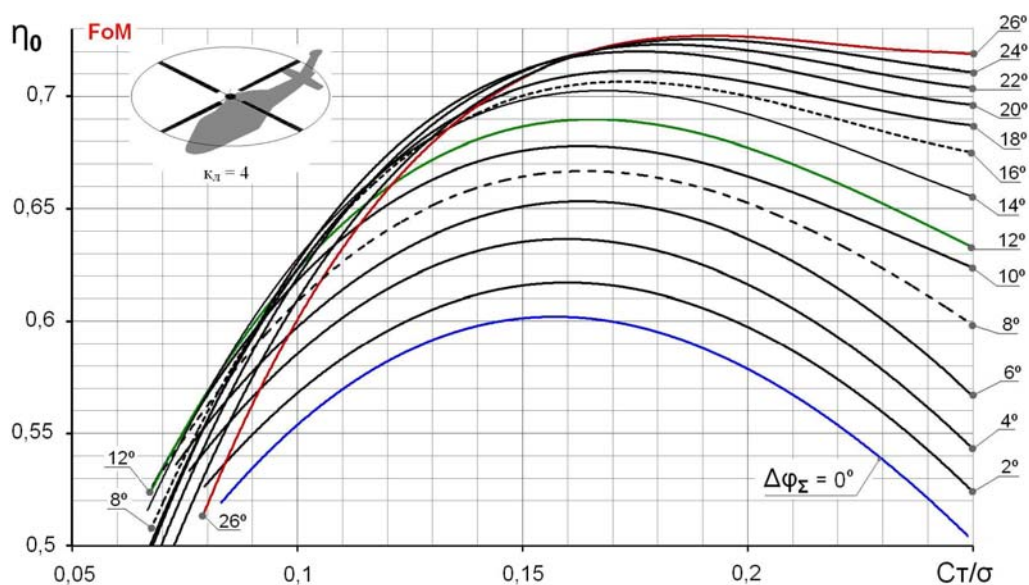


Рис. 6. Зависимости КПД НВ на висении $\eta_0 = f(c_T/\sigma)$ для круток лопасти $\Delta\varphi_\Sigma = 0 \dots 26^\circ$
Fig. 6. Dependences of the rotor efficiency in hover (FoM) for blade twist $\Delta\varphi_\Sigma = 0 \dots 26^\circ$

На рис. 7 данные с рис. 6 перестроены в более удобном для анализа виде. Здесь представлен прирост КПД в процентах относительно незакрученной лопасти для четырех фиксированных значений $c_T/\sigma = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$.

На рис. 8 приведены результаты анализа воздействия крутки лопасти на КПД винта (для $c_T/\sigma = 0,15$) на величину потребной для вращения винта мощности, определяемой величиной крутящего момента M_k . Крутящий момент, в свою очередь, зависит от величины и точки (радиуса) приложения окружной силы сопротивления Q лопасти винта. На рис. 8 для трех значений крутки $\Delta\varphi_\Sigma = 0; 12; 24^\circ$ приведены графики погонной по длине лопасти окружной силы сопротивления dQ/dr , отмечены радиусы приложения суммарной силы Q , а также ее относительная величина. Видно, что с ростом значения крутки лопасти $\Delta\varphi_\Sigma$ эпюра погонной силы dQ/dr меняет характер таким образом, что точка приложения суммарной силы Q смещается к кончику лопасти. Сама величина суммарной силы при этом также падает при $\Delta\varphi_\Sigma = 12^\circ$ на 12 %, а при $\Delta\varphi_\Sigma = 24^\circ$ на 17 % относительно незакрученной лопасти. При неизменной величине тяги это приводит к существенному росту КПД винта при увеличении крутки лопасти на режиме висения, что отражено на диаграммах на рис. 6, 7.

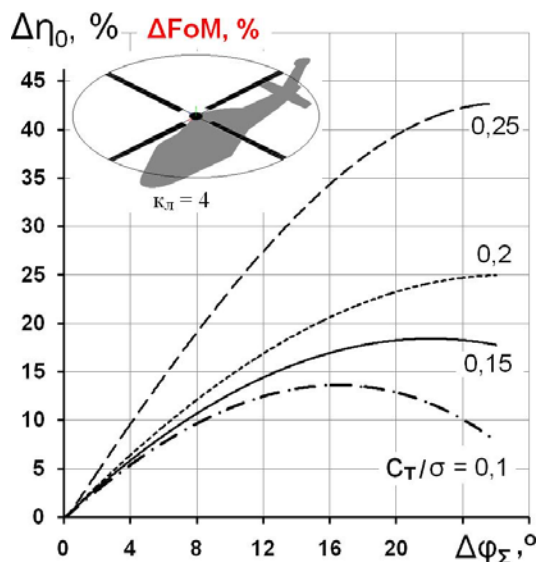


Рис. 7. Зависимости прироста КПД в процентах для величин крутки лопасти $\Delta\varphi_\Sigma = 0 \dots 26^\circ$

Fig. 7. Percentage dependences of the increase in efficiency (FoM) for the blade twist values $\Delta\varphi_\Sigma = 0 \dots 26^\circ$

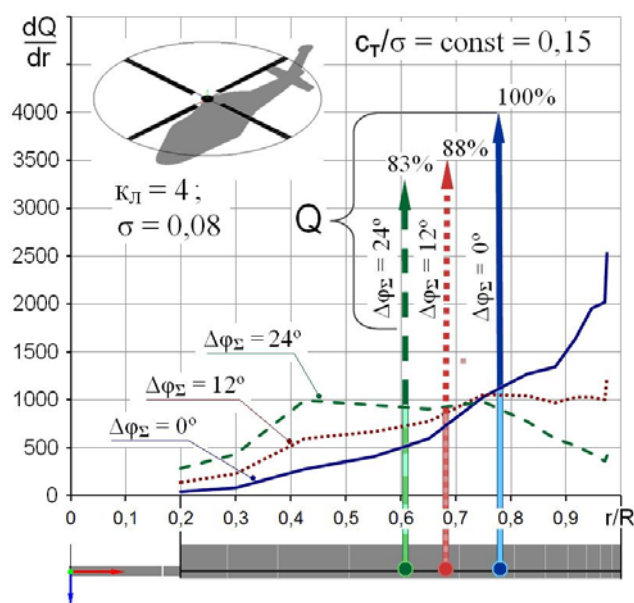


Рис. 8. Эпюры окружной силы сопротивления по радиусу лопасти $dQ/dr = f(r/R)$ и положения центра приложения суммарной силы Q на лопасти для значений крутки $\Delta\varphi_\Sigma = 0, 12, 24^\circ$ для $c_T/\sigma = 0,15$
Fig. 8. Diagrams of the encyclical resistance force along the blade radius $dQ/dr = f(r/R)$ and the position of the application center of the total force drag Q on the blade for the twist values $\Delta\varphi_\Sigma = 0, 12, 24^\circ$ for $c_T/\sigma = 0.15$

Необходимо отметить, что такое в значительной степени положительное влияние крутки на аэродинамические характеристики винта проявляется преимущественно на режиме висения. С ростом скорости полета большие значения крутки лопасти приводят к возникновению и нарастанию ряда негативных факторов, в том числе к росту переменных напряжений в силовых элементах лопастей [13]. Поэтому на существующих вертолетах крутка лопастей винтов обычно находится в пределах $\Delta\varphi_\Sigma = 5 \dots 9^\circ$ и лишь в редких случаях достигает величин $\Delta\varphi_\Sigma = 12 \dots 16^\circ$. Тем не менее большие значения крутки лопастей могут успешно применяться на сравнительно тихоходных специализированных вертолетах-кранах. Также несущие-тянущие винты с большими значениями крутки используются на конвертопланах.

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА НА ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ КПД НА РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ

На рис. 9 представлены зависимости $\eta_0 = f(c_T/\sigma)$ на режиме висения для различных пространственных геометрических компоновок (см. рис. 4). Здесь для всех рассмотренных вариантов компоновки величина крутки лопастей принята равной $\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$, что близко к крутке, применяемой на большинстве существующих вертолетов. В диапазоне $c_T/\sigma = 0,1 \dots 0,2$ на графиках, представленных на рис. 9, наблюдается существенное расслоение кривых относительного КПД. Видно, что увеличение количества лопастей, а также применение соосной схемы или схемы типа «синхроптер» приводят к существенному росту КПД винта. Так, максимальная разница между 2-лопастным винтом и соосным винтом, имеющим 6 лопастей, достигает 14 % (рис. 9).

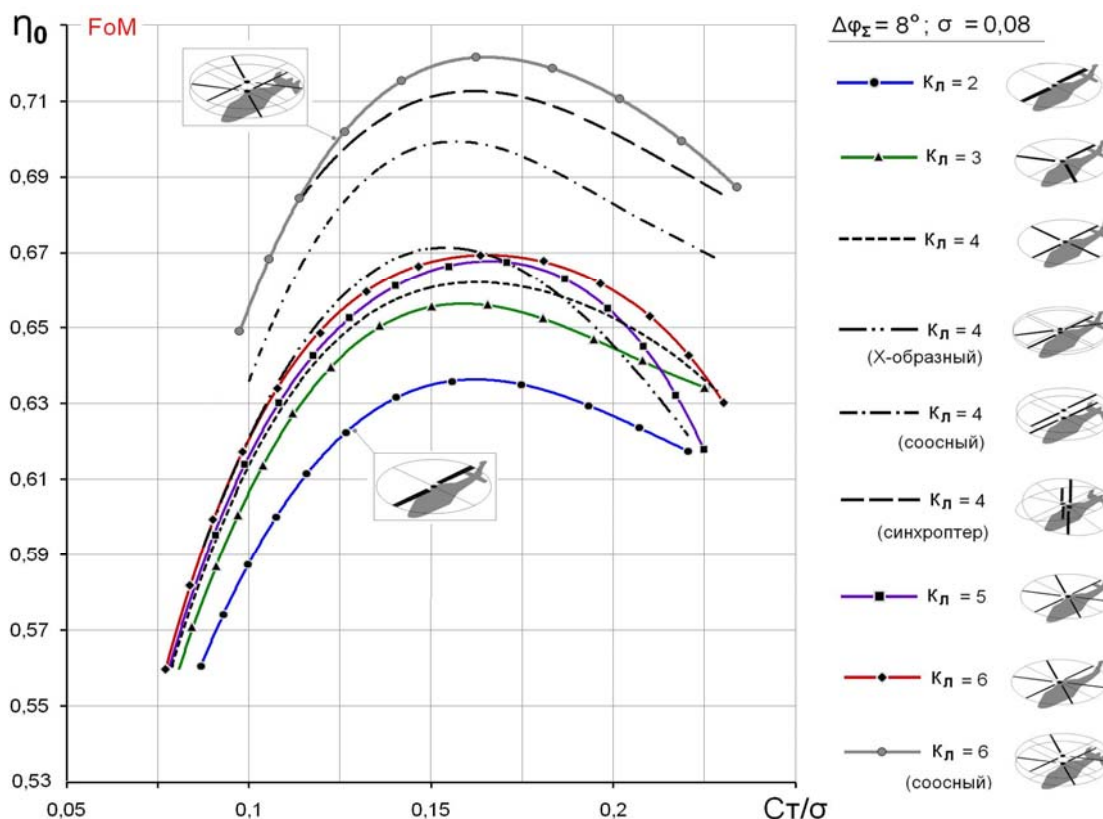


Рис. 9. Зависимости КПД винта на висении для различных вариантов геометрической компоновки винтов (см. рис. 4) при одинаковом заполнении винта, крутка лопастей $\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$

Fig. 9. Dependences of the rotor efficiency in hover (FoM) for various options of the rotor geometry (see Fig. 4) at identical rotor blade solidity and the blades twist $\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$

На рис. 10 зависимости, представленные на рис. 9, перестроены в виде диаграммы более удобной для анализа. Здесь кривые с рис. 9 рассечены по трем значениям $c_T/\sigma = 0,1; 0,15; 0,2$. Величина КПД переведена в проценты и показана в виде прироста КПД для рассмотренных схем по сравнению с базовым 2-лопастным винтом. Последовательное увеличение количества лопастей с $k_l = 2$ до $k_l = 6$ вначале дает резкое увеличение КПД. При переходе от двух к трем лопастям КПД возрастает сразу приблизительно на 3 %. В дальнейшем прирост КПД существенно замедляется, так, переход с $k_l = 3$ до $k_l = 6$ дает совокупно еще лишь приблизительно 2,5 % прироста КПД. Наибольший КПД среди рассмотренных схем (рис. 4) при прочих равных условиях имеют соосные винты и винты схемы «синхроптер» (рис. 10).

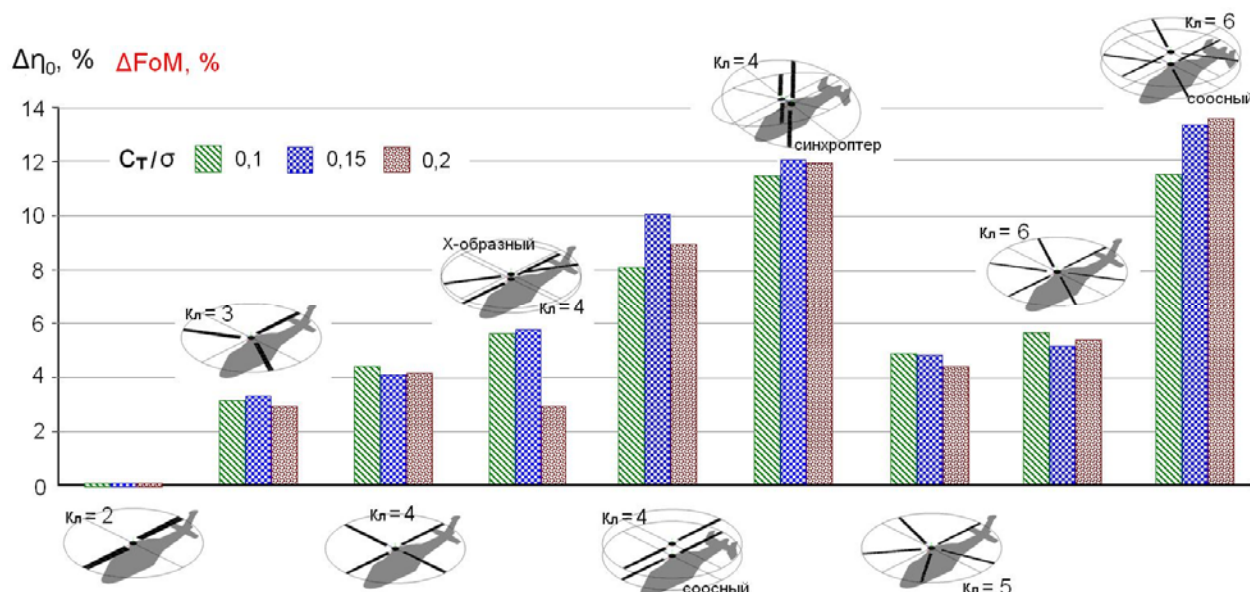


Рис. 10. Зависимости величины прироста КПД, выраженного в процентах, для различных компоновок винта, заполнение винта $\sigma = 0,08$, крутка лопастей $\Delta\varphi_{\Sigma} = 8^\circ$, значения $c_T/\sigma = 0,1; 0,15; 0,25$

Fig. 10. Dependences of the increase in rotor efficiency (FoM), expressed as a percentage for different rotor geometry for rotor blade solidity $\sigma = 0,08$, blade twist $\Delta\varphi_{\Sigma} = 8^\circ$ and the values of $c_T/\sigma = 0,1; 0,15; 0,25$

Одной из причин повышенного КПД у соосного винта являются меньшие потери на закрутку струи за винтом. Для иллюстрации этого обстоятельства на рис. 11, а в сравнении представлены эпюры окружной скорости закрутки струи u в струе за винтом на удалении $0,5R$ для эквивалентного одиночного и соосного винтов, имеющих по 6 лопастей (рис. 4.8 и 4.9). Из-за различного направления вращения соосных винтов закрутка в струе уравнивается, что следует из представленной на рис. 11, а эпюры. В результате у соосного винта потери на закрутку струи, в сравнении с одиночным винтом, практически отсутствуют. Эпюры вертикальной составляющей индуктивной скорости v в струе на удалении $0,5R$ при этом для обоих винтов практически совпадают (рис. 11, б).

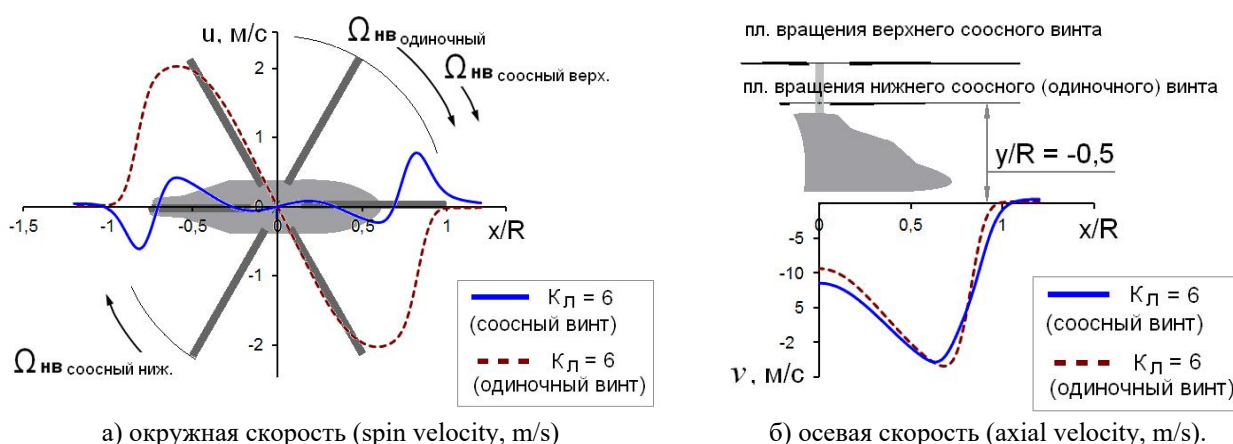


Рис. 11. Эпюры скорости закрутки (а) струи $u = f(x/R)$ и осевой (б) $v = f(x/R)$ составляющей скорости для одиночного и соосного шестилопастных винтов, построенные в струе под винтом на режиме висения на расстоянии $y/R = -0,5$ от плоскости вращения НВ ($\sigma = 0,08$, $\Delta\varphi_{\Sigma} = 8^\circ$, $c_T/\sigma = 0,15$)

Fig. 11. The velocity diagrams of the twist stream $v = f(x/R)$ and axial components of the inductive velocity $u = f(x/R)$ for single and coaxial six-bladed rotors constructed in a stream under the rotor in hover at a distance $y/R = -0,5$ from the plane of the rotor ($\sigma = 0,08$, $\Delta\varphi_{\Sigma} = 8^\circ$, $c_T/\sigma = 0,15$)

На рис. 12 приведены картины линий тока в струе в окрестности винта, построенные в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения и проходящей через ось винта, для трех вариантов компоновки: одиночный винт $k_L = 6$ (рис. 12, а), соосный винт $k_L = 6$ (рис. 12, в) и «синхроптер» $k_L = 4$ (рис. 12, б). Представленные картины линий тока иллюстрируют важную особенность соосного винта и винта «синхроптера», заключающуюся в наличии зон, через которые дополнительно подсасывается воздух (зоны «А» и «Б» на рис. 12, б и 12, в соответственно). Таким образом, соосный винт и винт «синхроптер» имеют фактически большую площадь по сравнению с одиночным винтом того же радиуса, за счет чего их КПД оказывается выше.

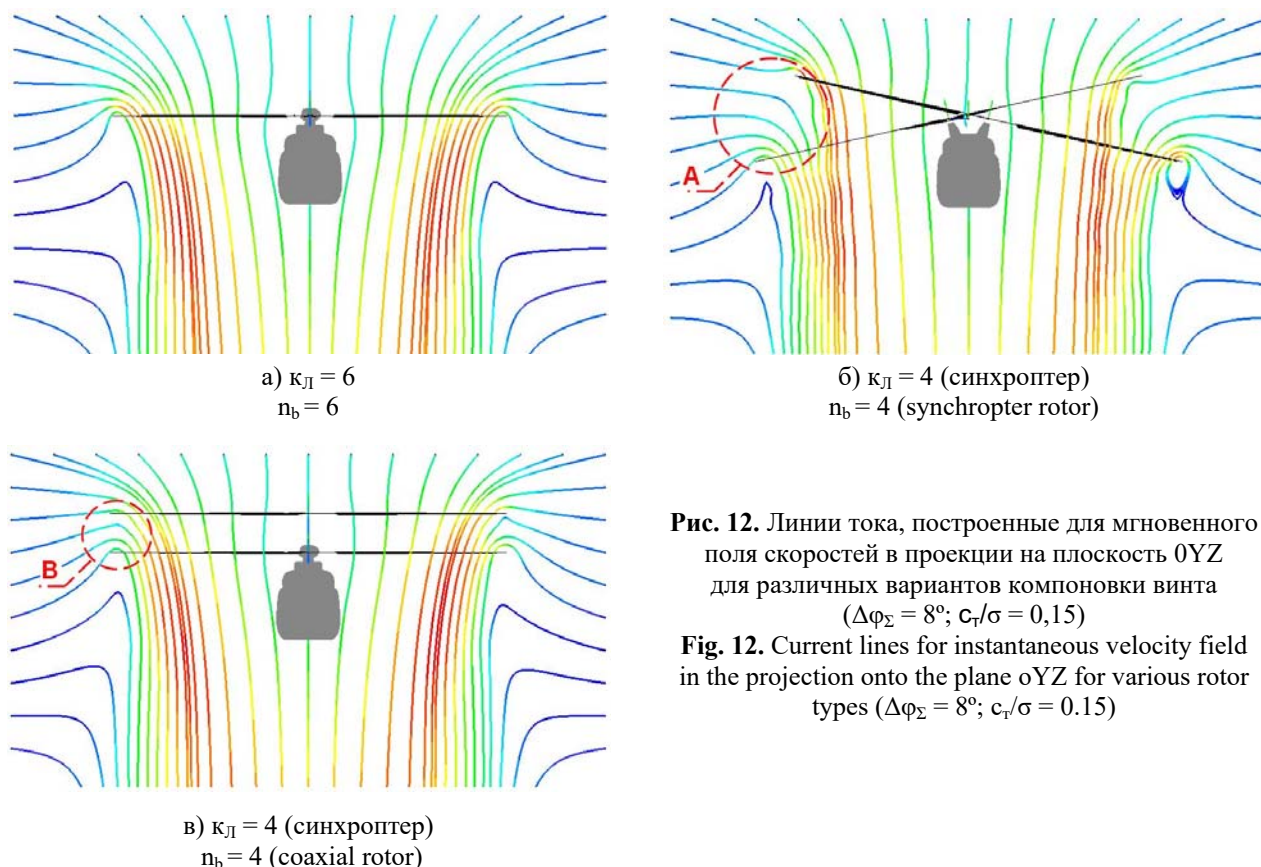


Рис. 12. Линии тока, построенные для мгновенного поля скоростей в проекции на плоскость OYZ для различных вариантов компоновки винта ($\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$; $c_T/\sigma = 0,15$)

Fig. 12. Current lines for instantaneous velocity field in the projection onto the plane OYZ for various rotor types ($\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$; $c_T/\sigma = 0.15$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных параметрических расчетных исследований получены новые данные по влиянию различных вариантов пространственной геометрической компоновки несущих винтов вертолетов на эффективность их работы на режиме висения (относительный КПД винта).

Применение для расчетов нелинейной лопастной вихревой модели позволило учесть особенности структуры вихревого следа, образующегося за лопастями винта, в большой степени определяющей аэродинамическую интерференцию лопастей и аэродинамические характеристики винта в целом.

Выполненные на примере 4-лопастного несущего винта расчеты влияния параметра крутки лопастей $\Delta\varphi_\Sigma$ на аэродинамические характеристики винта на режиме висения показали, что в рабочем диапазоне нагрузок на винт $c_T/\sigma = 0,1 \dots 0,25$ увеличение крутки в целом приводит к существенному росту КПД винта на режиме висения.

Для ряда значений нагрузки на винт $c_T/\sigma = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$ выявлен диапазон значений крутки $\Delta\varphi_\Sigma$, обеспечивающей максимальный градиент прироста КПД винта, а также предельные величины крутки, после которых рост крутки лопастей ведет к снижению КПД винта.

Показано, что при малых значениях $c_T/\sigma = 0,1$ и $c_T/\sigma = 0,15$ максимальные эффективные значения крутки для рассмотренного случая составляют соответственно $\Delta\varphi_\Sigma \approx 14^\circ$ и $\Delta\varphi_\Sigma \approx 18^\circ$. С ростом нагрузки на винт до $c_T/\sigma = 0,2...0,25$ максимальные эффективные значения крутки возрастают.

На конкретном примере показан (с учетом допущений, принятых в модели) механизм влияния увеличения крутки лопасти на прирост КПД винта, заключающийся в перераспределении погонных аэродинамических нагрузок вдоль лопасти и смещении центра приложения силы сопротивления лопасти к ее комлевой части, ведущем к снижению мощности, потребной на вращение винта при фиксированной величине тяги.

Полученные результаты по влиянию крутки лопастей на относительный КПД на режиме висения должны дополняться исследованием влияния крутки и полной аэродинамической компоновки лопасти, включающей набор профилей по ее длине, а также геометрию законцовки, на аэродинамические характеристики винтов на крейсерских режимах полета с горизонтальной скоростью и режимах авторотации НВ. Кроме того, следует учитывать то обстоятельство, что с увеличением крутки происходит увеличение переменных напряжений в силовых элементах лопастей в горизонтальном полете.

Проведенные для одинаковых условий (одинаковое заполнение винтов, режимы работы, значение крутки лопастей и т. д.) расчеты различных геометрических компоновок винтов (одиночный винт, соосный винт, винт типа «синхроптер» и Х-образный винт) позволили оценить и сравнить их между собой с точки зрения достигаемых максимальных величин относительного КПД на режиме висения. Принятая при этом крутка лопастей $\Delta\varphi_\Sigma = 8^\circ$ соответствует применяемой на большинстве современных вертолетов.

Проанализировано влияние увеличения числа лопастей винта (при постоянном заполнении) на его КПД на висении. Показано, что максимальный прирост КПД происходит при переходе от двух лопастей к трем ($\approx 3\%$), тогда как при переходе от трех к четырем лопастям прирост составляет уже лишь $\approx 1\%$, и далее его прирост замедляется.

Проведен анализ эпюр индуктивных скоростей и характера обтекания винтов соосной схемы и схемы типа «синхроптер», наглядно показывающий причины их положительного влияния на КПД по сравнению с обычным одиночным винтом с тем же количеством лопастей.

Полученные в работе результаты могут быть полезны на этапе предварительного проектирования вертикально взлетающих летательных аппаратов при выборе параметров их несущей системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Игнаткин Ю.М.** Нелинейная лопастная вихревая теория винта и ее приложения для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолета / П.В. Макеев, Б.С. Гревцов, А.И. Шомов // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, № 5. С. 24–31.
2. **Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И.** Аэродинамические схемы винтокрылых летательных аппаратов. М.: МАИ, 2018. 88 с.
3. **Шайдаков В.И., Маслов А.Д.** Аэродинамическое проектирование лопастей воздушных винтов. М.: МАИ, 1995. 68 с.
4. **Шайдаков В.И., Игнаткин Ю.М., Маслов А.Д.** Аэродинамические характеристики несущих винтов двухвинтовых вертолетов. Аэродинамическое проектирование лопастей воздушных винтов. М.: МАИ, 1983. 39 с.
5. **Johnson W.** Rotorcraft aeromechanics, Cambridge University Press, 2013. 927 p.
6. **Johnson W.** Helicopter theory. Courier Dover Publications, 1994. 1120 p.
7. **Leishman J.G.** Principles of Helicopter Aerodynamics. Cambridge University Press, 2000. 864 p.

8. Юрьев Б.Н. Аэродинамический расчет вертолетов. М.: Оборонгиз, 1956. 560 с.
9. Петросян Э.А. Аэродинамика соосного винта. М.: Полигон-пресс, 2004. 820 с.
10. Миль М.Л. Вертолеты. Расчет и проектирование. Т. 1. Аэродинамика / А.В. Некрасов, А.С. Браверман, Л.Н. Гродко, М.А. Лейканд. М.: Машиностроение, 1966.
11. Вождаев Е.С. Аэродинамический расчет воздушного винта на основе точных аналитических решений в задаче о нестационарном поле скоростей винтовых вихрей // Труды ЦАГИ. 2002. Вып. 2659. 23 с.
12. Бурцев Б.Н. Феномен высокого полезного действия соосных несущих винтов на режиме висения / И.М. Вайнштейн, В.Н. Квоков, Э.А. Петросян // Труды 3-го форума Российского вертолетного общества. Москва. 1998. С. 103–121.
13. Михеев Р.А. Прочность вертолетов. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Игнаткин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования вертолетов МАИ, k102@mail.ru.

Макеев Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования вертолетов МАИ, vaultcity13@gmail.com.

Шомов Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования вертолетов МАИ, shomov_aleksandr@mail.ru.

CALCULATED RESEARCH OF INFLUENCE OF HELICOPTER MAIN ROTORS GEOMETRY ON THE EFFICIENCY IN HOVER MODE BASED ON THE NONLINEAR VORTEX MODEL

Yurii M. Ignatkin¹, Pavel V. Makeev¹, Alexander I. Shomov¹

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

ABSTRACT

The efficiency of the helicopter main rotor in the hover mode is very important, because this mode essentially determines the performance characteristics of the helicopter. A feature of the helicopter rotor aerodynamics is a significant inductive blade influence that highly defines its aerodynamic characteristics. The problem of the influence of the blade twist and spatial geometric layout of the main rotor on its aerodynamic characteristics in the hover mode for a fixed value of the rotor solidity has been considered in this article. As a criterion of efficiency of the rotor in the hover mode relative efficiency (FoM – Figure of Merit) is used. The results are obtained by numerical simulation based on the nonlinear vortex blade model of the rotor, developed at the Helicopter Design Chair of the MAI. The model allows taking into account a complicated spatial shape of the free vortex path of the rotor blades that determines their inductive interaction. As the example of a four-blade main rotor with rectangular blades in plan, the influence of the value of the blades twist on the efficiency in the hover mode is studied. For different values of the rotor thrust, the values and ranges of the blade twist angles are determined, providing the maximum positive effect of the efficiency increase in hovering. For a fixed value of the blade twist, the rotor solidity, and the same operating conditions, the effect of various schemes and configurations of rotor on its efficiency in hover mode is studied. A single rotor with a different number of blades (from 2 to 6), an X-shaped rotor, coaxial rotor and rotor with crossed blades type "synchropter" are considered. The values of the efficiency increase in hovering depending on the rotor layout in comparison with the two-blade rotor are obtained. The comparative analysis of inductive velocities and streamlines for the "synchropter" rotor scheme, coaxial rotor scheme and its equivalent single rotor scheme is presented. The obtained results can be useful at the stage of preliminary design of vertically taking-off aircraft when selecting the parameters of their main rotor system.

Key words: helicopter, main rotor, hover mode, nonlinear vortex model, blade twist, number of blades, coaxial rotor, synchropter rotor, X-shaped rotor, efficiency coefficient.

REFERENCES

1. Ignatkin, Yu.M., Makeev, P.V., Shomov, A.I. and Grevcov, B.S. (2009). *Nelineynaya lopastnaya vikhrevaya teoriya vinta i ee prilozheniya dlya rashcheta aerodinamicheskikh kharakteristik nesushchikh i rulevykh vintov vertoletov* [Nonlinear blade vortex theory of rotor and its application for calculation of aerodynamic characteristics of helicopter rotor]. Vestnik MAI, vol. 16, no. 5, pp. 24–31. (in Russian)
2. Ignatkin, Y.M., Makeev, P.V. and Shomov, A.I. (2018). *Aerodinamika nesushchego vinta na rezhimakh oseвого obtekaniya* [Main rotor aerodynamics at axial airflow modes]. Moscow: MAI, 100 p. (in Russian)
3. Shaydakov, V.I. and Maslov, A.D. (1995). *Aerodinamicheskoe proektirovanie lopastey vozdukhnykh vintov* [Rotor blades aerodynamic design process]. Moscow: MAI, 68 p. (in Russian)
4. Shajdakov, V.I., Ignatkin, Yu.M. and Maslov, A.D. (1983). *Aerodinamicheskie kharakteristiki nesushchikh vintov dvukhvintovykh vertoletov. Aerodinamicheskoe proektirovanie lopastey vozdukhnykh vintov* [Main rotor aerodynamic characteristics for twin rotor helicopters]. Moscow: MAI, 39 p. (in Russian)
5. Johnson, W. (2013). *Rotorcraft aeromechanics*. Cambridge University Press, 927 p.
6. Johnson, W. (1994). *Helicopter theory*. Courier Dover Publications, 1120 p.
7. Leishman, J.G. (2000). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press, 864 p.
8. Yurev, B.N. (1956). *Aerodinamicheskii raschet vertoletov* [Helicopter aerodynamic prediction]. Moscow: Oborongiz, 560 p. (in Russian)
9. Petrosyan, E.A. (2004). *Aerodinamika soosnogo vinta* [Co-axial rotor aerodynamics]. Moscow: Poligon-press, 820 p. (in Russian)
10. Mil, M.L., Nekrasov, A.V., Braverman, A.S., Grodtko, L.N. and Leykand, M.A. (1966). *Vertolety. Raschet i proektirovanie* [Helicopters. Calculation and design]. T. 1. *Aerodinamika*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
11. Vozhdaev, E.S. (2002). *Aerodinamicheskii raschet vozduhnogo vinta na osnove tochnykh analiticheskikh resheniy v zadache o nestatsionarnom pole skorostey vintovykh vikhrey* [Rotor aerodynamic prediction based on analytically precise solutions for the problem of blade vortex unsteady flow field]. Trudy TsAGI [Proceedings of TsAGI]. Iss. 2659, 23 p. (in Russian)
12. Burtsev, B.N., Vainshtein, I.M., Kvokov, V.N. and Petrosian, E.A. (1998). *Fenomen vysokogo poleznogo deystviya soosnykh nesushchikh vintov na rezhime viseniya* [The co-axial rotor system high efficiency phenomenon at hover mode]. Trudy 3-go foruma Rossiyskogo vertoletnogo obshchestva. Moscow, pp. 103–121. (in Russian)
13. Miheev, R.A. (1984). *Prochnost vertoletov* [Helicopter strength]. Moscow: Mashinostroenie, 280 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yurii M. Ignatkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Helicopter Design Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), k102@mai.ru.

Pavel V. Makeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Helicopter Design Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), vaultcity13@gmail.com.

Alexander I. Shomov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Helicopter Design Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), shomov_aleksandr@mail.ru.

УДК 629.7.064.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-54-64

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ПЕРВОЙ КАТЕГОРИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

А.В. КЕЧИН^{1,2}, А.В. ЛЕВИН², С.П. ХАЛЮТИН², Б.В. ЖМУРОВ²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва, Россия

В статье рассматривается вопрос обеспечения электроэнергией приемников первой категории в аварийном режиме работы систем электроснабжения перспективных и модернизируемых воздушных судов. Производится анализ опубликованных научных работ, выполненных как в России, так и за рубежом и направленных на решение задач анализа ненормальных режимов работы, синтеза систем электроснабжения и управления ими с целью предотвращения опасных последствий. Авторами рассмотрены оригинальные технические решения, направленные на обеспечение электропитанием необходимого качества приемников электрической энергии первой категории в аварийных режимах работы систем электроснабжения для безопасного завершения полета и посадки воздушного судна. Выполнена работа по анализу и обобщению данных по техническим характеристикам существующих агрегатов и устройств, разработанных ведущими мировыми производителями авиационного оборудования и применяемых в качестве аварийных источников электрической энергии на борту современных воздушных судов гражданской авиации. Определены преимущества и недостатки каждого технического решения, а также сформированы ограничения на область их применения. Проведен анализ перспективных вариантов аварийных источников электрической энергии, в том числе и таких, которые ранее не применялись в авиации из-за их недостаточного технического совершенства, например, водородных электрохимических генераторов. Определены преимущества и недостатки рассматриваемых вариантов, а также сформулированы ограничения на область их применения. На основании выполненного анализа предлагается решение, позволяющее улучшить режимы работы аккумуляторных батарей. Предложенное решение позволяет повысить надежность и долговечность аккумуляторных батарей, а также длительность питания от них приемников электрической энергии первой категории.

Ключевые слова: система электроснабжения самолета, аварийный режим, приемники первой категории.

ВВЕДЕНИЕ

Система электроснабжения (СЭС) является одной из основных (кроме гидравлической и пневматической) энергосистем, применяемых в существующих воздушных судах (ВС).

Исследования [1, 2] показывают, что электрическая энергия (ЭЭ) имеет ряд существенных преимуществ по отношению к другим видам энергии:

- универсальность, т. е. принципиальная возможность питания любого типа оборудования;
- относительная простота реализации алгоритмов управления СЭС на основе микропроцессорных систем;
- достаточно высокий КПД передачи и преобразования энергии по сравнению с другими видами;
- существенно более низкая стоимость эксплуатации.

Данные преимущества приводят к тому, что на борту появляется все большее количество оборудования, питание которого осуществляется от СЭС. Согласно стандарту ГОСТ Р 54073-2010, приемники ЭЭ делятся на три категории, среди которых стоит особо выделить приемники первой категории. Приемники первой категории – это приемники, которые применяются (необходимо) для обеспечения завершения полета и безопасной посадки. В то же время этот же стан-

дарт определяет следующие режимы работы СЭС: нормальный, ненормальный и аварийный, при этом в любом из данных режимов должно осуществляться питание приемников первой категории¹. Наиболее критичным с точки зрения обеспечения ЭЭ приемников первой категории является аварийный режим работы СЭС, так как согласно определению аварийный режим – это режим работы в полете при отказавших или отключенных первичных источниках электроэнергии, установленных на маршевых двигателях и вспомогательной силовой установке, когда происходит переход на электропитание от аварийных источников электроэнергии. Несмотря на неработоспособность маршевых двигателей, электропитание приемников первой категории должно обеспечиваться не менее 30 минут для средне- и дальнемагистральных двухдвигательных пассажирских ВС^{2,3,4}, что при полете над сушей считается достаточным для совершения аварийной посадки. При полете над водной поверхностью требование к времени обеспечения аварийного питания приемников первой категории в соответствии с требованиями «Правил выполнения полетов...»⁵ ужесточается и составляет величину 60 минут.

В то же время многочисленные исследования⁶ [3, 4] показывают, что существует реальная перспектива повышения уровня электрификации ВС. Так в процессе проведения исследований были сформулированы концепции полностью электрического самолета (ПЭС) и более электрического самолета (БЭС). В рамках работ по развитию данных концепций проводится множество работ, как на территории РФ, так и за ее пределами⁷⁸ [3, 4, 5, 6], которые реализовались при создании самолетов Boeing B787 и Airbus A380, АВФ-32НС.

Поэтапное повышение уровня электрификации приводит к переводу потребителей пневмо- и гидросистем на электропитание, что уже реализовано на современных ВС Boeing B787 и Airbus A380. Так, согласно требованиям «Авиационных правил...» в системе управления полетом (СУП) должны применяться три независимых канала управления рулевыми поверхностями. На борту Ил-86, Ил-96-300, Ту-204⁹ [7, 8] для обеспечения работы рулевых поверхностей применяются гидроприводы, запитанные от трех независимых гидросистем, что позволяет выполнить указанные требования. Однако на борту современных ВС (B787, A380) в СУП два исполнительных механизма СУП получают питание от двух независимых гидросистем, а в третьем канале управления используется электрическая энергия, при этом вместо электрогидроприводов применяются электромеханические или электрогидростатические приводы.

На борту современных средне- и дальнемагистральных ВС установленная мощность приемников первой категории в большинстве случаев находится в диапазоне от 10 до 20 кВт, а на борту B787 установленная мощность только приемников первой категории достигает величины 40 кВт, что подтверждает тенденцию к повышению электрификации самолетов.

¹ ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Стандартинформ, 2011.

² Авиационные правила. Ч. 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов. 4-е изд. с поправками / Межгосударственный авиационный комитет. АВИАИЗДАТ, 2014.

³ Авиационные правила. Ч. 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. 5-е изд. с поправками / Межгосударственный авиационный комитет. АВИАИЗДАТ, 2015.

⁴ Radio Technical Commission for Aeronautics. DO-160G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. December 8, 2010.

⁵ Правила выполнения полетов увеличенной дальности воздушными судами с двумя газотурбинными двигателями. (ЕТOPS): утв. приказом ФСВТ России № 94 от 21 апреля 2000 г.

⁶ Исследования по перспективному электроэнергетическому комплексу в концепции более электрического самолета: отчет о составной части НИР. Ч. 1. М.: Экспериментальная мастерская НаукаСофт, 2016.

⁷ Исследования по перспективному электроэнергетическому комплексу в концепции более электрического самолета: отчет о составной части НИР. Ч. 1. М.: Экспериментальная мастерская НаукаСофт, 2016.

⁸ Исследования по перспективному электроэнергетическому комплексу в концепции более электрического самолета: отчет о составной части НИР. Ч. 2. М.: Экспериментальная мастерская НаукаСофт, 2016.

⁹ Самолет Ил-86. Руководство по технической эксплуатации. 2-е изд. / ОКБ имени С.В. Ильюшина. М., 1981.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ АВАРИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Наиболее часто для аварийного питания приемников первой категории применяются АКБ. АКБ нашли широкое применение не только в авиации гражданского назначения, но и в авиации специального назначения. Это обусловлено рядом факторов:

- полной независимостью от маршевого двигателя;
- возможностью обеспечения питанием потребителей при неработающих маршевых двигателях;
- независимостью от условий полета.

В дополнение к указанным факторам, влияющим на выбор АКБ в качестве аварийного источника ЭЭ, используются и другие свойства, например, работа в буферном режиме, что позволяет при параллельном подключении АКБ к шинам основных источников существенно улучшить качество напряжения питания приемников в динамическом режиме работы СЭС. При параллельном включении АКБ с основным источником ЭЭ, обеспечивается бесперебойность питания потребителей при возникновении отказов и реконфигурациях СЭС. Кроме указанных функций применение АКБ позволяет обеспечить автономность ВС при запуске маршевого двигателя.

В связи с тем, что АКБ обладают конечным запасом энергии, их автономная работа с потребителями ЭЭ ограничена временем, которое однозначно определяется емкостью АКБ и потребляемым током, зависящим от циклограммы потребления ЭЭ приемниками первой категории.

Одним из основных показателей качества ВС в целом является его масса. Исходя из этого в авиации, как правило, применяются удельные, относительно массы, характеристики. Так, вместо абсолютной характеристики «энергоемкость» (Вт·ч) используется характеристика «удельная энергоемкость» (Вт·ч/кг). Данная характеристика удобна тем, что позволяет производить сравнительный анализ, в частности АКБ с различными электрохимическими системами (ЭХС).

Наиболее распространенными в авиации являются АКБ никель-кадмиевой ЭХС. Кроме данной ЭХС активно ведутся разработки, направленные на получение ЭХС, обладающих улучшенными показателями энергоемкости. В данном направлении достигнут существенный прогресс, связанный с появлением широкой номенклатуры литий-ионных АКБ. Такими аккумуляторными батареями впервые оснастили самолет В787, однако, несмотря на существенный рост энергоемкости, появились проблемы, связанные с высокой пожароопасностью данных батарей.

Основные технические характеристики АКБ с различными ЭХС приведены в табл. 1.

Применение на борту ВС нескольких типов вторичных энергосистем позволяет рассмотреть вопрос передачи, при необходимости, части энергии от одной системы в другую. Так, на борту ВС ТУ-204-300 и ТУ-214 [7] применяется привод-генератор ГП-27, состоящий из гидромотора, электромагнитного клапана, дренажной емкости и канала генерирования КГА-3, который состоит из бесконтактного синхронного генератора переменного тока и статического преобразователя напряжения, выполненных в едином корпусе¹⁰. Данное изделие вырабатывает электроэнергию постоянного тока напряжением 28,5 В при мощности на выходе не более 2,7 кВт. Изделие позволяет обеспечить питание нагрузки мощностью 4 кВт в течение ограниченного времени, равного 60 с. Основные технические данные изделия приведены в табл. 2.

¹⁰ Самолет Ту-214. Руководство по технической эксплуатации / ОАО «Туполев». М., 2000.

Таблица 1
Table 1

Основные технические характеристики АКБ
Main technical characteristics of the battery

Тип АКБ	Никель-кадмиевая	Никель-металлгидридная	Литий-железо-фосфатная	Литий-железо-сульфидная	Литий-полимерная
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	до 65	до 75	до 150	до 120	до 120
Удельная мощность, Вт/кг	до 500	н/д	до 6600	до 50С	до 50С
Срок службы, циклы	до 1000	до 1000	до 5000	до 2000	до 900
Рабочая температура	-50...+40	-60...+55	-30...+55	-30...+45	-20...+45
Пожароопасность	Низкая	Нет	Низкая	Средняя	Высокая

Аналогичные системы применяются и иностранными разработчиками. Так, крупнейшие авиастроительные корпорации Boeing и Airbus оснастили свои самолеты B757 и B767 (EROPS версии), A320, A321, A330 и A340 изделиями подобного типа. Установленная мощность одного привод-генератора на этих ВС достигает величины 10 кВА^{11,12,13}.

Таблица 2
Table 2

Основные технические характеристики ГП-27
Main technical characteristics of the HEGS-27

Номинальная электрическая мощность, кВт	2,7
Номинальное напряжение постоянного тока, В	27
Ток, потребляемый электромагнитом клапана включения, А, не более	1,5
Номинальная частота вращения вала генератора, об/мин	11000
Давление нагнетания на входе в привод-генератор, кгс/см ²	от 190 до 220
Потребляемый расход, л/мин, не более	27
Давление в линии слива, кгс/см ²	от 2 до 10
Масса (без рабочей жидкости), кг, не более	15
Рабочая жидкость	НГЖ-4, НГЖ-5

Несомненными преимуществами данного решения являются:

- отсутствие ограничений на продолжительность работы источника;
- независимость от условий полета (высота, скорость и пр.);
- стабильная частота вращения генератора.

¹¹ Airbus A318, A319, A320 & A321 Overview. Eaton's Aerospace Product Capabilities. Data List C5-12D / Eaton Corporation Aerospace. Jackson, Mississippi, April 2014.

¹² Airbus A330/A340 System Overview. Eaton's Aerospace Product Capabilities. Data List C5-23 / Eaton Corporation Aerospace. Jackson, Mississippi, December 2004.

¹³ Hydraulic Electrical Generating Systems. Data List TF500-6B / Eaton Corporation Aerospace. Jackson, Mississippi, June 2013.

Однако данное решение обладает и рядом существенных недостатков:

- зависимостью источника гидроэнергии от авиадвигателя, так как масляные насосы приводятся в работу, как и генераторы, авиадвигателем или ВСУ;
- необходимостью наличия гидросистемы;
- относительно высокой удельной массой.

Еще один вариант – использование энергии набегающего потока воздуха, т. е. применение Ram Air Turbine (RAT), который заключается в использовании воздушной турбины и установленного на его валу генератора. Данное решение реализовано на большом количестве гражданских ВС, например, им оснащены аварийные системы электроснабжения самолетов SSJ-100, MC-21, A380, Boeing 787.

Стоит отдельно отметить, что на борту A320 применяется комплексное решение, заключающееся в применении RAT, на валу которого установлен гидронасос, нагнетающий давление в одну из трех гидросистем. Данная энергия используется для управления ВС и одновременно для питания привод-генераторов. Номинальная мощность подобного рода систем не превышает 40 кВА (на B787) и, как правило, составляет величину порядка 10–20 кВА.

Несомненными преимуществами данного решения являются:

- отсутствие ограничений на продолжительность работы источника;
- полная независимость от маршевого двигателя;
- стабильная частота вращения генератора, обеспечиваемая винтом изменяемого шага.

Однако данное решение обладает и рядом существенных недостатков:

- зависимостью от условий полета, а именно от высоты и скорости полета;
- ограничением мощности единичного RAT, однозначно определяемой диаметром турбины.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АВАРИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Одними из наиболее перспективных источников ЭЭ, применение которых возможно на борту ВС, являются топливные элементы (ТЭ), осуществляющие непосредственное преобразование химической энергии в электрическую [9]. К настоящему времени разработано большое количество типов ТЭ:

- низкотемпературные PEMFC (рабочая температура 50–80 °С, топливо – газообразный водород);
- низкотемпературные DMFC (рабочая температура ~80 °С, топливо – метанол);
- среднетемпературные PAFC (рабочая температура 180–250 °С, топливо – газообразный водород, синтез-газ);
- высокотемпературные MCFC (рабочая температура 450–600 °С, топливо – водород, природный газ, синтез-газ);
- высокотемпературные SOFC (рабочая температура 850–1100 °С, топливо – водород, синтез-газ, углеводородное топливо).

Очевидным недостатком применения PAFC, MCFC и SOFC ТЭ является их достаточно высокая рабочая температура, что ограничивает возможность их применения на борту ВС. Исходя из этого в данной статье рассматриваются только PEMFC и DMFC ТЭ. Так как работа PEMFC и DMFC ТЭ основана на одних и тех же физических принципах, то данным ТЭ должны быть в равной степени присущи основные свойства, среди которых стоит отметить практически полное отсутствие перегрузочной способности, и, как следствие, невозможность их использования в качестве источника для стартера.

Главным отличием ТЭ от АКБ является отсутствие фиксированных ограничений по времени работы, которое определяется объемом топливного бака (баллона), что обуславливает необходимость наличия дополнительной системы хранения и доставки топлива.

ТЭ типа PEMFC используют в качестве топлива газообразный водород, который является самым легким и, как следствие, наименее плотным из газов. Исходя из этого для обеспечения ТЭ топливом необходимы большие объемы, что неприемлемо, так как это приводит к увеличению габаритов системы в целом.

Основным способом увеличения количества запасаемого водорода является создание повышенного давления, что позволяет сократить объем, занимаемый водородом, пропорционально давлению. Так, современные системы хранения водорода выдерживают давление до 700 атм. Их использование позволяет достигнуть весовой доли хранения водорода порядка 5–7 %. Удельная энергоёмкость баллонной системы хранения водорода составляет до 0,8–1,3 кВт·ч/кг.

Альтернативным способом хранения водорода является хранение в связанном виде. Для реализации данного метода используются вещества, химическая реакция которых связана с выделением водорода, который поступает в ТЭ.

Основным преимуществом данного способа является отсутствие необходимости создания систем хранения повышенного давления, обладающих рядом недостатков, среди которых особо стоит выделить:

- утечки водорода сквозь стенку баллона, для снижения которых необходимо утолщение стенок и, как следствие, рост массы баллона;
- пожаро- и взрывоопасность водорода.

В то же время применение систем хранения водорода в связанном виде ухудшает удельные характеристики системы хранения топлива, так как необходимо хранение не только водорода, но других химических элементов, участвующих в реакции. Например, наиболее неприхотливый сплав, применяемый для многократных циклов заправки напрямую от электролизера (без дополнительной осушки газа и очистки), – интерметаллический сплав типа AB5 (например, на основе LaNi5), поглощает и выделяет водород в диапазоне температур окружающей среды. Сплав имеет весовое содержание водорода 1,38 %, что в пересчете соответствует 0,244 кВт·ч эквивалентной энергоёмкости на 1 кг сплава.

Стоит упомянуть еще один способ получения водорода – использование риформера углеводородного топлива (природный газ, пропан, бутан и др.), применение которого представляется перспективным в СЭС ВС для получения водорода.

Еще одним перспективным аварийным источником ЭЭ на борту ВС являются суперконденсаторы. Особенностью данных источников является высокая удельная мощность (до 10 кВт/кг), что позволяет обеспечивать высокую выходную мощность, однако суперконденсаторы обладают очень низкой удельной энергоёмкостью до 20 Вт·ч/кг. Однако известны работы по графеновым суперконденсаторам¹⁴ удельная энергоёмкость которых достигает 85 Вт·ч/кг [9].

Основными преимуществами суперконденсаторов, по отношению к АКБ являются их высокий ресурс (до 10^6 циклов заряд-разряд) и отсутствие ограничений по глубине разряда.

Исходя из возможностей суперконденсаторов, наиболее вероятным способом их применения является их комбинация с АКБ, РАТ и/или привод-генератора. На рис. 1 приводится график токовой нагрузки на источники СЭС при совместном применении АКБ и суперконденсатора на импульсную нагрузку.

Данный график показывает, что применение суперконденсатора позволяет существенно снизить импульсный ток, отбираемый от АКБ, что приводит к резкому улучшению условий его эксплуатации. При этом в случае отсутствия импульсных (высоких) токов разряд суперконденсатора практически отсутствует, и вся мощность отдается от АКБ.

¹⁴ Графеновый суперконденсатор – быстрозаряжающаяся альтернатива аккумуляторам [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.facepla.net/index.php/the-news/electronics-news-mnu/892-graphene-based-supercapacitor> (дата обращения: 01.07.2018).

Применение данного метода позволяет существенно увеличить ресурс АКБ.

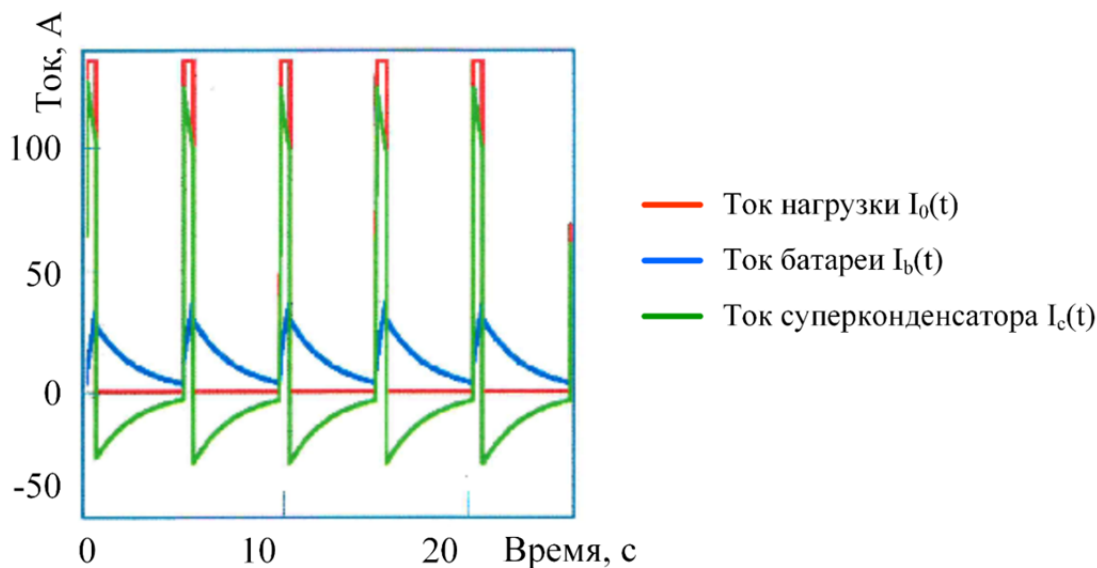


Рис. 1. Совместная работа АКБ и суперконденсатора на импульсную нагрузку
Fig. 1. Joint operation of the battery and supercapacitor on the impulse load

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из анализа основных технических характеристик, определена область применения каждого из технических решений:

- АКБ – вспомогательный аварийный источник, обеспечивающий бесперебойность питания приемников первой категории в период времени между отказом основной СЭС и запуском источников аварийной (вспомогательной) СЭС; область применения – все ВС;
- привод-генератор – основной аварийный источник ЭЭ; область применения – средне-магистральные ВС, снабженные тремя гидросистемами при установленной мощности приемников первой категории не более 10 кВА;
- РАТ-генератор – основной аварийный источник ЭЭ; область применения – средне- и дальнемагистральные ВС при установленной мощности приемников первой категории более 10 кВА или ВС, снабженные двумя гидросистемами, вне зависимости от мощности;
- топливный элемент – основной аварийный источник ЭЭ; область применения – перспективные ВС вне зависимости от мощности приемников ЭЭ;
- суперконденсатор – дополнительные аварийные источники относительно низкой энергоемкости, предназначенные для оптимизации режимов работы основных и вспомогательных аварийных источников в части, касающейся снижения импульсных токов нагрузки, которые возникают, в частности, при электростартерном запуске ВСУ (маршевых двигателей).

Таким образом, с точки зрения авторов, наиболее перспективной структурой аварийной СЭС является:

- АКБ перспективной (литий-ионной) ЭХС, обладающая емкостью, достаточной для выполнения полета в течение 30 минут и трехкратного запуска ВСУ;

- РАТ-генератор (привод-генератор) номинальной мощностью, достаточной для обеспечения ЭЭ всех потребителей в течение длительного времени, перегрузочная способность – отсутствует, в качестве электромеханического преобразователя – магнито-электрический генератор как машина, наиболее полно удовлетворяющая требованиям при заданных параметрах;
- суперконденсатор ограниченной емкости. Емкость должна быть достаточной для компенсации пусковых токов, возникающих при запуске ВСУ (маршевого двигателя). Необходимость обеспечения трехкратного пуска за счет емкости суперконденсатора при этом отсутствует.

Описанная структура приведена на рис. 2. Схема является избыточной, так как в ней приведены оба основных аварийных источника ЭЭ. Выбор конкретного типа основного аварийного источника ЭЭ (включая вариант применения обоих типов) является сложной оптимизационной задачей, которая решается при проектировании ВС в целом и не является предметом проводимых исследований.

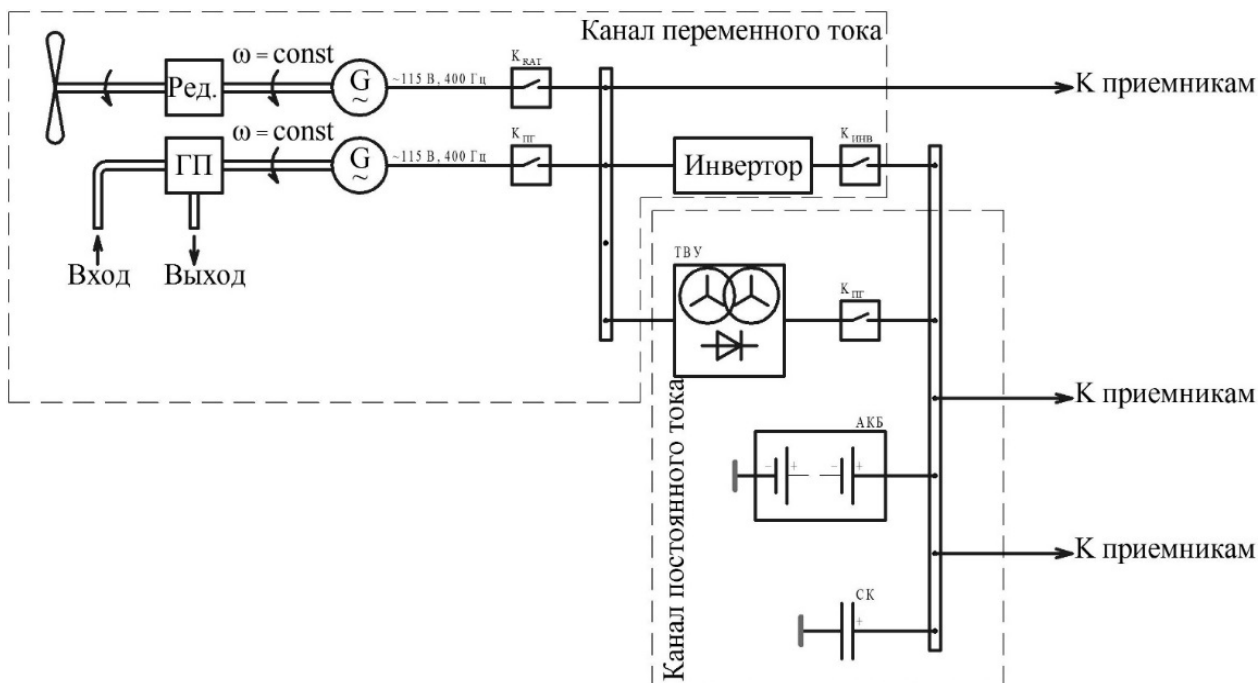


Рис. 2. Обобщенная структурная схема канала аварийной СЭС
Fig. 2. Generalized block diagram of the emergency power supply system channel

Предлагаемое решение позволяет существенно снизить импульсную нагрузку на АКБ и РАТ-генератор (привод-генератор), которая возникает, например, при запуске ВСУ.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе проведено обобщение данных о существующих и перспективных аварийных источниках ЭЭ применение которых с технической и практической точки зрения наиболее перспективно на борту ВС. В статье приводится анализ параметров этих источников, на основании которого сделаны выводы об области применения различных аварийных источников ЭЭ. Предложена обобщенная схема канала аварийной СЭС, обладающая оптимальными с точки зрения АКБ параметрами.

В работе рассмотрен вопрос обеспечения электроэнергией приемников первой категории в аварийном режиме работы систем электроснабжения перспективных и модернизируемых воздушных судов. Проведен анализ научных работ, посвященных решению задач анализа ненормальных режимов работы, синтеза систем электроснабжения. Предложены технические решения, направленные на обеспечение электропитанием приемников электрической энергии первой категории в аварийных режимах работы. Проведен анализ и обобщение данных по техническим характеристикам существующих агрегатов и устройств, разработанных ведущими мировыми производителями авиационного оборудования и применяемых в качестве аварийных источников электрической энергии на борту современных воздушных судов гражданской авиации.

Определены преимущества и недостатки каждого технического решения, а также сформулированы ограничения на область их применения. Проведен анализ перспективных вариантов аварийных источников электрической энергии, в частности водородных электрохимических генераторов. Определены перспективы применения рассматриваемых вариантов, а также сформулированы ограничения на область их применения. На основании выполненного анализа предлагается обобщенная структура аварийной СЭС, позволяющая улучшить режимы работы аккумуляторных батарей. В состав аварийной СЭС должны входить: АКБ перспективной (литий-ионной) ЭХС, обладающая емкостью, достаточной для выполнения полета в течение 30 минут и трехкратного запуска ВСУ; РАТ-генератор (привод-генератор) номинальной мощностью, достаточной для обеспечения ЭЭ всех потребителей в течение длительного времени, в качестве электромеханического преобразователя – магнитоэлектрический генератор как машина, наиболее полно удовлетворяющая требованиям при заданных параметрах; суперконденсатор, емкость которого определяется параметрами конкретной циклограммы потребления электроэнергии. Емкость должна быть достаточной для компенсации пусковых токов, возникающих при запуске ВСУ (маршевого двигателя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Левин А.В.** Электрический самолет: концепция и технологии / С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалев, А.А. Герасин, С.П. Халютин. Уфа: УГАТУ, 2014.
2. **Левин А.В., Алексеев И.И.** Энергетический комплекс полностью электрифицированного самолета // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2009. № 2.
3. **Warwick G.** Hamilton Sundstrand ground-test 787 electrical system // Aviation Week and Space Technology. July 2008.
4. **Волокитина Е.В.** Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Ч. 1 // Электроснабжение и электрооборудование. 2011. № 4.
5. **Masson P.J.** HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles / G.V. Brown, D.S. Soban, C.A. Luongo // Supercond. Sci. Technol. 2007. № 20. Pp. 748–756.
6. **Ganev E.** High Performance Electric Generators for Aerospace More Electric Architectures // Aerospace Engineering & Technology / Honeywell International. 2006.
7. **Ломанцов Б.Н., Чухин В.С.** Электротехническое оборудование самолета Ту-204-300 и его летная эксплуатация. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007.
8. **Воробьев В.Г., Лещинер Д.В.** Самолет Ил-96-300. М.: МИИГА, 1989.
9. **Халютин С.П.** Когда гражданская авиация перейдет на электрические самолеты?! // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2018. С. 67–76.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кечин Александр Викторович, аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта Национального исследовательского университета «МЭИ», инженер-конструктор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», akechin@xlab-ns.ru.

Левин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», a.v.levin@yandex.ru.

Халютин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», skhalutin@xlab-ns.ru.

Жмуров Борис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора – главный конструктор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», bzhmurov@xlab-ns.ru.

ORGANIZATION OF POWER SUPPLY OF THE FIRST CATEGORY RECEIVERS FOR PERSPECTIVE CIVIL AVIATION AIRCRAFT

Alexander V. Kechin^{1,2}, Alexander V. Levin², Sergei P. Khaliutin², Boris V. Zhmurov²

¹*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia*

²*LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article deals with the issue of providing electric power to the first category receivers in the emergency mode of the power supply systems operation of perspective and modernized aircraft. The analysis of the published scientific works performed both in Russia and abroad, and aimed at solving problems of analyzing abnormal operations mode, synthesizing power supply systems and controlling them in order to prevent dangerous consequences is carried out. The authors considered the ingenious technical solutions aimed at providing the necessary quality power supply for the first category receivers in the emergency operation modes of the aircraft power supply systems for the safe completion of flight and landing. The research analysis and generalization of data on the technical characteristics of units and devices developed by the world's leading manufacturers of aviation equipment and used as emergency sources of electrical power on board modern civil aviation aircraft has been completed. The advantages and disadvantages of each technical solution are determined, as well as limitations to the area of their application are formed. The analysis of perspective emergency sources of the electric power including those, which previously were not applied in aviation because of their insufficient technical perfection, for example, hydrogen electrochemical generators is carried out. Based on the performed analysis, a solution which allows improving the operating modes of the electrical batteries is proposed. The offered solution makes it possible to increase the reliability and durability of electrical batteries, as well as the power supply duration of the first category receivers from them.

Key words: aircraft power supply system, emergency mode, the first category electric power receivers.

REFERENCES

1. **Levin, A.V., Musin, S.M., Kharitonov, S.A., Kovalev, K.L., Gerasin, A.A. and Khaliutin, S.P.** (2014). *Elektricheskiy samolet: kontseptsiya i tekhnologii* [Electric plane: concept and technology]. Ufa: UGATU, 388 p. (in Russian)
2. **Levin, A.V. and Alekseev, I.I.** (2009). *Energeticheskiy kompleks polnostyu elektrifitsirovannogo samoleta* [The energy complex of a fully electrified aircraft]. Proceedings of the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, no. 2. (in Russian)

3. **Warwick, G.** (2008). *Hamilton Sundstrand ground-test 787 electrical system*. Aviation Week and Space Technology, July 2008.
4. **Volokitina, E.V.** (2011). *Issledovaniya po sozdaniyu sistemy generirovaniya i zapuska marshevogo dvigatelya v kontseptsii polnostyu elektrifitsirovannogo samoleta. Ch. 1* [Researches on the creation of a system for generating and launching a propulsion engine in the concept of completely electrified aircraft. Part 1]. Electrical supply of electrical equipment, no. 4. (in Russian)
5. **Masson, P.J., Brown, G.V., Soban, D.S. and Luongo, C.A.** (2007). *HTS machines as enabling technology for all-electric airborne vehicles*. Supercond. Sci. Technol., no. 20, pp. 748–756.
6. **Ganev, E.** (2006). *High Performance Electric Generators for Aerospace More Electric Architectures*. Honeywell International. Aerospace Engineering & Technology, Torrance, CA, USA.
7. **Lomantsov, B.N. and Chukhin, V.S.** (2007). *Elektro-tekhnicheskoe oborudovanie samoleta Tu-204-300 i ego letnaya ekspluatatsiya* [Electrotechnical equipment of Tu-204-300 aircraft and its flight operation]. Ulyanovsk: UVAU GA, 2007. (in Russian)
8. **Vorobyev, V.G. and Leshchiner, D.V.** (1989). *Samolet Il-96-300* [The IL-96-300 aircraft]. Moscow: MII GA, 1989. (in Russian)
9. **Khalyutin, S.P.** (2018). *Kogda grazhdanskaya aviatsiya pereydet na elektricheskiye samolety?!* [When will civil aviation transfer to electric planes?!]. Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo, pp. 67–76. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Kechin, Post-graduate Student at the Chair of the Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport, Research Institute "Moscow Power Engineering Institute", Design Engineer, LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", akechin@xlab-ns.ru.

Alexander V. Levin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy CEO for Research LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", a.v.levin@yandex.ru.

Sergei P. Khaliutin, Doctor of Technical Sciences, Professor, CEO LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", skhalyutin@xlab-ns.ru.

Boris V. Zhmurov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy CEO – Chief Designer, LLC "Experimental Laboratory NaukaSoft", bzhmurov@xlab-ns.ru.

Поступила в редакцию 24.07.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 24.07.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 629.7.05

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-65-78

РЕКОНФИГУРАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПРИ ОТКАЗАХ ПРИВОДОВ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА УПРАВЛЕНИЕ

А.М. КУЛЬЧАК¹, В.В. КОСЬЯНЧУК¹, Е.Ю. ЗЫБИН¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 17-08-01445а, 18-08-00453а

Законы реконфигурации комплексной системы управления при отказах приводов, рассчитанные без учета физических ограничений на амплитуды отклонения рулевых поверхностей, могут привести к полной потере управляемости и устойчивости воздушного судна. Несмотря на наличие большого числа научных публикаций в данной области, практические системные результаты получены только для односвязных систем с одним входом и одним выходом. Проблемы сходимости итерационных алгоритмов сужения множества допустимых решений и консервативности законов реконфигурации, построенных с использованием весовых матриц, не позволяют решить задачу учета таких ограничений в общем виде. Для сложных многосвязных систем до сих пор общепринятых универсальных подходов не существует. В работе ограничения на отклонения рулевых поверхностей предлагается учитывать по мощности затрачиваемого на реконфигурацию управления. Показывается, как за счет незначительной модификации метода псевдообращения можно получать приближенные псевдообратные (субоптимальные) решения с заранее известными для заданной степени приближения минимально возможными мощностью (нормой матрицы компенсации отказов) и ошибкой (нормой матрицы погрешности) реконфигурации. Это позволяет согласованно понижать мощность и повышать ошибку реконфигурации в несколько шагов вплоть до получения допустимого решения. За счет увеличения ошибки решения задачи на каждом шаге появляется дополнительная свобода в уменьшении мощности реконфигурации. Уменьшение мощности реконфигурации приводит к уменьшению амплитуд отклонений рулевых поверхностей, на которые перераспределяются сигналы с отказавших каналов управления. На модельном примере реконфигурации комплексной системы управления самолета при отказе привода стабилизатора показывается, что псевдообратное решение задачи реконфигурации приводит к значительному выходу элеронов за ограничения и потере управляемости. Решение, рассчитанное с учетом ограничений на управление, снижает в несколько раз отклонения рулевых поверхностей и обеспечивает эффективное решение задачи в допустимой области мощности и ошибки реконфигурации.

Ключевые слова: реконфигурация, комплексная система управления, отказы приводов, ограничения на управление, приближенное псевдообратное решение, мощность реконфигурации, ошибка реконфигурации.

ВВЕДЕНИЕ

Реконфигурация комплексной системы управления (КСУ) воздушного судна (ВС) при отказах приводов осуществляется за счет перераспределения сигналов с отказавших каналов управления на работоспособные [1–7] по информации от системы диагностирования отказов [8, 9]. В результате такого перераспределения отклонения рулевых поверхностей (РП) начинают превышать штатные, и они могут выйти на конструктивные упоры. Поэтому при решении практических задач реконфигурации КСУ ВС всегда необходимо учитывать физические ограничения на амплитуды отклонений его РП. Законы реконфигурации, рассчитанные без учета данных ограничений, могут привести к полной потере управляемости и устойчивости ВС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ КСУ ПРИ ОТКАЗАХ ПРИВОДОВ

Представим модель движения ВС с работоспособными приводами в виде

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

где x – вектор состояния ВС размерности m ; u – вектор управления размерности n , минимальные и максимальные значения которого определяются физическими ограничениями на амплитуды отклонения РП; A – матрица собственной динамики ВС; B – матрица эффективности управления ВС ранга r .

Аналогичным образом введем в рассмотрение модель ВС с отказами приводов $\dot{x}_f = Ax_f + B_f u$, где x_f – вектор состояния ВС с отказами приводов; $B_f = BF$ – матрица эффективности управления ВС с отказами приводов; $F = \text{diag}([f_1 \ \dots \ f_k \ \dots \ f_n])$ – матрица отказов приводов: $f_k = 1$ – отказа нет, $f_k = 0$ – отказ есть.

Запишем также модель ВС с отказами приводов и реконfigurацией

$$\dot{x}_p = Ax_p + B_f u_p, \quad (2)$$

где управление u_p будем искать в виде суммы штатного и компенсирующего, которое определяется матрицей компенсации отказа K и также зависит от штатного:

$$u_p = (I + K)u = Hu. \quad (3)$$

Подставим (3) в (2), тогда модель ВС с реконfigurацией примет вид

$$\dot{x}_p = Ax_p + B_f (I + K)u = Ax_p + B_p u, \quad (4)$$

где $B_p = B_f (I + K)$ – матрица эффективности управления ВС после реконfigurации.

Целью реконfigurации управления является определение матрицы реконfigurации H , обеспечивающей совпадение параметров моделей ВС с работоспособными приводами (1) и с реконfigurацией (4), в соответствии с выражениями $B_p = B_f H = B_f (I + K) = B$.

В результате задача реконfigurации сводится к разрешению матричного уравнения

$$B_f K = B - B_f = \Delta B, \quad (5)$$

относительно K и формированию итоговой матрицы реконfigurации по формуле

$$H = I + K. \quad (6)$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БЕЗ УЧЕТА ОГРАНИЧЕНИЙ НА УПРАВЛЕНИЕ

Представим матрицу B_f с помощью сингулярного разложения вида

$$B_f = L^T \Sigma R^T = \begin{bmatrix} L_{\max}^T & l_{\min}^T & L_0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где L, R – ортогональные матрицы левых и правых сингулярных векторов; Σ – диагональная матрица сингулярных чисел (СЧ) с ранжированными по убыванию положительными числами; $\Sigma_{\max}$ – диагональная матрица максимальных СЧ; $\sigma_{\min}$ – минимальное ненулевое СЧ.

Подставим (7) в исходное уравнение (5)

$$\begin{bmatrix} L_{\max}^T & l_{\min}^T & L_0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix} K = \Delta B \quad (8)$$

и умножим (8) слева на матрицу левых сингулярных векторов L :

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix} K = \begin{bmatrix} L_{\max} \\ l_{\min} \\ L_0 \end{bmatrix} \Delta B.$$

Введем обозначения

$$\begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix} K, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\max} \\ l_{\min} \\ L_0 \end{bmatrix} \Delta B \quad (10)$$

и запишем эквивалентное (5) уравнение

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что K_0^T может всегда принимать произвольные значения $K_0^T = \Psi$, а все множество решений уравнения (11) записывается в виде

$$\begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Psi \end{bmatrix}. \quad (12)$$

При этом погрешность решения (12) после подстановки его в (11) всегда будет равна

$$E = \begin{bmatrix} \Sigma_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\Delta_0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Подставим множество решений (12) эквивалентного уравнения (11) в выражение (9)

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix} K$$

и запишем решение исходного уравнения (5)

$$K = \begin{bmatrix} R_{\max} & r_{\min} & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Psi \end{bmatrix}.$$

Далее с учетом (10) получим множество решений задачи методом наименьших квадратов

$$K = \begin{bmatrix} R_{\max} & r_{\min} & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\max} \Delta B \\ l_{\min} \Delta B \\ \Psi \end{bmatrix} = B_f^+ \Delta B + R_0 \Psi, \quad (14)$$

обеспечивающее, ввиду свойства инвариантности нормы к ортогональным преобразованиям, минимально возможную норму Фробениуса погрешности решения

$$\varepsilon_{(0)} = \varepsilon_{\min} = \|E_{m \times n}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij}^2} = \|\Delta_0\| = \|L_0 \Delta B\| = \|L_0 B\|, \quad (15)$$

которую назовем ошибкой реконфигурации. Для получения решения с минимальной нормой

$$\mu_0 = \mu_{\min} = \|K\|_{\min} = \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 \\ 0 & \sigma_{\min}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\max} \Delta B \\ l_{\min} \Delta B \end{bmatrix} \right\| \quad (16)$$

запишем псевдообратное решение при $\Psi = 0$:

$$K = B_f^+ \Delta B. \quad (17)$$

Окончательное решение задачи реконфигурации определяется в соответствии с (6).

Псевдообратное решение (17) минимизирует ошибку реконфигурации – евклидову норму разности матриц эффективности управления ВС с работоспособной и реконфигурированной КСУ. Это приводит к максимальному сохранению стереотипа управления летчика и минимальному отклонению собственных значений замкнутой системы [7, 10]. При этом решение существует всегда и для синтеза надежных законов реконфигурации может быть записано в аналитическом виде [5].

Существенным ограничением метода псевдообращения на практике является чрезмерное ужесточение требований к решению по обеспечению минимальной ошибки реконфигурации (15). Несмотря на то, что, как правило, такие требования в явном виде не предъявляются,

это ограничение часто приводит к большим значениям коэффициентов усиления законов реконфигурации, так что РП выходят на конструктивные ограничения. В таких случаях на реконфигурацию затрачивается чрезмерная мощность управления в работоспособных каналах, которой не хватает для сохранения устойчивости и управляемости ВС [7, 10].

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА УПРАВЛЕНИЕ

Все разнообразие методов учета ограничений на амплитуды отклонения РП сводится к поэтапному сужению множества неограниченных решений (14) либо к взвешиванию правых и/или левых частей уравнения (5), входных и/или выходных сигналов блока (модуля) реконфигурации (3) [11–17]. Сходимость итерационных алгоритмов сужения множества всех возможных решений за счет перераспределения управления с «перегруженного» канала на «недозагруженные» не всегда позволяет получить требуемое решение. Использование весовых матриц, элементы которых зависят от физических ограничений на отклонения РП, приводит в большинстве случаев к искусственному снижению эффективности работоспособных каналов управления, не гарантируя сохранение работы РП в линейной зоне на всех режимах. При этом многие практические результаты были получены только для односвязных систем с одним входом и одним выходом. Для сложных многосвязных систем до сих пор общепринятых универсальных подходов не существует [2, 3].

В данной работе ограничения на управление предлагается учитывать по норме матрицы компенсации отказов K , характеризующей мощность затрачиваемого на реконфигурацию управления. Очевидно, что минимальная норма этой матрицы, соответствующая полностью работоспособным приводам, равна нулю. Любой отказ и его последующая компенсация приводит к появлению внедиагональных ненулевых элементов в матрице реконфигурации и неизбежному повышению ее нормы. Это, в свою очередь, приводит к снижению запасов управления по работоспособным каналам и степени управляемости ВС.

С физической точки зрения не всегда существует необходимость обеспечивать максимальную точность решения задачи реконфигурации. Решение с меньшей точностью может также достаточно эффективно компенсировать отказ, но при этом появляется дополнительная свобода в уменьшении мощности реконфигурации управления. В результате такая постановка задачи приводит к возможности снижения амплитуд отклонений РП и существенно расширяет область компенсируемых отказов на практике.

Предположим далее, что постановке задачи удовлетворяет менее строгое требование к ошибке решения задачи реконфигурации

$$\varepsilon_{(0)} < \varepsilon_{(1)} = \left\| \begin{bmatrix} \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (18)$$

Тогда если множество решений эквивалентного уравнения (11) записать в виде

$$\begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ 0 \\ \Psi \end{bmatrix}, \quad (19)$$

то погрешность решения (19) после подстановки его в (11) будет заранее удовлетворять (18):

$$E = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ 0 \\ \Psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\delta_{\min} \\ -\Delta_0 \end{bmatrix},$$

а приближенное решение с минимально возможной мощностью, аналогично псевдообратному случаю, определяется при $\Psi = 0$ также в единственном виде

$$\begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} \Delta_{\max} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

со значением нормы

$$\left\| \begin{bmatrix} K_{\max}^T \\ k_{\min}^T \\ K_0^T \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} \Delta_{\max} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\|. \quad (21)$$

После подстановки множества решений (19) уравнения (11) в выражение (9)

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_{\max} \\ 0 \\ \Psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\max}^T \\ r_{\min}^T \\ R_0^T \end{bmatrix} K$$

можно записать множество всех решений исходного уравнения (5)

$$K = \begin{bmatrix} R_{\max} & r_{\min} & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\max} \Delta B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R_{\max} \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B,$$

значение норм которых также совпадает с (21)

$$\mu_{(1)} = \|K\| = \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} \Delta_{\max} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\|. \quad (22)$$

Условие разрешимости исходной задачи реконфигурации при этом имеет вид

$$\varepsilon_{(1)} = \left\| \begin{bmatrix} \delta_{\min} \\ \Delta_0 \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} l_{\min} B \\ L_0 B \end{bmatrix} \right\| \leq \varepsilon_{\text{доп}}. \quad (23)$$

Сравним полученные решения. Найдем коэффициенты эффективности приближения решения по мощности ρ_{μ} и ошибке ρ_{ε} как отношения норм (16), (22) и (15), (23):

$$\rho_{\mu}^{(1)} = \frac{\mu(0)}{\mu(1)} = \frac{\left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B \\ \sigma_{\min}^{-1} l_{\min} \Delta B \end{bmatrix} \right\|}{\left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B \end{bmatrix} \right\|} = \frac{\sqrt{\left\| \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B \right\|^2 + \left\| \sigma_{\min}^{-1} l_{\min} \Delta B \right\|^2}}{\left\| \begin{bmatrix} \Sigma_{\max}^{-1} L_{\max} \Delta B \end{bmatrix} \right\|}, \quad (24)$$

$$\rho_{\varepsilon}^{(1)} = \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(1)} = \frac{\left\| L_0 B \right\|}{\left\| \begin{bmatrix} l_{\min} B \\ L_0 B \end{bmatrix} \right\|} = \frac{\left\| L_0 B \right\|}{\sqrt{\left\| L_0 B \right\|^2 + \left\| l_{\min} B \right\|^2}}. \quad (25)$$

Из (24), (25) видно, что при увеличении ξ норма решения (мощность реконфигурации) всегда уменьшается ($\rho_{\mu}^{(1)} > 1$), а норма погрешности решения (ошибка реконфигурации) – увеличивается или не изменяется ($\rho_{\varepsilon}^{(1)} \leq 1$). Уменьшение мощности реконфигурации приводит к уменьшению амплитуд отклонений РП, на которые перераспределяются сигналы с отказавших каналов управления. Поэтому если и в первом приближении мощность реконфигурации вновь превышает допустимую, но ошибка реконфигурации все еще находится в допустимой области, необходимо повторить аналогичные расчеты для всех возможных степеней приближений $\xi = 0, 1, \dots, r-1$ с нивелированием влияния следующих минимальных СЧ в матрице $\Sigma_{\max}$

$$\mu(\xi) = \left\| \Sigma_{1:r-\xi}^{-1} L_{1:r-\xi, 1:m} \Delta B \right\|, \quad (26)$$

$$\varepsilon(\xi) = \left\| L_{r-\xi+1:m, 1:m} B \right\|, \quad (27)$$

вплоть до получения решения с допустимой мощностью, гарантирующей невыход РП на физические упоры

$$H^{(\xi)} = I + R_{1:m, 1:r-\xi} \Sigma_{1:r-\xi}^{-1} L_{1:r-\xi, 1:m} \Delta B. \quad (28)$$

Понижение мощности решения в большинстве случаев приводит к одновременному увеличению ошибки реконфигурации. Выход решения из допустимой зоны ошибки реконфигурации говорит о практической некомпенсируемости возникающего отказа.

Точное определение границ допустимых решений $\mu_{\text{доп}}$ и $\varepsilon_{\text{доп}}$ является отдельной сложной задачей, так как они зависят от многих факторов: штатных сигналов управления, ограничений на отклонения РП, динамических характеристик приводов, параметров отказов, эффективностей РП и т. д. [10, 13–15, 17]. Анализ результатов модельных экспериментов показывает, что для сохранения устойчивости и управляемости ВС после реконфигурации мощность реконфигурации не должна превышать нормы матрицы эффективности управления ВС с работоспособными приводами $\mu_{\text{доп}} \leq \|B\|$. В этом случае при отсутствии резких маневров ВС в большинстве случаев оставшегося запаса по управлению оказывается достаточно для компенсации отказов и сохранения характеристик устойчивости и управляемости ВС.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РЕКОНФИГУРАЦИИ КСУ

Для проверки работоспособности разработанного подхода рассмотрим пример решения задачи реконфигурации КСУ самолета с учетом ограничений на управление при отказе привода стабилизатора. Пусть динамика самолета описывается линейной моделью вида (1), где

$$A = \begin{bmatrix} -0,0233 & -10,2099 & -9,8098 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,0057 & -0,9300 & 0,0008 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0057 & 0,9300 & -0,0008 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,0002 & -0,7897 & -0,0001 & -0,2721 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0278 & 0,1139 & 0,9876 & 0,137 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3,4455 & -3,4957 & -0,8993 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1,9870 & 0,2042 & -1,0407 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -0,1087 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0052 & 0,0052 \\ 0,0178 & 0,0178 & -0,0084 & 0 & -0,001 & -0,001 & -0,007 & -0,007 \\ -0,0178 & -0,0178 & 0,0084 & 0 & 0,001 & 0,001 & 0,007 & 0,007 \\ -0,3378 & -0,3378 & -1,3433 & 0 & -0,0501 & -0,0501 & 0,1271 & 0,1271 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0054 & 0 & 0 & -0,0022 & 0,0022 \\ 0,2052 & -0,2052 & 0 & -0,1973 & 0,5419 & -0,5419 & -1,6357 & 1,6357 \\ -0,0092 & 0,0092 & 0 & -3,1463 & -0,0579 & 0,0579 & 0,2973 & -0,2973 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$x = [V \ \alpha \ \theta \ \omega_z \ \beta \ \omega_x \ \omega_y \ \gamma]^T$ – вектор состояния в приращениях; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые скорости крена, рыскания и тангажа; $\alpha, \theta, \gamma, \beta$ – углы атаки, наклона траектории, крена и скольжения; V – скорость полета; $u = [u_{рв}^л \ u_{рв}^п \ u_{ст} \ u_{рн} \ u_{эл}^л \ u_{эл}^п \ u_{и}^л \ u_{и}^п]^T$ – вектор управления; $u_{рв}^л, u_{рв}^п$ – углы отклонения левого и правого руля высоты ($-27...22^\circ$); $u_{ст}$ – угол отклонения стабилизатора ($-12...5^\circ$); $u_{рн}$ – угол отклонения руля направления ($-27...27^\circ$); $u_{эл}^л, u_{эл}^п$ – углы отклонения левого и правого элеронов ($-27...15^\circ$); $u_{и}^л, u_{и}^п$ – углы отклонения левой и правой секции интерцепторов ($0...55^\circ$).

При отказе стабилизатора матрица отказов имеет вид $F = \text{diag}(1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$. Определим составляющие сингулярного разложения матрицы $B_f = BF$ (7) и вычислим в соответствии с (26)–(27) мощности μ и ошибки ε всех приближенных решений (рис. 1, табл. 1).

Анализ показывает, что не все решения данной задачи являются допустимыми. Первым допустимым по мощности ($\mu(\xi) = 2,5912$) является решение, полученное с использованием второй степени приближения ($\xi = 2$). При этом приближении обеспечивается также допустимая ошибка реконфигурации, приводящая к отклонению коэффициентов матрицы эффективности управления не более чем в третьем десятичном знаке ($\varepsilon(2) = 0,0011$).

Приведем далее матрицы псевдообратного решения, вычисленного по формуле (17), и решения второй степени приближения, вычисленного по формуле (28) при $\xi = 2$:

$$H_{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,3751 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,3751 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10,877 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10,877 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1,6988 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1,6988 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2501 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2501 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,6395 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0,6395 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

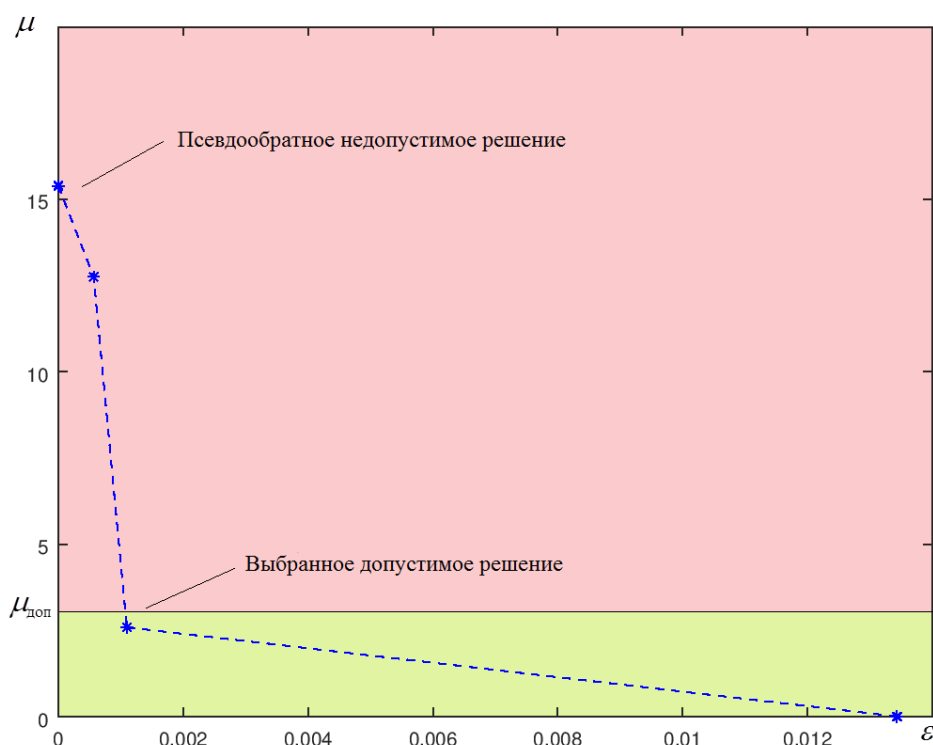


Рис. 1. График «мощность-ошибка» приближенных решений
Fig. 1. "Power-error" graph of approximate solutions

Таблица 1
Table 1

Значения мощностей и ошибок решений в зависимости от степени приближения
Powers and errors of solutions depending on approximation degree

ξ	0	1	2	3	4
$\mu(\xi)$	15,392	12,753	2,5912	$1,93 \cdot 10^{-16}$	$5,07 \cdot 10^{-17}$
$\varepsilon(\xi)$	$4,06 \cdot 10^{-18}$	$5,66 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$

Результаты моделирования при управлении в канале стабилизатора для вариантов КСУ без отказа, с псевдообратным и приближенным законами реконфигурации приведены на рис. 2.

Анализ результатов показывает, что псевдообратное решение в теории обеспечивает полную компенсацию отказа стабилизатора, однако такая точность обеспечивается за счет

трехкратного превышения ограничений на амплитуды отклонения элеронов. На практике такое решение вследствие недостаточной эффективности РП приводит к неустойчивости и неуправляемости самолета и еще больше усугубляет критическую ситуацию. Закон реконфигурации с учетом ограничений на управление снижает чрезмерную нагрузку на элероны и компенсирует отказ стабилизатора дополнительным синфазным отклонением рулей высоты и интерцепторов, которые имеют большую эффективность в канале тангажа. Отклонения элеронов уменьшаются по сравнению с псевдообратным решением более чем в 40 раз. При этом отклонения всех РП находятся в допустимой области, и штатное функционирование КСУ не нарушается. Результаты с компенсацией отказа за счет реконфигурации и без отказа практически совпадают. Незначительное расхождение наблюдается только в каналах α и ϑ .

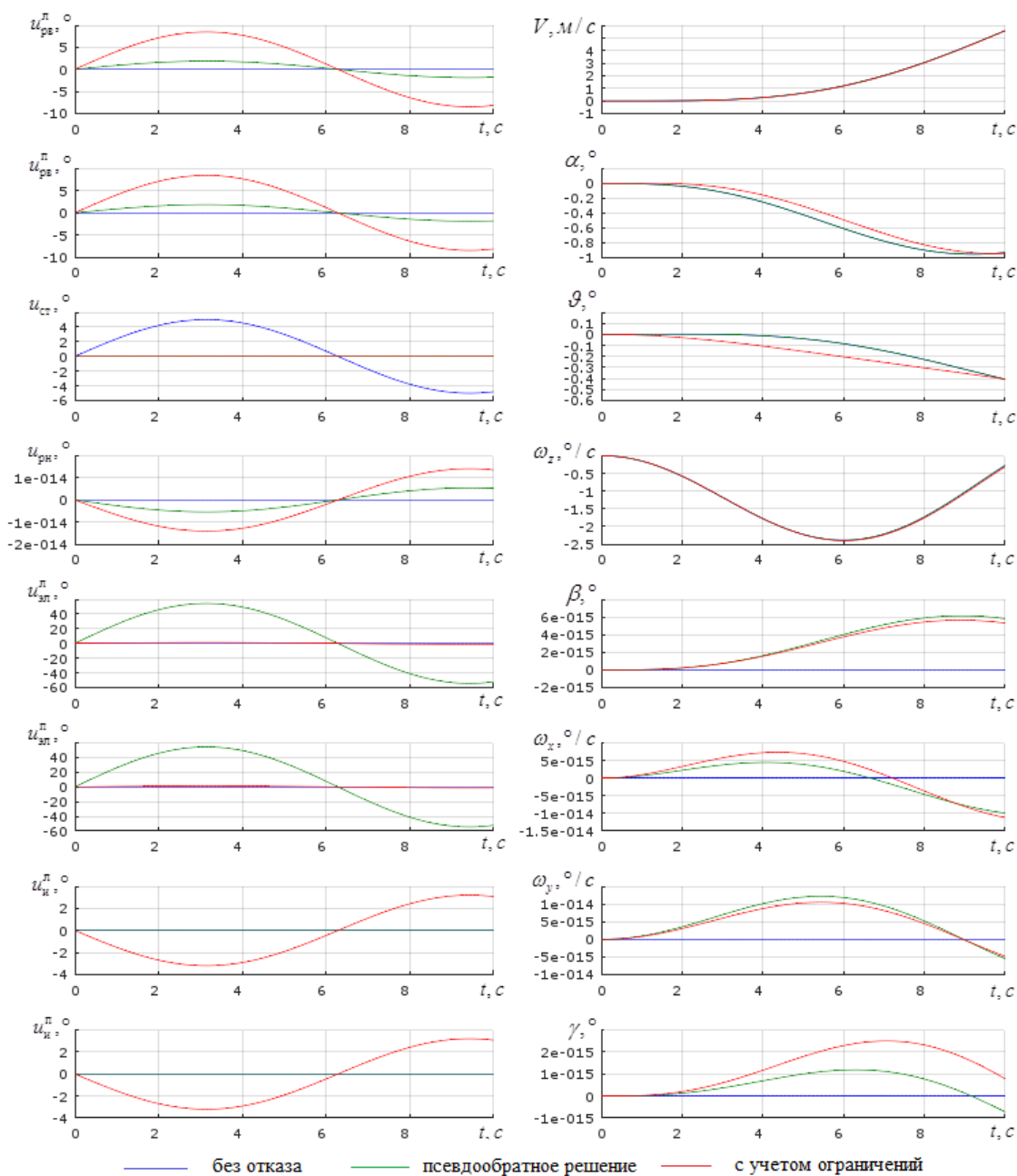


Рис. 2. Результаты моделирования
Fig. 2. Simulation results

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что физические ограничения на амплитуды отклонения РП ВС при компенсации отказов приводов можно учитывать за счет управления мощностью (нормой матрицы) реконфигурации, используемой для перераспределения управления. Снижение мощности реконфигурации снижает максимальные отклонения РП, обеспечивая их работу в допустимой области. Платой за это является повышение ошибки решения задачи реконфигурации.

В работе предлагается понижать точность и мощность решения задачи реконфигурации дискретно в несколько шагов. При этом на каждом шаге приближения обеспечивается субоптимальность решения – получается решение с заранее известными минимально возможными мощностью и ошибкой для заданной степени приближения.

С математической точки зрения аналогичный подход применяется в методе главных компонент, который используется для аппроксимации матриц исходных данных за счет снижения размерности задач с потерей наименьшего количества значимой информации. Однако в предлагаемом методе решается обратная задача вычисления приближенной обратной (приближенно-псевдообратной) матрицы с заданной степенью точности получаемого решения.

Развитие подхода предполагает точное определение допустимых областей решений, непрерывное управление мощностью и ошибкой реконфигурации, распространение всех полученных результатов на задачи мультимодельной робастной реконфигурации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zolghadri A.** The challenge of advanced model-based FDIR for real-world flight-critical applications // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 68. Pp. 249–259.
2. **Fekih A.** Fault diagnosis and fault tolerant control design for aerospace systems: a bibliographical review // *IEEE American Control Conference (ACC)*, 2014. Pp. 1286–1291.
3. **Zhang Y., Jiang J.** Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // *Annual Reviews in Control*. 2008. Vol. 32, № 2. Pp. 229–252.
4. **Fekih A.** Fault-tolerant flight control design for effective and reliable aircraft systems // *Journal of Control and Decision*. 2014. Vol. 1. № 4. Pp. 299–316.
5. **Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Кульчак А.М.** Аналитическое решение задачи оптимальной реконфигурации системы управления летательного аппарата при отказе нескольких органов управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 7. С. 59–66.
6. **Акимов А.Н.** Отказоустойчивость систем управления летательных аппаратов / В.В. Воробьев, Ю.К. Коноплев, В.А. Шабалин. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2005.
7. **Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Силаев А.В.** Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах // *Автоматика и телемеханика*. 1996. № 1. С. 3–20.
8. **Косьянчук В.В.** Контроль и диагностирование подсистем в замкнутом контуре управления // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2004. № 1. С. 67–76.
9. **Буков В.Н., Косьянчук В.В.** Вложение систем. Линейное наблюдение // *Автоматика и телемеханика*. 2001. № 2. С. 3–14.
10. **Gao Z., Antsaklis P.J.** Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems // *International Journal of Control*. 1991. Vol. 53, № 3. Pp. 717–729.
11. **Rotondo D.** *Advances in gain-scheduling and fault tolerant control techniques*. Springer, 2017.
12. **Shen Q.** Finite-time fault-tolerant attitude stabilization for spacecraft with actuator saturation / D. Wang, S. Zhu, K. Poh // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2015. Vol. 51, № 3. Pp. 2390–2405.

13. Zuo Z., Ho D., Wang Y. Fault tolerant control for singular systems with actuator saturation and nonlinear perturbation // Automatica. 2010. Vol. 46. Pp. 569–576.
14. Rotondo D. A virtual actuator approach for the fault tolerant control of unstable linear systems subject to actuator saturation and fault isolation delay / J.-C. Ponsart, D. Theilliol, F. Nejari, V. Puig // Annual Reviews in Control. 2015. Vol. 39. Pp. 68–80.
15. Jiang J., Zhang Y.M. Accepting performance degradation in fault tolerant control system design // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2006. Vol. 14, № 2. Pp. 284–292.
16. Mhaskar P., Gani A., Christofides P.D. Fault-tolerant control of nonlinear processes: Performance-based reconfiguration and robustness // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2006. Vol. 16, № 3. Pp. 91–111.
17. Kapila V., Grigoriadis K. Actuator saturation control. CRC Press, 2002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кульчак Алексей Михайлович, начальник сектора ФГУП «ГосНИИАС», amkulchak@2100.gosniias.ru.

Косьянчук Владислав Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, первый заместитель генерального директора ФГУП «ГосНИИАС», vvk@gosniias.ru.

Зыбин Евгений Юрьевич, доктор технических наук, начальник лаборатории ФГУП «ГосНИИАС», ezybin@2100.gosniias.ru.

RECONFIGURATION OF THE AIRCRAFT INTEGRATED CONTROL SYSTEM REGARDING CONTROL CONSTRAINTS UNDER ACTUATOR FAILURES

Aleksey M. Kulchak¹, Vladislav V. Kosyanchuk¹, Evgeniy Yu. Zybin¹

¹*State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia*

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grants №17-08-01445a and №18-08-00453a

ABSTRACT

The aircraft integrated control system reconfiguration laws under failures of actuators, calculated disregarding physical constraints on control surfaces saturation, can lead to a complete loss of aircraft controllability and stability. Despite the large number of scientific publications in this field, practical systematic results have been obtained only for SISO (single input – single output) systems. Problems of the convergence of iterative algorithms restricting the set of admissible solutions and the conservatism of the reconfiguration laws designed using weight matrices do not allow solving this problem in general. For complex MIMO (multi input – multi output) systems there is still no widely accepted universal approach. In this work, control surfaces constraints are regarded in terms of the power of reconfiguration control. It is shown that by slight modification of pseudoinverse (optimal) solution it is possible to obtain approximate pseudoinverse (suboptimal) solutions with priory known minimum power (compensation matrix norm) and error (residual matrix norm) of the reconfiguration for a given degree of approximation. This allows for a multistep consistent reduction in power and increasing in error of reconfiguration, until an acceptable solution is obtained. By providing the greater reconfiguration error at each step we have additional freedom in reducing the reconfiguration power. This leads to a decrease in the amplitude of the deviations of the control surfaces, to which the signals from the failed control channels are redistributed. The simulation example of the aircraft integrated control system reconfiguration under the stabilizer's actuator failure is presented. It is shown that the pseudoinverse reconfiguration problem solution leads to the significant ailerons' constraints violation and the loss of aircraft controllability. Regarding

control constraints solution reduces several times the deviation of the control surfaces and provides an effective problem solution in the permissible power and error reconfiguration range.

Key words: reconfiguration, integrated control system, actuator failures, control constraints, approximate pseudoinverse solution, reconfiguration power, reconfiguration error.

REFERENCES

1. **Zolghadri, A.** (2018). *The challenge of advanced model-based FDIR for real-world flight-critical applications*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 68, pp. 249–259.
2. **Fekih, A.** (2014). *Fault diagnosis and fault tolerant control design for aerospace systems: a bibliographical review*. IEEE American Control Conference (ACC), pp. 1286–1291.
3. **Zhang, Y. and Jiang, J.** (2008). *Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems*. Annual Reviews in Control, vol. 32, no. 2, pp. 229–252.
4. **Fekih, A.** (2014). *Fault-tolerant flight control design for effective and reliable aircraft systems*. Journal of Control and Decision, vol. 1, no. 4, pp. 299–316.
5. **Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V. and Kulchak, A.M.** (2014). *Analiticheskoe reshenie zadachi optimalnoy rekonfiguratsii sistemy upravleniya letatel'nogo apparata pri otkaze neskolkikh organov upravleniya* [An analytical solution of optimal aircraft control system reconfiguration problem with the failure of several controls]. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, Automation, Control], no. 7, pp. 59–66. (in Russian)
6. **Akimov, A.N., Vorobyev, V.V., Konoplev, Yu.K. and Shabalin, V.A.** (2005). *Otkazoustoychivost sistem upravleniya letatel'nykh apparatov* [Fault tolerance of aircraft control systems]. Moscow: VVIA im. N.E. Zhukovskogo. (in Russian)
7. **Zemlyakov, S.D., Rutkovskiy, V.Yu. and Silaev, A.V.** (1996). *Reconfiguring aircraft control systems in case of failures*. Automation and Remote Control, vol. 57, no. 1, part 1, pp. 1–13.
8. **Kosyanchuk, V.V.** (2004). *Checking and diagnostics of subsystems in a closed control loop*. Journal of Computer and Systems Sciences International, vol. 43, no. 1, pp. 62–71.
9. **Bukov, V.N. and Kosyanchuk, V.V.** (2001). *System embedding*. Linear observation. Automation and Remote Control, vol. 62, no. 2, pp. 169–180.
10. **Gao, Z. and Antsaklis, P.J.** (1991). *Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems*. International Journal of Control, vol. 53, no. 3, pp. 717–729.
11. **Rotondo, D.** (2017). *Advances in gain-scheduling and fault tolerant control techniques*. Springer.
12. **Shen, Q., Wang, D., Zhu, S. and Poh, K.** (2015). *Finite-time fault-tolerant attitude stabilization for spacecraft with actuator saturation*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 51, no. 3, pp. 2390–2405.
13. **Zuo, Z., Ho, D. and Wang, Y.** (2010). *Fault tolerant control for singular systems with actuator saturation and nonlinear perturbation*. Automatica, vol. 46, pp. 569–576.
14. **Rotondo, D., Ponsart, J.-C., Theilliol, D., Nejjari, F. and Puig, V.** (2015). *A virtual actuator approach for the fault tolerant control of unstable linear systems subject to actuator saturation and fault isolation delay*. Annual Reviews in Control, vol. 39, pp. 68–80.
15. **Jiang, J. and Zhang, Y.M.** (2006). *Accepting performance degradation in fault tolerant control system design*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 14, no. 2, pp. 284–292.
16. **Mhaskar, P., Gani, A. and Christofides, P.D.** (2006). *Fault-tolerant control of nonlinear processes: Performance-based reconfiguration and robustness*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 16, no. 3, pp. 91–111.
17. **Kapila, V. and Grigoriadis, K.** (2002). *Actuator saturation control*. CRC Press.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey M. Kulchak, Head of Sector of State Research Institute of Aviation Systems, amkulchak@2100.gosniias.ru.

Vladislav V. Kosyanchuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, RAS Professor, First Deputy Director General, State Research Institute of Aviation Systems, vvk@gosniias.ru.

Evgeniy Yu. Zybin, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, State Research Institute of Aviation Systems, eyzybin@2100.gosniias.ru.

Поступила в редакцию 24.09.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 24.09.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 629.735.015:681.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-79-91

ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИСЦИПЛИНА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЩЕСИСТЕМНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Л.Е. РУДЕЛЬСОН¹, С.Н. СМОРОДСКИЙ², В.А. ЧЕРНЫШЕВА¹

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

²*Московский центр автоматизации управления воздушным движением, г. Москва, Россия*

Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) опубликованы документы, регламентирующие деятельность по увеличению интенсивности полетов. Предлагается на основе технических достижений в области связи, навигации и наблюдения внедрить качественно новые принципы организации воздушного движения. Существующая технология диспетчерского обслуживания основана на принципе регулирования движения воздушных судов с помощью механизма обратной связи. В качестве модели процесса управления выступает план использования воздушного пространства. Отклонения измеряемых параметров движения самолетов от рассчитанных значений могут порождать предпосылки к потенциально конфликтным ситуациям и требуют диспетчерского вмешательства. Инструментом регулирования является новое распределение бортов по месту, времени и высоте. Следуя указаниям диспетчера, пилот либо переходит на обходной маршрут, либо меняет эшелон или скорость. Минимум вмешательств в действия пилота является одним из критериев оценки деятельности диспетчера. Суть предложений ИКАО состоит в переходе от «следающей» системы, реагирующей на отклонения от сбалансированной модели, к системе управления, прогнозирующей тенденции изменения воздушной обстановки в реальном времени. Для воплощения этой возможности необходимо, чтобы в каждом наземном центре и у каждого экипажа имелаась непротиворечивая информация о реальной картине событий и ее развитии, чтобы каждое новое намерение (решение) моделировалось, согласовывалось с коллегами и фиксировалось в планах полетов. Для успеха совместного регулирования обстановки необходима компьютерная поддержка в сфере аэронавигационного обеспечения принятия решений, а также быстродействующие алгоритмы оценки текущих параметров процесса обслуживания воздушного движения, таких как текущая пропускная способность аэродромов и секторов, затрагиваемых готовящимися изменениями. В статье обсуждается динамическая модель коллективного формирования и обслуживания потоков с использованием общесистемной информации. Модель построена как многоканальная система с приоритетами. Приведены аналитические оценки пропускной способности. Критериями оценки выбраны показатели вероятности отказа и среднего времени ожидания обслуживания (отказами считаются направление борта на запасной аэродром, уход на второй круг, задержка вылета и т. п.). Предложенные аналитические зависимости подтверждены имитационными компьютерными экспериментами на статистической модели.

Ключевые слова: организация воздушного движения, использование воздушного пространства, формирование потоков самолетов, модели распараллеливания вычислений, дисциплины приоритетного обслуживания.

ВВЕДЕНИЕ

Рост потребностей в авиаперевозках удовлетворяется соразмерным повышением пропускной способности воздушного пространства [1]. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) подготовила ряд документов, анализируемых в [2–7], регламентирующих деятельность стран-участниц в этом направлении. Предлагается на базе новых технических достижений в области наблюдения, навигации и связи внедрить качественно новые принципы организации воздушного движения (ОрВД). Существующая технология диспетчерского обслуживания авиарейсов фактически основана на принципе регулирования потоков воздушных судов (ВС) с помощью известного механизма обратной связи. Процесс задается и реализуется в рамках заранее сбалансированного плана использования воздушного пространства (ИВП), который интерпретируется системой как модель воздушной обстановки. В силу различных причин возникают отклонения измеряемых параметров движения самолетов от их рассчитанных значений.

Рассогласования могут порождать нарушения регулярности, рост расходов авиакомпаний, предпосылки к потенциально конфликтным ситуациям и требуют диспетчерского вмешательства, т. е. регулирования потока ВС [1, 2]. Инструментом регулирования являются указания диспетчера. Следуя им, пилот либо переходит на обходной маршрут, либо меняет эшелон или скорость. Если отклонения от расчетов по обновляемой модели ИВП не снижают поддерживаемого уровня безопасности, регулярности, экономичности и подобных, то персонал системы ОрВД корректирует исходную модель, «вписывая» ее параметры в реальную обстановку. Минимум вмешательств в действия пилота является одним из критериев оценки деятельности диспетчера.

Суть предложений экспертов ИКАО по совершенствованию принципов ОрВД состоит в переходе от «следающей» системы, чутко реагирующей на отклонения процесса обслуживания воздушного движения (ОВД) от сбалансированной модели, к системе управления потоками самолетов, прогнозирующей развитие обстановки на всю глубину обслуживаемых полетов и предупреждающей возникновение критических ситуаций, вызываемых корректировкой модели (плана) ИВП. Достигнутый уровень техники позволяет делать это в реальном масштабе времени. Появляется возможность обслуживания полетов, выполняемых по свободным траекториям, что считается [2–5] основой повышения пропускной способности ВП. Для воплощения этой возможности необходимо, чтобы у всей системы, у каждого центра ОрВД и у каждого участника движения (в части, его касающейся) имелась непротиворечивая информация о воздушной обстановке и прогнозе ее развития, чтобы каждое новое намерение (решение) моделировалось, согласовывалось с коллегами и фиксировалось в текущем (тактическом) плане ИВП. Заметим, что термин «следающая система», известный из теории автоматического управления, в приложении к ОВД не является общеупотребительным, так как определяет класс простых регуляторов.

Передовые авиационные державы более полутора десятков лет проводят успешные натурные эксперименты по использованию технологий совместного принятия решений по организации потоков ВС, пока – на существующей сети воздушных трасс. Переход на полеты по свободным траекториям планируется начать к 2025 г. В Европе предпочтительной областью проверки выдвинутых технологических решений являются аэродромные зоны, в США статистика набирается как по аэродромным операциям, так и по полетам (перелетам) на трассах. Эмпирический характер исследований, наряду с положительными результатами, таит в себе и недостатки, например, отсутствие количественной оценки коллективно принимаемых решений; прежде всего по пропускной способности элементов ВП, в которых предполагается регулировать потоки ВС в изменившихся условиях выполнения полетов. Первые шаги для восполнения этого пробела предприняты в [8, 9], где модель воздушного пространства представлена многоканальной системой с приоритетами, каждому каналу которой соответствует район ОрВД. Каналы обслуживают заявки (авиарейсы) автономно и независимо один от другого. Получены средние оценки показателей вероятности отказа и времени ожидания обслуживания.

В данной статье условие независимости работы каналов ослаблено. Рассмотрена динамическая модель (дисциплина) параллельных вычислений.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ

Действующая технология организации потоков воздушного движения основана на процедурах, обеспечивающих удовлетворение требований по безопасности при ограничениях на экономичность и регулярность рейсов [1]. На этапах планирования и обслуживания движения неоднократно (по мере необходимости) пересчитываются пространственно-временные (4D) траектории полетов всех ВС, т. е. производится их перераспределение по месту, времени и высоте. Результаты позволяют определить показатели текущей и планируемой загрузки элементов ВП в любом интервале времени суток, что дает оценку (классификацию) режима деятельности

диспетчера в течение смены как шадящий, напряженный, критический и перегруженный периоды. На основе рассчитанных коэффициентов k_z загрузки (отношение времени занятости к длительности смены) появляется возможность принять превентивные меры для снижения интенсивности полетов в перегруженных секторах, чтобы обеспечить оперативному персоналу нормальные условия работы, при которых значение коэффициента k_z загрузки не достигает критического уровня [8]. Реализация этой возможности достигается в основном двумя методами:

- обновлением планового распределения ВС по месту, времени и высоте (переход на другие эшелоны; задержки рейсов; обходные маршруты; другие маневры рассредоточения);
- обновлением планируемого распределения ВП по месту, времени и высоте (гибкое ИВП; реконфигурация или реструктуризация ВП, т. е. объединение и разъединение секторов).

Во введении отмечено, что диспетчер стремится к неукоснительному выполнению сводного текущего плана (как сбалансированной модели ИВП), что его деятельность фактически реализует принцип обратной связи системы ОВД с управляемой средой [10]. Если воздушная обстановка развивается неблагоприятно и создается угроза безопасности полетов, то ситуация нуждается в восстановлении утраченного рассредоточения управляемых ВС.

На этапах планирования действие принципа обратной связи распространяется, помимо ВС, и на организацию ВП. Заблаговременно принимаются меры по перераспределению потоков при введении и снятии ограничений ИВП для полетов ГА, при прогнозировании опасных явлений погоды (в том числе необходимости градовых стрельб) и т. п. Оптимизация текущего (тактического) и даже суточного плана при изменении условий выполнения полетов и в случаях превышения планируемой интенсивности движения над заявленной пропускной способностью аэродромов и секторов содержит в себе зачатки анализируемых в [2–5] концепций управления системой ОрВД. Они становятся возможными благодаря прогрессу в сфере информатизации и компьютерных наук, в частности в поддержке принятия решений в реальном времени.

Обновление методологии формирования потоков ВС нацеливает оперативный персонал на переход от стремления к педантичному соблюдению сбалансированного плана ИВП к навыку управлять отклонениями от него, т. е. не дожидаться нарушения норм эшелонирования или ввода ограничений полетов по маршруту, но активно использовать доступную информацию о назревающих изменениях. В определенной степени такая позиция практикуется и сейчас [7]. Однако в технологии формирования потоков на основе информации о совместном ИВП [2–5] проявляется еще одно новое качество. К участию в процессе коллективного принятия решений привлекается экипаж, совершающий полет. Пилоту разрешается исполнение отдельных диспетчерских функций (при обязательном согласовании с наземными органами). К числу делегируемых функций относятся самоэшелонирование, маневры по курсу и скорости и т. п.

Для поддержания деятельности по коллективной организации и регулированию потоков становится необходима не только компьютерная поддержка в сфере информационного обеспечения принятия решений, но и наличие быстродействующих алгоритмов оценки текущих и назревающих колебаний параметров воздушной обстановки, таких как действительная пропускная способность элементов ВП, затрагиваемых готовящимися изменениями. Ниже обсуждается динамическая модель параллельных вычислений для коллективного обслуживания и формирования потоков ВС с использованием общесистемной информации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной статье термин «параллельные вычисления» обозначает не столько совместное решение расчетных задач на многих компьютерах, сколько поддержание достоверности, непротиворечивости и достаточной полноты информации о воздушной обстановке в каждом назем-

ном центре системы ОрВД и на борту каждого управляемого объекта, т. е. ВС, совершающего полет. Очевидно, что для успешной организации процесса каждый участник совместного принятия решений может корректировать общедоступные файлы и что изменения автоматически рассылаются по компьютерам всех участников. Параллелизм обмена данными по замыслу охвата абонентов схож с защищенными фрагментами сети Интернет, но отличается жесткими требованиями работы в реальном времени в рамках задач специализированной системы ОВД.

Известны [11] две схемы распараллеливания заявок, поступающих в многоканальную систему массового обслуживания (СМО): статическая и динамическая. Объединение вычислительных ресурсов (каналов СМО) ЕС ОрВД диктуется условием совместной работы с общедоступной аэронавигационной информацией, обсуждаемым в [2–5]. Статическое распараллеливание представляет собой дисциплину, согласно которой за каждым каналом (или группой каналов) жестко закрепляются заявки одного потока (или ограниченной группы потоков), а заявки других потоков объявляются запрещенными. Например, задачи каждого района ОВД решаются в его центре. Вводы диспетчера обрабатываются на его персональном компьютере, а вводы коллег – на их компьютерах. Когда «закрепленные» заявки не поступают, канал (или группа каналов) может простаивать (даже при перегрузке других каналов полной системы). Оценка пропускной способности системы, использующей статическую дисциплину, проведена в [8].

Динамическая дисциплина (наглядный пример – «облачные» вычисления) допускает заявки любого типа на любой свободный канал СМО, подчиняясь при выборе не жесткому «закреплению», а лишь шкале приоритетности. Основные закономерности дисциплины проследим на схеме двухприоритетной двухканальной СМО ($n = m = 2$), где n – число каналов обслуживания, m – число входящих потоков. Затем распространим результат на произвольные значения n и m (рис. 1). Оба потока простейшие (пуассоновское распределение), интенсивности поступления заявок λ_1 и λ_2 соответственно. Обслуживание экспоненциальное, его параметры μ_1 и μ_2 ; загрузка ρ_i каждым i -м потоком $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$; коэффициент ν вариации (отношение среднеквадратического отклонения длительности обслуживания к ее математическому ожиданию) равен единице. Заявки принимаются в общий буферный накопитель (БН) объемом r мест, где ожидают обработки (по принципу приоритетного вытеснения) и обслуживаются с относительными приоритетами. Суммарная загрузка ρ_Σ системы обоими потоками меньше единицы $\rho_\Sigma = \rho_1 + \rho_2 < 1$.

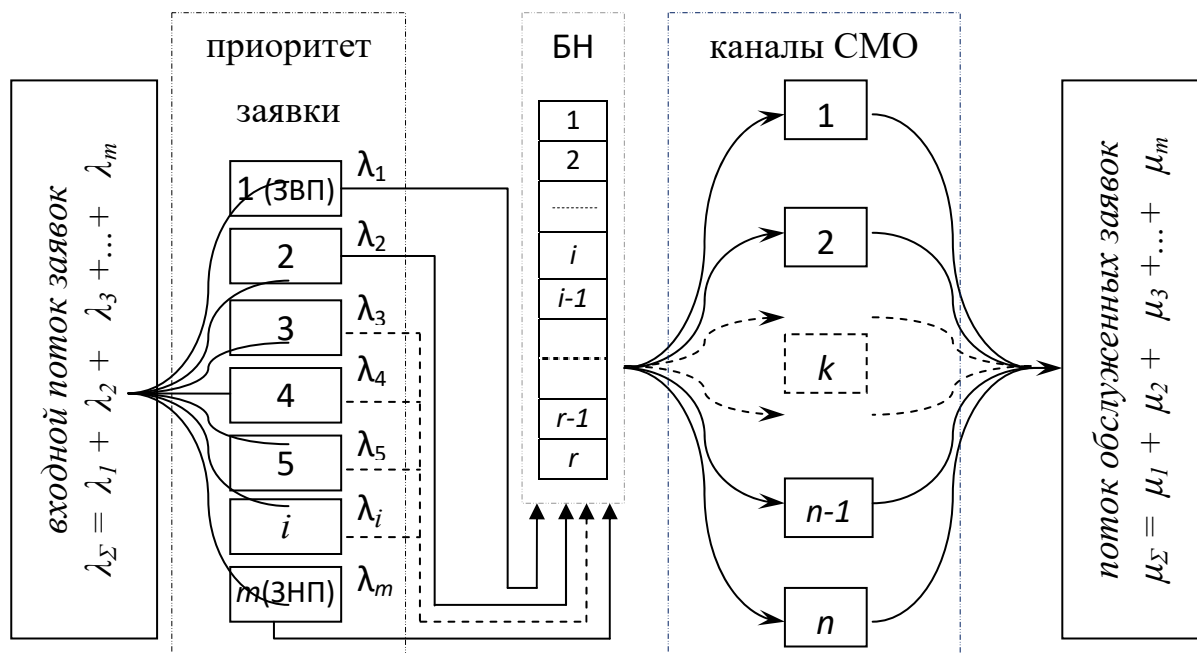


Рис. 1. Многоканальная система массового обслуживания с общим буферным накопителем
Fig. 1. Multi-channel queuing system with a common buffer storage

ОПОРНАЯ МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Термин «обслуживание воздушного движения» при построении аналитической модели фактически предопределяет использование математического аппарата описания многоканальных СМО с приоритетами. В [9, 11] подобная задача рассмотрена для организации вычислительного процесса в компьютерной сети. Основой полученных результатов является известное предположение о том, что в системах с эрланговским распределением времени обслуживания мода длины L очереди заявок может рассчитываться как $L = (1 + v^2)\rho$, где v – коэффициент вариации. Справедливость гипотезы доказана аналитически и компьютерными имитационными экспериментами. Применение результатов, полученных при изучении родственных моделей процессов диспетчеризации вычислений и диспетчерского обслуживания полетов, раздвигает границы наших знаний о возможностях известных методик в смежных сферах деятельности.

Рассчитаем вероятности π_1 и π_2 потери соответственно для заявок высокого приоритета (ЗВП) и заявок низкого приоритета (ЗНП) для СМО с двумя поступающими потоками, далее обобщим формулы на произвольные значения n и m . Введем показатель $\gamma = T_2/T_1$, характеризующий соотношение времени занятости системы обслуживанием разных потоков. Согласно замыслу рассматриваемой дисциплины, ЗНП принимается на обработку, когда система освобождается от ЗВП. Низкоприоритетные заявки занимают канал в среднем на время $T_2 = 1/\mu_2$. За этот период в БН накапливается L_1 ЗВП, и, если L_1 не превышает r ($L_1 \leq r$), тогда вероятность π_1 потери ЗВП не зависит от характеристик неприоритетного потока и подсчитывается как для $n = 2$,

т. е. $\pi_1 = \frac{2\rho_1^{r+2}(1-\rho_1)}{1+\rho_1-2\rho_1^{r+3}}$, если $(1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma \leq r$. При нарушении условия $L_1 \leq r$, в сеансе обработки

каждой ЗНП БН не может принять очередь L_1 ЗВП, и ее избыток, равный $(L_1 - r)$ заявок, получает отказ, а доля ξ_1 потерь ЗВП составляет

$$\xi_1 = 1 - \frac{r}{(1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma}, \text{ если } (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma \leq r.$$

Вероятность выброса случайной величины, т. е. нарушения неравенства $L_1 \leq r$, пропорциональна загрузке ρ_2 , поступающей с потоком ЗНП, и вероятности P_2 обслуживания ЗНП при отсутствии мест для формирования очереди L_2 в БН (т. е. свободная зона БН $r_{\text{збн}} = 0$):

$$P_2 = \frac{1 + \rho_\Sigma - 2 \cdot \rho_\Sigma^2}{1 + \rho_\Sigma - 2 \cdot \rho_\Sigma^3}, \text{ если } (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma > r.$$

Тогда расчетная формула для вероятности π_1 потери ЗВП имеет вид

$$\pi_1 = \frac{2\rho_1^{r+2}(1-\rho_1)}{1+\rho_1-2\rho_1^{r+3}} + \delta \cdot \rho_2 \cdot \frac{1+\rho_\Sigma-2 \cdot \rho_\Sigma^2}{1+\rho_\Sigma-2 \cdot \rho_\Sigma^2} \cdot \left[1 - \frac{r}{(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma} \right], \text{ где } \delta = \begin{cases} 0, & \text{если } (1+\vartheta^2)\rho_1\gamma \leq r, \\ 1 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь и далее δ – символ Кронекера. Если слева от точки $\gamma_{\text{кр}}$ излома кривых π_1 и π_2 (рис. 2) условие $L_1 \leq r$ справедливо, т. е. свободная от ЗВП зона БН насчитывает $r - (1 + \vartheta^2)\rho_1\gamma$ мест, где $\gamma_{\text{кр}} = r / (1 + \vartheta^2)\rho_1$, то вероятность π_2 отказа в приеме ЗНП можно рассчитать как

$$\pi_2 = \frac{2\rho_\Sigma^{2+(1-\delta)[r-(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma]}(1-\rho_\Sigma)}{1+\rho_\Sigma-2 \cdot \rho_\Sigma^{3+(1-\delta)[r-(1+\vartheta^2)\rho_1\gamma]}}.$$

Справа от точки $\gamma_{кр}$ излома функции $\pi_2 = f(\gamma)$ абсолютные значения π_2 снижаются в сравнении с вариантом СМО с одним каналом вследствие того, что $\pi_2 = \frac{2\rho_\Sigma^2(1-\rho_\Sigma)}{1+\rho_\Sigma-2\cdot\rho_\Sigma^3} < \frac{\rho_\Sigma}{1+\rho_\Sigma}$, $\rho_\Sigma \neq 0$.

Подробнее данная модель и ее вариации анализируются в [11]. Показано, что коэффициент β эффективности (по критерию π) обслуживания при $\rho \rightarrow 1$ и отсутствии БН (т. е. при $r = 0$) использование двух каналов вместо одного приносит выигрыш 20 % ($\beta = 0,2$). Для сравнения результатов еще раз обратимся к графику функции $\pi_i = f(\gamma)$ в области (рис. 2) слева от точки $\gamma_{кр}$. Набрана статистика по СМО с характеристиками: количество каналов $n = \{1, 2\}$; объем БН $r = 10$; загрузка $\rho_1 = \rho_2 = 0,45$; $\vartheta = 0$. Сопоставлены данные расчетов и компьютерной имитации.

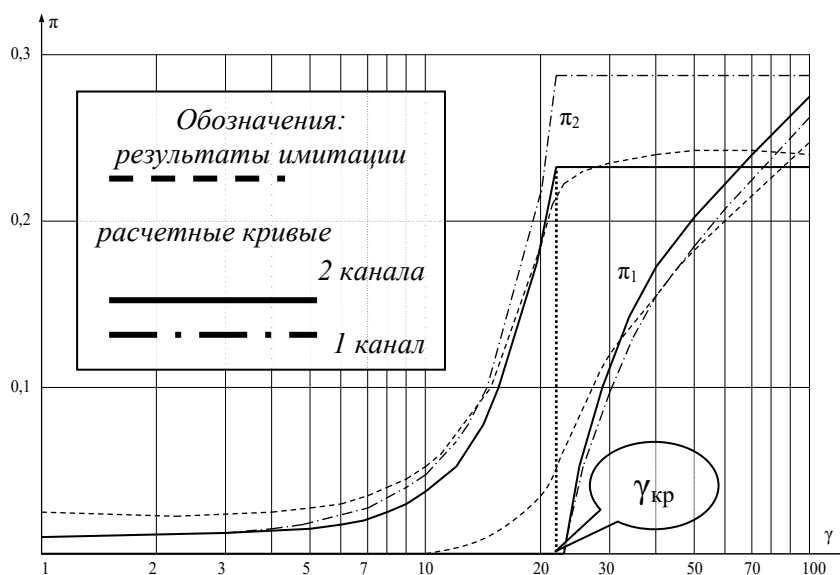


Рис. 2. Графики зависимостей $\pi_i = f(\gamma)$
Fig. 2. Graphs of the dependences $\pi_i = f(\gamma)$

Для разных n представлены экспериментальные и теоретические кривые. При переходе от $n = 1$ к $n = 2$ наблюдается определенный рост π_1 и снижение π_2 . Нетрудно объяснить эту тенденцию. В интервале $(0, \gamma_{кр})$ по оси абсцисс вероятности π_1 и π_2 уменьшаются, потому что в СМО с $n = 2$ на единицу больше мест для ожидания (за счет занятости еще одного канала). Для π_2 этот факт весомее, потому что остаток общего БН, предоставляемый ЗНП, увеличивается, а ЗВП по-прежнему используют весь его объем r . В полуинтервале $(\gamma_{кр}, \infty]$ π_2 становится меньше, так как в силу приоритетного вытеснения

ЗНП для последних перестают существовать места в БН. При этом значение π_2 снижается относительно системы с одним каналом на 20 % ($\beta = 0,2$), и π_1 повышается вследствие увеличения занятости СМО неприоритетными заявками справа от $\gamma_{кр}$.

Максимум погрешности расчетных формул (в сравнении с имитацией) наблюдается в окрестности точки $\gamma_{кр}$. Функции $\pi_i = f(\gamma)$ являются релейными, и согласно логике построения гипотезы, в точке $\gamma_{кр}$ целочисленным скачком меняется величина зоны общего БН, освобождаемой от ЗВП. Компьютерная имитация вычисляет результат по сумме состоявшихся стохастических (псевдослучайных) событий поступления заявок, и этот скачок сглаживается.

Подтверждается [8], что применение многоканальных СМО снижает эффективность диспетчеризации, так как выравниваются значения вероятностей отказа для заявок потоков высоких и низких приоритетов. Рисунок 2 показывает конкретную точку на оси абсцисс $\gamma_{кр} \approx 65$, вычисленную в эксперименте, правее которой величина π_1 превышает π_2 . Точка $\gamma_{кр}$, в которой пересекаются функции вероятностей потери заявок, рассчитанная по формулам, расположена в области более высоких γ ($\gamma_{кр} \approx 85$), чем полученная в имитационном эксперименте, сглаживающем скачок релейной функции. Уточним также, что трудно подобрать пример реальной системы с такими завышенными показателями γ . Однако следует помнить о рассмотренном свойстве многоканальных систем, иначе оно может проявить себя в самое неподходящее время.

Обобщим результаты: пусть в систему поступают m простейших потоков, обслуживаемых n каналами по динамической схеме разделения. Рассмотрим три возможные разновидности

(типа) процесса. Различаются типы функционирования как соотношением объема r буфера, так и величинами длины L_k, L_{k-1} размещенных очередей. Первый из них соответствует условию

$$L_k = (1 + \vartheta^2) \cdot \sum_{i=1}^k T_i \lambda_i = (1 + \vartheta^2) \cdot \gamma_i \cdot \sum_{i=1}^k \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) \leq r, \quad i = \overline{1, k},$$

утверждающему, что, если за период $T_j (k \leq j \leq m)$ значение L_k длины очереди ЗВП, включая k -ю, меньше размера r БН, тогда k -й поток обслуживается в «щадающем» режиме. Такая разновидность помечается в формуле верхним индексом (I) при π , и для нее справедливо

$$\pi_k^{(I)} = \frac{\frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^k \rho_i \right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^k \rho_i \right)}{\sum_{h=0}^n \frac{n^{h-1} (n-h)}{h!} \left(\sum_{i=1}^k \rho_i \right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^k \rho_i \right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) + I}}.$$

Иными словами, выстраивающаяся в течение T_j очередь ЗВП не вытесняет заявки k -го потока, и вероятность π_k потери заявки k -го типа зависит от загрузки, создаваемой k потоками (с номерами $k - i + 1$) и частью БН, свободной от ЗВП. Для потоков с индексами $j = k + 1, \dots, m$, расставленных по приоритетам не выше k -го, ситуация утрачивает состояние равновесия, и система переходит либо в «критический» режим, либо в режим перегрузки.

Второй тип функционирования отображает «критический» режим, при котором очередь L_{k-1} еще помещается в БН, а L_k уже превышает его объем. Разновидность описывается условием

$$(1 + \vartheta^2) \gamma_m \sum_{i=1}^k \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) > r \geq (1 + \vartheta^2) \gamma_m \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right),$$

утверждающим, что за время T_j обработки заявки j -го потока ($j > k$), более длительное, чем для k -го потока, величина L_k длины накапливаемой очереди ЗВП, включая k -ю, превосходит размер r буфера. Следовательно, очередь L_{k-1} высокоприоритетных заявок ($i < k$) можно разместить в общем БН. Тогда k -е заявки будут частично приняты в СМО, но остальные не найдут свободных мест и будут потеряны, а доля ξ_{km} потерь рассчитается [11] как

$$\xi_{km} = 1 - \frac{\gamma_k \left[r - (1 + \vartheta^2) \gamma_m \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) \right]}{(1 + \vartheta^2) \rho_k \gamma_m}.$$

Вероятность P_j обслуживания заявок j -го потока, $j = \overline{k+1, m}$, в условиях рассмотренного их вытеснения во время ожидания более приоритетными заявками, составляет

$$P_j = \frac{\sum_{h=0}^n \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)}}{\sum_{h=0}^n \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^{r+n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) + 1}}.$$

При ограничениях, введенных в ходе анализа второй разновидности процесса, вероятность π_k потери заявки (верхний индекс II) оценивается выражением

$$\pi_k^{(II)} = \pi_k^{(I)} + \sum_{j=k+1}^m \delta_{jk} \rho_j P_j \xi_{kj}, \quad \text{где} \quad \delta_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{если } L_k \leq r, \text{ т. е. } (1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^k \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right), \\ 1 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Третья возможная разновидность протекания процесса (верхний индекс III) описывается неравенством $(1+\vartheta^2)\gamma_j \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) > r$. Оно означает, что при обслуживании одной заявки j -го типа ($j = \overline{k+1, m}$) в СМО формируется очередь ЗВП, имеющих индексы $i = \overline{1, k-1}$, заполняющая все r мест обобществленного БН. При этом ранее поступившие заявки k -го потока удаляются, а приходящие следом получают отказ и в очередь ожидания не включаются. Для этой разновидности, названной выше «режимом перегрузки», вероятность $\pi_k = 1 - P_k$ определяется загрузкой, доставляемой k первыми потоками в условиях отсутствия БН для ЗНП (т. е. при $r = 0$):

$$\pi_k^{(III)} = \frac{\frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^{n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^j \rho_i \right)}{\sum_{h=0}^n \frac{n^{h-1}(n-h)}{h!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^h - \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} \left(\sum_{i=1}^j \rho_i \right)^{n-(1+\vartheta^2)\gamma_m \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right) + 1}}.$$

Для расчета объема r БН, как правило, используют продиктованные замыслом системы значения загрузки ρ каждым потоком, соотношения γ средних времен обслуживания заявок, а также желательные величины π . Предпочтительно выводить систему в «щадающий» режим, описываемый первой частью составной формулы (π^I), поддерживающий стабильное взаимодействие потоков. Такой результат достигается с помощью варьирования показателей γ и места k в приоритетной шкале. Следует убедиться, что вычисленное значение r не нарушает ограничений по «времени жизни» (ожидания обработки) заявок. Иначе придется ослабить требования к показателю π , чтобы эпизодические переполнения БН не приводили к потерям ξ_{km} заявок.

Для удобства анализа на рис. 3 совмещены графики $\pi_i = f(\gamma)$, построенные по результатам расчетов и компьютерных имитационных экспериментов. Статическая (жесткая) дисциплина представлена моделью с приемом заявок в отдельные секции БН, динамическая (плавающая) – с формированием общей очереди ожидания обслуживания. Эффективность по критерию π в статической модели не зависит от аргумента γ , а в динамической растет с его увеличением. При $\gamma_{кр} = r/(1+\vartheta^2)\rho_1$ ситуация выравнивается, а правее точки $\gamma_{кр}$ динамическая дисциплина становится менее предпочтительной. Слева от $\gamma_{кр}$ потери при динамической дисциплине будут ниже.

Предложенный аппарат, проверенный экспериментально, позволяет рассчитать рациональные длины очередей заявок в единицу времени, т. е. пропускную способность многоканальной СМО как с динамической, так и статической схемой разделения задач.

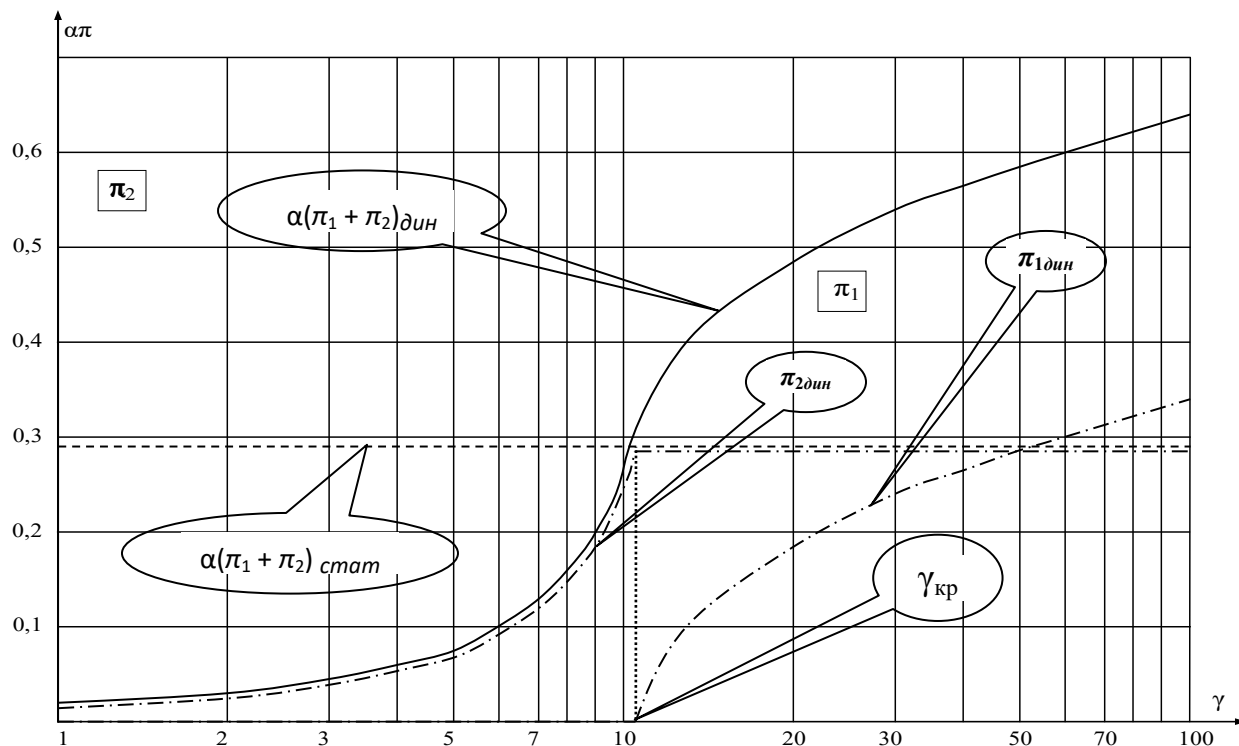


Рис. 3. Графики зависимостей $\pi = f(\gamma)$ для статической и динамической дисциплин
Fig. 3. Graphs of the dependences $\pi = f(\gamma)$ for the static and dynamic disciplines

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ И ОБСЛУЖИВАНИЯ

Предварительные выражения получены при обсуждении опорной модели динамического распараллеливания. Мода величины T времени ожидания при анализе процесса образования очереди L_{k-1} более приоритетных заявок, чем k -е, рассчитана исходя из соотношения

$$L_{k-1} = \sum_{i=1}^{k-1} Q_i, \text{ где } Q_i = \begin{cases} (1 + g^2) \gamma_k \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right), & \text{если } Q_i \leq r - \left(\sum_{i=1}^{k-1} Q_i \right), \\ r & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Время T_{Q_i} обслуживания Q_i заявок вычисляется как $T_{Q_i} = (1 + g^2) Q_i T_i$, где T_i – среднее значение времени обслуживания заявки i -го типа, т. е. для моды L_{k-1} последовательности ЗВП справедливо $T_L = \sum_{i=1}^{k-1} T_{Q_i} = (1 + g^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} (T_i \rho_i / \gamma_i)$. За это время в СМО накапливается приращение $\Delta L'$ очереди ЗВП с индексами $i < k$. Согласно допущению о стационарности и условию $\sum_{i=1}^m \rho_i < 1$, интенсивности λ_i поступления заявок меньше параметров μ_i их обслуживания, и оче-

редь L_{k-1} с учетом поступления ее приращений $\Delta L', \Delta L'', \dots, \Delta L^{l_i}$ неизбежно укорачивается:

$$\Delta L' = (1 + \vartheta^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^2, \Delta L'' = (1 + \vartheta^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^3 \dots$$

Расчет L_{k-1} предусматривает l_i убывающих приращений ΔL ЗВП i -х приоритетов, более высоких, чем k -й, ($i < k$). Процедура вычисления L_{k-1} заканчивается на l_i -м шаге, когда получаем приращение ΔL , не достигающее единицы. Тогда считаем, что СМО освободилась от заявок потоков с индексами $i < k$ и может приступить к обслуживанию заявок k -го типа. В силу того, что поступление заявок разных типов пропорционально интенсивностям соответствующих входных потоков, для соблюдения условия $Q_i \leq r_i$ достаточно потребовать $(1 + \vartheta^2) \gamma_k (\rho_i / \gamma_i)^{l_i} \leq \lambda_i / \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j$,

$$\text{откуда } \Delta L^{l_i} = (1 + \vartheta^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^{l_i} \leq 1, \text{ а } l_i = \left\lceil \frac{\ln \lambda_i - \ln \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j}{\ln \left[(1 + \vartheta^2) \gamma_k \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right]} \right\rceil, \text{ где символ } \lceil * \rceil$$

(антье) означает ближайшее большее целое (в меньшую сторону). Уточним, что вычисленные значения приращений длины l_i укорачивающейся суммарной очереди заявок высоких приоритетов содержат дробную часть, что противоречит физическому смыслу (как и отрицательное количество заявок). Либо заявка поступает в систему, либо получает отказ и теряется. По этой причине дробная часть отбрасывается, а оставшееся целое дополнительно проверяется на отрицательное значение $l_i = \max \left\{ 0, \left\lceil \frac{\ln \lambda_i - \ln \sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j}{\ln \left[(1 + \vartheta^2) \gamma_k \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right]} \right\rceil \right\}$.

Тогда длина L очереди всех ЗВП с индексами $i < k$, формирующейся в системе за время обслуживания одной заявки j -го типа, $j = \overline{k, m}$, с учетом l_i всех приращений ее длины, накопленных при освобождении от L_{k-1} ЗВП, составит $L = (1 + \vartheta^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} \left[1 - \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^{l_i+1} \right] / \left(1 - \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)$, а пе-

$$\text{риод } T \text{ занятости ее обслуживанием } T = (1 + \vartheta^2) \gamma_k \sum_{i=1}^{k-1} T_i \left[1 - \left(\frac{\rho_i}{\gamma_i} \right)^{l_i+1} \right] / \left(1 - \frac{\rho_i}{\gamma_i} \right).$$

Расчетные значения нетрудно сопоставить с директивными сроками («временем жизни»), в течение которых заявки по замыслу разработчика должны быть обслужены. Если результаты расчетов не соответствуют заданным срокам, необходимо изменить параметры СМО λ_i, μ_i, r и γ таким образом, чтобы выполнялись требования заказчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом статьи является вывод о снижении эффективности приоритетного обслуживания заявок на ИВП при переходе от одноканальной СМО к многоканальной. В сочетании с оценками пропускной способности элементов ВП, полученными в [8], важен и принятый сравнительный анализ характеристик статической и динамической дисциплин организации параллельных вычислений. Результат позволяет найти области изменения параметров системы, в которых применение той или иной дисциплины становится предпочтительным (рис. 3). В целях гармонизации ЕС ОрВД с направлением развития организационных и технических средств в мировом авиационном сообществе, желательно прилагать собственные усилия к достижению целей, выдвинутых на передний план документами ИКАО, анализируемыми в [2–5], где разработаны технологические аспекты повышения пропускной способности ВП. Иначе возрастает риск оказаться в ситуации конца прошлого века. Тогда отставание уровня отечествен-

ной системы побуждало иностранные авиакомпании планировать рейсы из Европы на Дальний Восток и обратно не через Россию, а круглым путем, вдоль южного побережья Азии, оснащенного импортным оборудованием обеспечения требований безопасности. Владельцы ВС несли потери в доходности полетов вследствие удлинения пути между аэродромами вылета и назначения в полтора раза и более, а РФ лишалась сборов за аэронавигационное обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бестугин А.Р. Автоматизированные системы управления воздушным движением / А.П. Плясовских, А.Д. Филин, А.Ю. Шатраков. Челябинск: Фонд развития Аэронавигации им. Г.Н. Пирогова, 2016. 367 с.
2. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Программы развития систем организации воздушного движения Европы и США (SESAR и NextGen). М.: ГосНИИ АС, 2011. 256 с.
3. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов // Труды ГосНИИ АС. Сер. Вопросы авионики. 2018. № 2. С. 39–53.
4. Евдокимов К.П. Основные этапы развития Единой системы организации воздушного движения в Российской Федерации // Военный научно-практический вестник МО РФ. 2015. № 1(2). С. 29–32.
5. Князевский Д.А. Организация и обслуживание воздушного движения: учебное пособие. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2011. 201 с.
6. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4. С. 62–76.
7. Борсоев В.А. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Пхон Чжо Тин. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.
8. Жильцов И.Е., Митрофанов А.К., Рудельсон Л.Е. Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 83–95.
9. Перебейнос С.В., Черникова М.А. Динамическая дисциплина приоритетного обслуживания на компьютерной сети // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 132. С. 65–72.
10. Планирование и организация потоков воздушного движения: учебное пособие / Сост. В.А. Казаков. Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. 89 с.
11. Рудельсон Л.Е. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Ч. I. Системное программное обеспечение. Кн. 2. Операционные системы реального времени: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2008. 96 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рудельсон Лев Ефимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, l-rudelson44@yandex.ru.

Смородский Станислав Николаевич, инженер по навигации, радиолокации и связи Московского центра автоматизации управления воздушным движением, stas_avas@mail.ru.

Чернышева Виктория Александровна, старший преподаватель кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, dc-10-40f@mail.ru.

DYNAMIC DISCIPLINE OF PARALLEL SERVICE IN CONCEPT

FLIGHT AND FLOW – INFORMATION FOR A COLLABORATIVE ENVIRONMENT

Lev E. Rudel'son¹, Stanislaw N. Smorodskiy², Victoriya A. Chernyshyova¹

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

²*Moscow Center of Air Traffic Management Automation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The International Civil Aviation Organization (ICAO) has published documents regulating the measures aimed to increase the intensity of flights. It is supposed to introduce qualitatively new principles of air traffic management based on the technical achievements in the field of communication, navigation and surveillance. The existing dispatching service technology is based on the principle of regulating the flow of aircraft through the feedback mechanism. The plan of the airspace utilization is used as the model for the management process. Deviations in the measurand of the aircraft movement from the calculated values can create prerequisites for potentially conflict situations and require the intervention of air traffic controller. The adjustment tool is a new distribution of the aircraft in their place, time and height. Following the instructions of the dispatcher, the pilot either proceeds to the bypass route, or changes either the altitude or speed. Minimal interference in the actions of the pilot is one of the criteria for assessing the controller's work. The essence of ICAO's proposals is in the transition from the "tracking" system which responds to the deviations from the balanced model to the control system which predicts the tendencies to changing the air situation in real time. In order to realize this intention, every ground center and every crew should have consistent information about the real situation in the air and its development, so that each new intention (decision) is modeled, agreed on by the colleagues and fixed in flight plans. To reach the success in co-regulation of the situation it is important to have computer support in the field of aeronautical maintenance of decision-making, as well as high-speed algorithms for assessing the current parameters of the air traffic servicing process, such as handling capacity of aerodromes and terminals related to the changes being prepared. The article discusses the dynamic model of collective formation and flow maintenance using system-wide information. The model is built as a multi-channel system with priorities. Analytical estimates of the throughput are given. Criteria for the assessment are the indicators of the probability of failure and the average waiting time for maintenance by controller (refuses include the direction of the aircraft to the alternate aerodrome, repeated circle of landing, delayed departure, etc.). The proposed formulae are confirmed by the results of simulation computer experiments and statistical modeling.

Key words: air traffic management, use of airspace, formation of aircraft flows, models of parallel computing, disciplines of service with priorities.

REFERENCES

1. Bestugin, A.R., Plyasovskikh, A.P., Filin, A.D. and Shatrakov, A.Yu. (2016). *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya vozdušnym dvizheniyem* [Automated air traffic management systems]. Chelyabinsk: The Fund for the Development of Air Navigation, 367 p. (in Russian)
2. Degtyarev, O.V. and Zubkova, I.F. (2011). *Programmy razvitiya sistem organizatsii vozdušnogo dvizheniya Evropy i SSHA (SESAR i NextGen)* [Programs for the development of air traffic management systems in Europe and the US (SESAR and NextGen)]. Moscow: GosNII AS, 2011, 256 p. (in Russian)
3. Gabeydulin, R.Kh. (2018). *Zadacha dinamicheskogo regulirovaniya potokov vozdušnogo dvizheniya zaderzhkami vyletov vozdušnikh sudov* [The task of dynamically regulating the flow of air traffic by delays in departures of aircraft]. *Trudy GOSNII AS. Ser. Voprosy avioniki* [Proceedings of GosNII AS. Ser. Avionics questions], no. 2, pp. 39–53. (in Russian)
4. Evdokimov, K.P. (2015). *Osnovnye etapy razvitiya Edinoi sistemy organizatsii vozdušnogo dvizheniya v Rossiyskoy Federatsii* [The main stages of the development of the Unified Air Traffic Management System in the Russian Federation]. *Voennyi nauchno-prakticheskiy vestnik MO RF* [Military Scientific and Practical Bulletin of the Ministry of Defense of the Russian Federation], no. 1(2), pp. 29–32. (in Russian)

5. **Knyazevskiy, D.A.** (2011). *Organizatsiya i obsluzhivaniye vozdušnogo dvizheniya* [Organization and maintenance of air traffic]. *Uchebnoye posobiye* [Tutorial]. Ulyanovsk: UVAU GA(I), 201 p. (in Russian)
6. **Degtyarev, O.V. and Zubkova, I.F.** (2012). *Metody i osobennosti matematicheskogo modelirovaniya sistem organizatsii vozdušnogo dvizheniya* [Methods and features of mathematical modeling of air traffic management systems]. *Journal of Computer and Systems Sciences International. Ser. Teoriya i sistemy upravleniya* [Ser. Theory and Control Systems], no. 4, pp. 62–76. (in Russian)
7. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin, Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatiye resheniya v zadachakh upravleniya vozdušnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision Making in Air Traffic Management Tasks. Methods and Algorithms]. Moscow: Radio Engineering, 432 p. (in Russian)
8. **Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E.** (2018). *Otsenka propusknoy sposobnosti v zadache sovmestnogo planirovaniya potokov vozdušnykh sudov* [Estimating Throughput in the Collaborative Planning of Aircraft Flows]. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 2. (in Russian)
9. **Perebeynos, S.V. and Chernikova, M.A.** (2008). *Dinamicheskaya disstiplina prioritnogo obsluzhivaniya na komputernoy seti* [Dynamic arrangement of Priority Processing on the Computing Network]. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 132. (in Russian)
10. **Kazakov, V.A.** (2005). *Metodika opredeleniya propusknoy sposobnosti dispetcherskikh punktov* [Method for determining the throughput of control points]. Tutorial. Ulyanovsk. (in Russian)
11. **Rudelson, L.E.** (2007). *Programmnoe obespechenie avtomatizirovannykh system upravleniya vozdušnym dvizheniem. Ch. I. Sistemnoe programmnoe obespechenie. Kn. 2. Operatsionnye sistemy realnogo vremeni* [Software for Automated Air Traffic Management Systems. Part I. System Software. Book 2. Real-time operating systems]. Tutorial. Moscow: MSTUCA. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev E. Rudelson, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l-rudelson44@yandex.ru.

Stanislaw N. Smorodskiy, Radio Navigation, Radars and Communication Engineer, Moscow Center of Air Traffic Management Automation, stas_avas@mail.ru.

Victoriya A. Chernyshyova, Senior Lecturer, Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, dc-10-40@mail.ru.

Поступила в редакцию 16.03.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 16.03.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 621:658.512

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-92-104

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СИЛОВУЮ КОМПЕНСАЦИЮ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ОТ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

И.В. АНТОНЕЦ¹, В.А. БОРСОВ², В.В. БОРСОВА³, Р.А. БОРИСОВ¹

¹Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации

Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

²Институт аэронавигации, г. Москва, Россия

³НИИ «Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА, г. Москва, Россия

Силоизмерительная техника широко применяется во всех отраслях народного хозяйства, и прежде всего в промышленности. Измерение силы используется с целью определения нагрузок, влияющих на работоспособность многообразных типов оборудования и их элементов, для обеспечения безопасной эксплуатации этого оборудования, а также при испытаниях и исследованиях систем и механизмов. Наиболее эффективными являются устройства, состоящие из упругого элемента и преобразователя его деформации в электрический сигнал. Анализ известных силоизмерительных приборов показывает, что при большом диапазоне нагрузок наиболее эффективной формой упругого элемента является кольцо. В качестве электрических преобразователей деформации в таких устройствах используются емкостные, индуктивные, струнные и тензометрические датчики. Недостатками существующих устройств являются высокая инерционность, пригодность для узкого диапазона нагрузок, малая надежность контактов, нелинейность характеристики. Видятся значительные перспективы в разработке датчиков кольцевого типа с оптоэлектронными преобразователями сигналов, что позволяет значительно повысить производительность, надежность и точность измерения сил. Принцип компенсации предлагается применять в динамометрических датчиках, у которых в качестве контролируемой входной переменной используется значение величины деформации упругого чувствительного элемента. Алгоритм управления схемой компенсации нежелательных отклонений управляемой переменной составляется таким образом, чтобы свести значение величины деформации к нулю. По этой причине функционирование динамометрического датчика, основанное на принципе силовой компенсации, осуществляется с большой точностью. Конструкция датчика содержит чувствительный нуль-орган, усилитель, обратную связь, измерительное устройство.

Ключевые слова: упругий чувствительный элемент, силоизмерительное устройство, величина деформации, силовая компенсация, изменения деформаций во времени.

ВВЕДЕНИЕ

Упругий чувствительный элемент (УЧЭ) является преобразователем входного силового воздействия в деформацию собственно упругого элемента [3], то есть как входным, так и выходным его воздействием являются механические величины. Отклонение от законов идеальной упругости материала заключается в том, что при воздействии постоянной нагрузки вероятно изменение деформаций с течением времени. При приложении нагрузки в начальный момент времени основная часть деформации происходит практически моментально; в последующем деформации продолжают нарастать, но с меньшей интенсивностью. В процессе снятия нагрузки деформации исчезают также с меньшей интенсивностью. При постоянных значениях напряжения и температуры деформация нарастает вначале быстро (I стадия установившейся ползучести), затем с постоянной скоростью (II стадия установившейся ползучести) и далее ускоренно вплоть до разрушения (III стадия).

В настоящее время [2] отсутствуют конструкции силоизмерительных устройств, позволяющих не только учесть, но и осуществить компенсацию остаточной деформации УЧЭ. Кроме того, отсутствует достаточно простая методика расчета УЧЭ, которая позволяет в короткий срок определить характеристики УЧЭ исходя из ограничений сразу на несколько его параметров при заданном пределе измерения, чувствительности и быстродействии. Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать цель работы: разработка методов и конструкций силоизмерительных устройств, позволяющих учесть или осуществить компенсацию остаточной деформации УЧЭ при заданных параметрах предела измерения, чувствительности, быстродействия, а также при наличии ограничений на размеры УЧЭ.

КОНСТРУКЦИЯ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Нами разработаны конструкции силоизмерительных устройств, в которых для исключения остаточной деформации измерительного кольцевого упругого элемента используется метод компенсации внешних нагрузок. Схема силоизмерительного¹ устройства, использующего следящий привод с поворотным магнитом для компенсации внешних нагрузок, представлена на рис. 1.

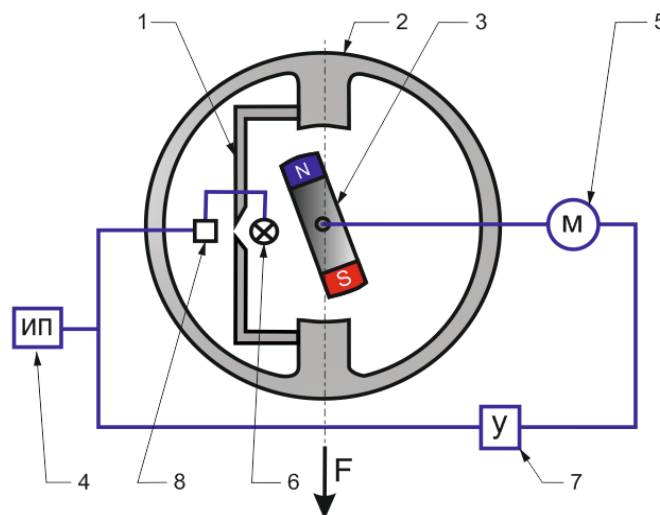


Рис. 1. Схема силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод с поворотным магнитом для компенсации внешних нагрузок:

1 – шторки; 2 – кольцевой упругий элемент; 3 – постоянный магнит; 4 – измерительный прибор; 5 – двигатель; 6 – источник излучения; 7 – усилительное устройство; 8 – фотоприемное устройство

Fig. 1. The scheme of the force-measuring device using an electromagnetic drive with a rotating magnet to compensate the external loads

1 – shutters, 2 – ring elastic element, 3 – permanent magnet, 4 – measuring device, 5 – motor, 6 – radiation source, 7 – amplifying device, 8 – photodetector

Предложенное устройство работает следующим образом. В исходном состоянии (без внешней нагрузки) ток на выходе усилителя 7 отсутствует и двигатель 5 устанавливает постоянный магнит 3 в положение, при котором взаимодействия полюсов магнита с приливами кольцевого упругого элемента 2 не происходит. Сигнал на выходе усилителя появляется после приложения внешней

¹ Пат. 129631 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2012154613/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.

нагрузки, вызывающей расхождение шторок l и увеличение светового потока. Указанный сигнал приводит двигатель и жестко закрепленный на его валу постоянный магнит во вращение. Для магнитного поля, образованного постоянным магнитом, энергия в зазоре, образованном прилегающим к его полюсу объемом воздуха, т. е. удельная магнитная энергия w_m , равна

$$w_m = \frac{B_2 H_2}{2}, \quad (1)$$

где B_2 – индукция магнитного поля в зазоре, H_2 – напряженность магнитного поля в зазоре.
Для зазора с размерами S_2 , l_2 энергия поля равна

$$w_m = \frac{B_2 H_2 S_2}{2l_2}. \quad (2)$$

Изменение площади и длины зазора при повороте постоянного магнита приведет к изменению силы притяжения, создаваемой магнитом, при этом деформация упругого элемента практически будет отсутствовать. Предлагаемая конструкция силоизмерительного устройства обладает существенным достоинством, которое заключается в том, что энергия здесь расходуется лишь на этапах переходных процессов.

Для исключения эффекта прилипания, возникающего вследствие притяжения постоянных магнитов, возникает необходимость в установке специальных прокладочных деталей из немагнитного материала в воздушном зазоре. В процессе исследований наилучшие характеристики компенсации внешних нагрузок были получены при использовании магнитных сплавов ЮНДК35Т5АА и ЮНДК40Т8АА, обладающих высокими магнитными свойствами за счет более совершенной структуры.

ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Схема конструкции [4, 5] силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок и фотопреобразователь, соединенный последовательно с гидроприводом, приведена на рис. 2.

Работа устройства осуществляется по следующему алгоритму. В отсутствии внешней нагрузки шторки имеют минимальный просвет, не позволяющий сформировать световой поток на входе фотоприемника. Наличие внешней нагрузки на упругом кольце ведет к росту просвета между шторками^{2,3}, что влечет увеличение сигнала на выходе фотоприемника и появление тока на выходе усилителя.

Ток, в свою очередь, включает систему управления гидравлическим приводом, она создает давления в гидравлическом приводе, а он осуществляет компенсацию деформации кольца. Величина тока прямо пропорциональна значению нагрузки, и во всех случаях деформация кольца от нагрузки практически отсутствует. Следовательно, предлагаемая⁴ [6] конструкция силоизмерительного устройства не будет иметь погрешности, вызванной остаточной деформацией кольца.

² Пат. 129631 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2012154613/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.

³ Пат. 177302 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Д.Е. Лушников, А.А. Черторийский; УФИРЭ им. Котельникова РАН. № 2017118601; заявл. 29.05.2017; опубл. 15.02.2018. Бюл. № 5. 2 с.

⁴ Пат. 162085 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, С.М. Степанов; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2015148341/28; заявл. 10.11.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15. 2 с.

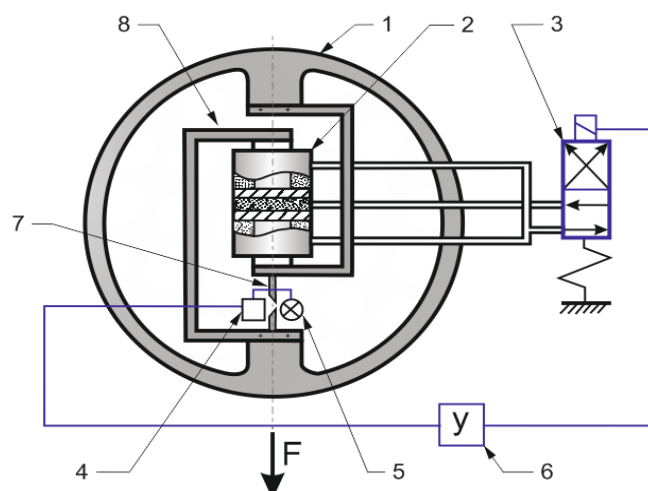


Рис. 2. Схема конструкции силоизмерительного устройства, использующая гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок: 1 – кольцевой упругий элемент; 2 – гидравлический привод; 3 – распределительный золотник; 4 – приемник излучения; 5 – источник излучения; 6 – усиливающее устройство; 7 – шторки; 8 – кронштейны

Fig. 2. The scheme of the design of the force-measuring device using a hydraulic drive to compensate the external loads: 1 – ring elastic element; 2 – hydraulic drive; 3 – slide valve; 4 – radiation receiver; 5 – radiation source; 6 – amplifying device; 7 – shutters; 8 – brackets

Схема силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок и фотопреобразователь, соединенный параллельно с гидроприводом, приведена на рис. 3.

Работа устройства. Кольцо в исходном положении не деформировано, и сигнал на выходе фотоприемного устройства отсутствует. При приложении нагрузки к упругому кольцу просвет [7, 8] между шторками стремится возрасти, однако следующее за этим появление сигналов

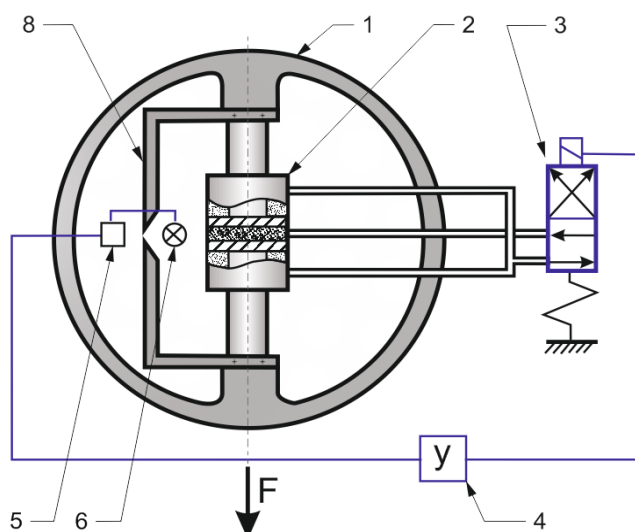


Рис. 3. Схема силоизмерительного устройства, использующего гидравлический привод для компенсации внешних нагрузок: 1 – кольцевой упругий элемент; 2 – гидравлический привод; 3 – распределительный золотник; 4 – усиливающее устройство; 5 – источник излучения; 6 – приемник излучения; 7 – шторки

Fig. 3. The scheme of the force-measuring device using a hydraulic drive to compensate the external loads: 1 – ring elastic element, 2 – hydraulic drive, 3 – slide valve, 4 – amplifying device, 5 – radiation source, 6 – radiation receiver, 7 – shutters

на выходах фотоприемного устройства и усилителя преобразуется в ток, который, в свою очередь, включает систему управления распределительным золотником. Управляемое перемещение распределительного золотника ведет к перераспределению давления в гидравлическом приводе таким образом, что осуществляется компенсация деформации кольца. Величина тока прямо пропорциональна значению нагрузки, и во всех случаях деформация кольца от нагрузки практически отсутствует. Следовательно, предлагаемая конструкция силоизмерительного устройства не будет иметь погрешности, вызванной остаточной деформацией кольца.

ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Разработка конструкции⁵ силоизмерительного устройства, в составе которой применяется система стабилизации пространственного положения кольцевого упругого чувствительного элемента, т. е. деформация кольца, в процессе работы, определяется только величиной значения динамической погрешности данной системы. Принципиальная схема предлагаемой конструкции приведена на рис. 4. Работа устройства производится [11, 12] с использованием измерительного кольцевого упругого элемента 1, который при воздействии внешней нагрузки деформируется, создавая между шторками 6 зазор. При этом световой поток от источника излучения 4 растет прямо пропорционально величине внешней нагрузки. Приемник излучения 5 преобразует световой поток в электрический ток, значение которого также прямо пропорционально величине внешней нагрузки. Электрический ток на выходе приемника излучения через усиливательное устройство 10 поступает на катушку 8 электромагнита, ферромагнитный стержень 7 которого с катушкой прикреплены к приливу 2.

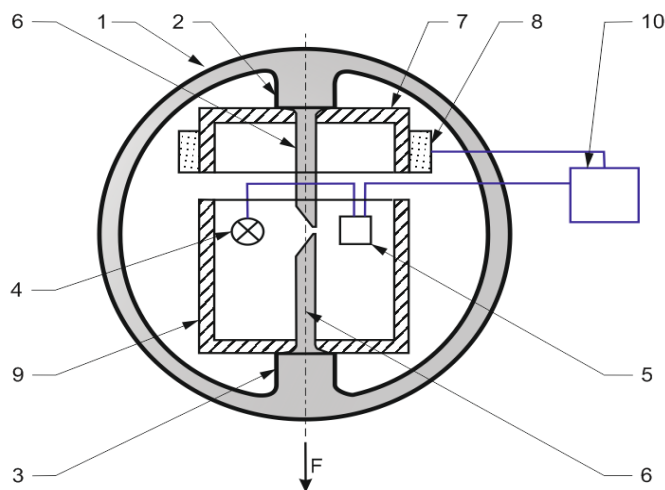


Рис. 4. Схема силоизмерительного устройства, использующего систему стабилизации пространственного положения кольцевого упругого чувствительного элемента: 1 – кольцевой упругий чувствительный элемент; 2, 3 – приливы; 4 – источник излучения; 5 – приемник излучения; 6 – шторка; 7 – ферромагнитный стержень; 8 – электромагнит; 9 – ярмо; 10 – усилительное устройство

Fig. 4. The scheme of the force-measuring device using the system of stabilization of the spatial position of the ring elastic sensing element:

1 – ring elastic sensing element, 2 and 3 – tides, 4 – a radiation source, 5 – a radiation receiver, 6 – a shutter, 7 – a ferromagnetic rod, 8 – an electromagnet, 9 – a yoke, 10 – an amplifying device

⁵ Пат. 129631 Российская Федерация, Весоизмерительное устройство / И.В. Антонец, Г.М. Горшков, В.А. Петров, А.П. Терешенок; заявитель и патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. № 2012154613/28; заявл. 14.12.2012; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18. 2 с.

Ток, протекающий по катушке электромагнита 8, создает в ферромагнитном сердечнике электромагнита магнитное поле, притягивающее ярмо 9, жестко установленное на приливе 3. Сближаясь, приливы 2 и 3 стремятся компенсировать деформацию кольцевого упругого чувствительного элемента. Сила тока, протекающего по катушке электромагнита, будет определять значение внешней силы.

Сведенные к минимуму деформации упругого элемента позволят избежать [13, 14] ряда погрешностей: нелинейности, несовершенств материала, остаточной деформации. Схема сило-измерительного устройства, использующего систему стабилизации пространственного положения упругого кольца, реализует управление по принципу компенсации возмущений, при котором на вход регулятора поступает сигнал, пропорциональный внешнему воздействию. Основная задача системы – обеспечить нулевое рассогласование.

В предлагаемой системе непрерывное изменение выходной величины соответствует во времени непрерывному изменению входной величины, т. е. протекание всех процессов является непрерывным. В то же время наличие в системе нелинейных звеньев предопределяет ее общую нелинейность, что значительно усложняет решение задач, связанных с определением динамических характеристик системы.

Для обеспечения простоты расчета приведем задачу к такому виду, чтобы максимально эффективно реализовать методы исследования обыкновенных линейных систем, основываясь на том, что теория и методы для них разработаны наиболее полно. На рис. 5 показана обобщенная функциональная схема системы замкнутого типа.

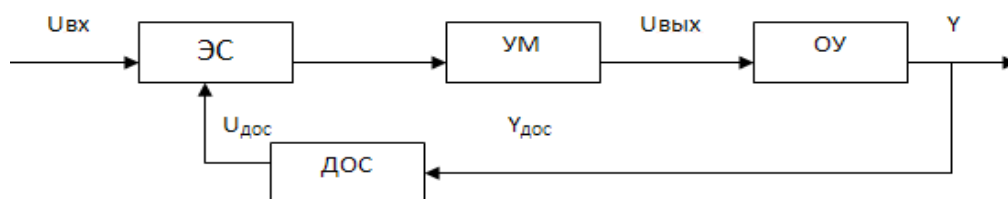


Рис. 5. Функциональная схема системы замкнутого типа
Fig. 5. Functional diagram of a closed-loop system

На данной схеме ЭС – элемент сравнения, УМ – усилитель мощности, ОУ – объект управления, ДОС – датчик обратной связи.

В предлагаемой схеме использован безынерционный усилитель мощности, имеющий зону нечувствительности $\pm U_{ВХ\max}$.

Передаточные функции ОУ (электромагнит) и ДОС (механическая система) известны:

$$W_{oy}(s) = \frac{Y(s)}{U_{вых}(s)} = \frac{K_0}{s(1+sT_a)(1+sT_e)} = \frac{0,018}{s(1+0,12s)(1+0,010s)}, \quad (3)$$

где T_a , T_B и T_c – постоянные времени,

$$K_0 = 0,018 \frac{1}{Bc}, \quad (4)$$

$$W_{дос}(s) = \frac{U_{дос}(s)}{Y_{дос}(s)} = \frac{K_{дос}}{1+sT_c}, \quad (5)$$

где

$$K_{дос} = 0,2 \frac{B}{град} = \frac{0,2 \cdot 180B}{3,14 рад} = 11,465 \frac{B}{рад}. \quad (6)$$

Структурная схема системы приведена на рис. 6.

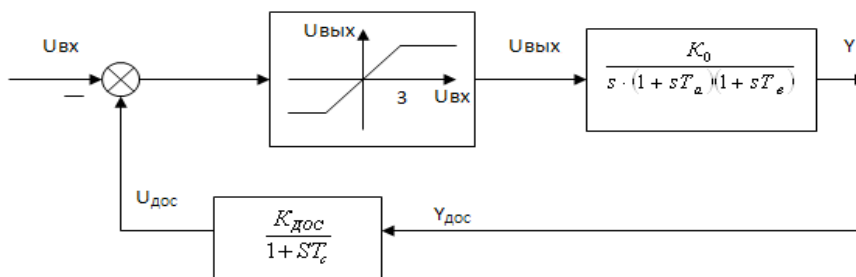


Рис. 6. Структурная схема системы
Fig. 6. Block diagram of the system

Для упрощения расчетов введем следующие допущения:

- усилитель мощности имеет линейную характеристику;
- коэффициент передачи датчика обратной связи равен единице.

С учетом введенных допущений передаточная функция усилителя мощности может быть выражена следующим образом:

$$W_{\text{ум}}(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = K_{\text{ум}}. \quad (7)$$

Напряжение на выходе усилителя 110 В, на входе ± 3 В в зоне нелинейности усилителя мощности.

$$W_{\text{ум}}(s) = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{110\text{В}}{3\text{В}} = 36,667. \quad (8)$$

Тогда получим (рис. 7) структурную схему линеаризованной системы.

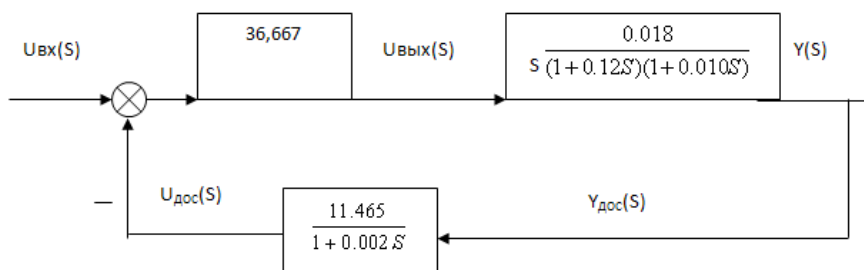


Рис. 7. Структурная схема линеаризованной системы
Fig. 7. Block diagram of a linearized system

По критерию Гурвица проверим устойчивость системы замкнутого типа. Передаточная функция системы замкнутого типа имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{K_{\text{ум}}K_0(1+T_c s)}{s(1+T_a s)(1+T_b s)(1+T_c s) + K_{\text{ум}}K_0K_{\text{дос}}}, \quad (9)$$

$$\Phi(s) = \frac{0,66(1+0,002s)}{7,567 + (1+0,002s)(1+0,12s)(1+0,010s)s}. \quad (10)$$

Запишем характеристическое уравнение системы замкнутого типа

$$7,567 + (1 + 0,002s)(1 + 0,12s)(1 + 0,010s)s = 0, \quad (11)$$

$$24 \cdot 10^{-7} s^4 + 146 \cdot 10^{-5} s^3 + 132 \cdot 10^{-3} s^2 + s + 7,567 = 0. \quad (12)$$

Известно, что условие устойчивости системы заключается в требовании положительности определителя Гурвица и всех его диагональных миноров [3], которое в нашем случае выполняется. Для подтверждения выполнения достаточного условия устойчивости в системе четвертого порядка следует проверить знак Δ_3 :

$$\Delta_3 = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4. \quad (13)$$

В результате $\Delta_3 = 0,000174191$, $\Delta_3 > 0$.

Следовательно, система замкнутого типа устойчива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Экспериментальное исследование [13, 14] силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок, проводилось по следующей схеме (рис. 8).

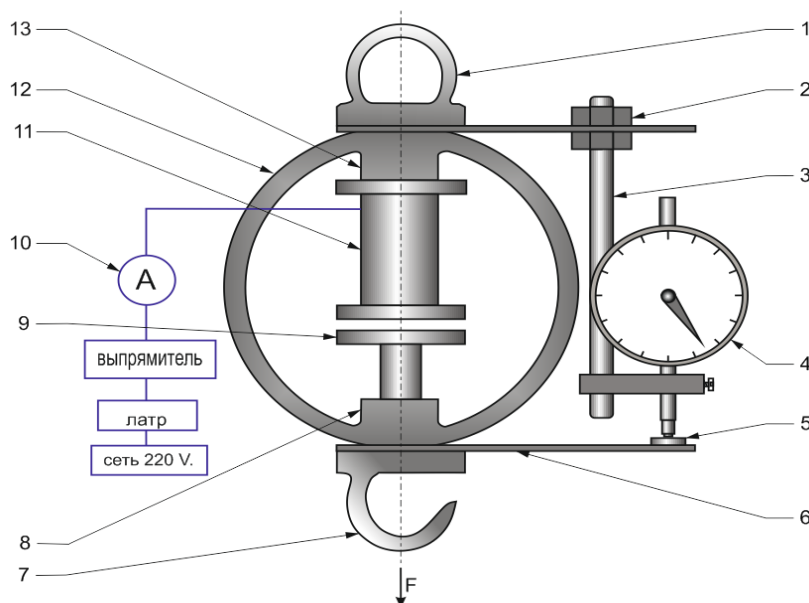


Рис. 8. Принципиальная схема стенда для исследования силоизмерительного устройства:

1 – рым-гайка крюк; 2 – гайка; 3 – приспособление для крепления микрометра; 4 – микрометр;
5 – пластина; 6 – кронштейн; 7 – рым-гайка; 8 – нижний прилив; 9 – якорь; 10 – амперметр;
11 – электромагнит; 12 – упругий чувствительный элемент; 13 – верхний прилив

Fig. 8. Schematic diagram of the stand for the study of the force-measuring device:

1 – ring nut hook, 2 – nut, 3 – clamps for mounting the micrometer, 4 – micrometer,
5 – plate, 6 – bracket, 7 – ring-nut, 8 – lower tide, 9 – anchor, 10 – ammeter,
11 – solenoid, 12 – elastic sensing element, 13 – upper tide

К раме стенда (рис. 8) жестко прикреплен с помощью рым-гайки 1 верхний прилив 13 упругого чувствительного элемента. При отсутствии деформации УЧЭ стрелка микрометра устанавливается на ноль. Нагрузка создается путем подвески груза к нижнему приливу 8 с помощью рым-гайки 7. Указанная нагрузка осуществляет взаимное смещение приливов УЧЭ, а следовательно, корпуса 12 относительно якоря 9 и основания электромагнита 11, при этом микрометр 4 фиксирует это смещение. Далее, используя переменное сопротивление (ЛАТР), на электромагнит 11 подается напряжение и возникающее электромагнитное поле начинает притягивать якорь. Микрометр 4 фиксирует перемещение упругого элемента в обратном направлении – в исходное положение. Сила тока, протекающего через электромагнит при компенсации полученной деформации, определяет значение величины этой деформации. Дискретные значения амплитуды тока компенсации внешней нагрузки контролировались типовым амперметром. Медианы выборок значений тока компенсации, полученные в результате эксперимента, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Медианы выборок экспериментов
The medians of the samples of experiments

4,9 Нм (0,5 кг)		7,4 Нм (0,75 кг)		9,8 Нм (1 кг)		12,2 Нм (1,25 кг)	
$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$	$i_{(A)}$	$\Delta_{мм}$
0	0,03	0	0,05	0	0,06	0	0,066
0,2	0,025	0,21	0,045	0,2	0,055	0,33	0,06
0,3	0,02	0,32	0,04	0,2	0,04	0,45	0,05
0,4	0,015	0,43	0,03	0,5	0,03	0,62	0,04
0,5	0,01	0,47	0,025	0,62	0,02	0,74	0,03
0,6	0,005	0,5	0,02	0,47	0,01	0,9	0,02
0,67	0	0,73	0	1	0	1,64	0

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ УЧЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ СИЛОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Эксперимент по исследованию [14, 15] силоизмерительного устройства, использующего силовую компенсацию деформации кольцевого упругого чувствительного элемента, заключался в следующем: упругое кольцо было нагружено массой, равной пяти ньютонам (5 Н), при этом была включена система компенсации деформации, использующая электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок. Для компенсации деформации УЧЭ путем силового притяжения якоря к катушке, в ней для получения требуемого электромагнитного поля понадобилось создать ток величиной 0,67 А. После того как компенсация была проведена, стрелка индикатора часового типа вернулась в исходное (нулевое) положение. Силоизмерительное устройство было оставлено в таком состоянии на два часа.

Спустя два часа индикатор часового типа получил отклонение. Чтобы вернуть его в исходное состояние, была откорректирована сила тока. Данный эксперимент [6] проводился четыре раза в день на протяжении двенадцати дней. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты измерений
Measurement results

№ exper.	i(A)	№ exper.	i(A)	№ exper.	i(A)	№ exper.	i(A)	№ exper.	i(A)
1	0,67	11	0,673	21	0,671	31	0,675	41	0,67
2	0,671	12	0,675	22	0,673	32	0,675	42	0,67
3	0,671	13	0,67	23	0,673	33	0,67	43	0,675
4	0,673	14	0,67	24	0,675	34	0,67	44	0,675
5	0,67	15	0,675	25	0,67	35	0,674	45	0,67
6	0,67	16	0,675	26	0,671	36	0,675	47	0,673
7	0,675	17	0,67	27	0,675	37	0,67	47	0,675
8	0,675	18	0,67	28	0,675	38	0,673	48	0,675
9	0,67	19	0,671	29	0,67	39	0,675	49	0,67
10	0,673	20	0,671	30	0,67	40	0,675	50	0,67

Определяем поле рассеяния

$$\omega_i = i_{max} - i_{min} = 0,676 - 0,67 = 0,07i(A). \quad (14)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкции силоизмерительных устройств, использующих силовую компенсацию деформации кольцевого упругого чувствительного элемента. В основе работы первой конструкции лежит использование поворотного постоянного магнита, угловое положение которого определяет величину силы компенсации, пропорциональной приложенной нагрузке. Основу второй конструкции составляет регулируемый гидропривод. Наконец, в основе третьей конструкции лежит электромагнитный привод. Экспериментальное исследование силоизмерительного устройства, использующего электромагнитный привод для компенсации внешних нагрузок, подтвердило его работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феликсон Е.И. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1977. 311 с.
2. Карпин Е.Б. Средства автоматизации для измерения дозирования массы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1971. 470 с.
3. Литвин Ф.Л. Справочник конструктора точного приборостроения. М.; Л.: Машиностроение, 1964. 944 с.
4. Авен О.Н., Доманицкий С.М. Бесконтактные исполнительные устройства промышленной автоматики. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 344 с.
5. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1980. 230 с.
6. Asch G. Les captures en instrumentation industrielle. Lyon, 1991. 970 p.

7. Barber J.R. Elasticity. 2nd ed. Kluwer, 2004. 431 p.
8. Ciarlet P.G. An introduction to differential geometry with applications to elasticity. Springer, 2005. 211 p.
9. Nyce David S. Linear position sensors: theory and application. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 179 p.
10. Elbestawi M.A. Force Measurement // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. 1999. Pp. 600–615.
11. Rijlaarsdam D.J. Modelling damping in linear dynamic systems. Eindhoven, 2005. 50 p.
12. Tropp U. Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgänge // NEUE Verpackung. 1975. № 1–18.
13. Дашенко А.Ф., Козинская Ю.А., Лимаренко А.С. Методика расчета упругого элемента силоизмерительного устройства // Праці Одеського політехнічного університету. 2013. Вип. 2(41).
14. Titus S.S.K. Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N / K. Jain Kamlesh, S.K. Dhulkhead, Yadav Poonam // XIX IMEKO World Congress. Lisbon, 2009.
15. Kamble V.A., Gore P.N. Use of FEM and photo elasticity for shape optimization of S type load cell // Indian Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 5, № 3 (Mar 2012).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонец Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, iv.antonec@yandex.ru.

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

Борсоева Вера Владимировна, ведущий научный сотрудник НИИ «Аэронавигация» ФГУП ГосНИИ ГА, borsoeva_vera@mail.ru.

Борисов Руслан Андреевич, аспирант кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, ruslanbor82@yandex.ru.

THE DEVELOPMENT OF DYNAMOMETRIC GAUGE CONSTRUCTIONS USING FORCE COMPENSATION OF THE ELASTIC SENSING ELEMENT DEFORMATION FROM EXTERNAL LOADS

Ivan V. Antonets¹, Vladimir A. Borsoev², Vera V. Borsoeva³, Ruslan A. Borisov¹

¹*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

²*Institute of Air Navigation, Moscow, Russia*

³*State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Force-measuring equipment is widely used in all sectors of the economy, primarily in industry. Force measurement is used to determine loads affecting operation capability of various types of equipment and their components to ensure safe operation as well as during tests and research of the systems and mechanisms. The most effective are devices consisting of an elastic element and a transducer of its deformation into an electric signal. An analysis of known force-measuring devices shows that at a large range of loads the most effective form of the elastic element is the ring. As electric transducers of deformation in similar gauges, capacity,

inductive, vibrating-wire and strain gauges are used. The disadvantages of existing devices are slow response, suitability for a narrow range of loads, low contact reliability, non-linearity. There are significant prospects of the circular type sensors development with optoelectronic signal transducers, which allows increasing significantly the efficiency, reliability and accuracy of force measurement. The compensation principle is supposed to be used in the dynamometric gauges where as a control input variable, a value of an elastic element deformation is used. The control algorithm of a compensation scheme of undesirable discrepancies of a control variable is made so that to reduce a deformation value to naught. Due to this fact, operation of a dynamometric gauge based on the principle of force compensation is carried out with a lot of accuracy. The construction of the gauge contains a sensing zero-body, an amplifier, feedback and a measuring device.

Key words: elastic sensing element, force-measurement device, deformation value, force compensation, change of deformation through time.

REFERENCES

1. **Felikson, I.E.** (1977). *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of instruments]. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 311 p. (in Russian)
2. **Karpin, E.B.** (1971). *Sredstva avtomatizatsii dlya izmereniya dozirovaniya massy* [Automation tools to measure mass dosing]. 2nd ed., revised and add. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 1971. 470 p. (in Russian)
3. **Litvin, F.L.** (1964). *Spravochnik konstruktora tochnogo priborostroeniya* [Directory of the designer of precision instrumentation]. Moscow: Leningrad: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 944 p. (in Russian)
4. **Aven, O.N. and Domanitskiy, S.M.** (1960). *Beskontaktnye ispolnitelnye ustroystva promyshlennoy avtomatiki* [Non-contact actuators of industrial automation]. Moscow: Leningrad: Gosenergoizdat, 344 p. (in Russian)
5. **Andreeva, L.E.** (1980). *Uprugie elementy priborov* [Elastic elements of devices]. Moscow: Mashinostroenie, Mechanical Engineering, 230 p. (in Russian)
6. **Asch, G.** (1991). *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Lyon, 970 p.
7. **Barber, J.R.** (2004). *Elasticity*. 2nd ed. Kluwer, 431 p.
8. **Ciarlet, P.G.** (2005). *An introduction to differential geometry with applications to elasticity*. Springer, 211 p.
9. **Nyce, David S.** (2004). *Linear position sensors: theory and application*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 179 p.
10. **Elbestawi, M.A.** (1999). *Force Measurement*. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, pp. 600–615.
11. **Rijlaarsdam, D.J.** (2005). *Modelling damping in linear dynamic systems*. Eindhoven, 50 p.
12. **Tropf, U.** (1975). *Opto-Elektronik steuert Verpackungsvorgange*. NEUE Verpackung, no. 1–18.
13. **Dashchenko, A.F., Kozinskaya, J.A. and Limarenko, A.S.** (2013). *Metodika rascheta uprugogo elementa siloizmeritel'nogo ustroystva* [Method of calculation of the elastic element of a force-measuring device]. Praci Odeskogo politekhnichnogo universitetu, OPI, iss. 2(41). (in Ukrainian)
14. **Titus, S.S.K., Kamlesh, K. Jain, Dhulkhead, S.K. and Poonam, Yadav.** (2009). *Design and development of precision artifact for dissemination of low forces of 1N and 2N*. XIX IMEKO World Congress.
15. **Kamble, V.A. and Gore, P.N.** (2012). *Use of FEM and photo elasticity for shape optimization of S type load cell*. Indian Journal of Science and Technology, vol. 5, no. 3 (Mar 2012).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Antonec, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Aeronautical Engineering, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, iv.antonec@yandex.ru.

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

Vera V. Borsoeva, Leading Researcher of the State Research Institute of Civil Aviation, borsoeva_vera@mail.ru.

Ruslan A. Borisov, Post-graduate Student of the Chair of Aeronautical Engineering, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, ruslanbor82@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13.08.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 13.08.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 658.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-105-112

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-СЕРВИСНЫХ УСЛУГ

Б.П. ЕЛИСЕЕВ¹, А.С. КАМЗОЛОВ²

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

² *Общество с ограниченной ответственностью «Айлавиа»,
г. Москва, Россия*

В статье дается краткий анализ состояний транспортной отрасли в разрезе предоставления услуг пассажирских перевозок, рассматриваются сложившиеся проблемы предприятий в условиях рыночной экономики, такие как отсутствие гарантий и ответственности поставщиков перед потребителями и наоборот (задержки и неплатежи, недобросовестные плательщики); вынужденное кредитование предприятий транспортными компаниями и агентствами, то есть использование банковских услуг в небанковском секторе; отсутствие разработанных для всех видов транспорта отечественных инвенторно-дистрибутивных систем на основе единых требований; слабость существующей системы контроля и предупреждения опасных тенденций, что приводит к кризисам на рынке, цепной реакции несостоятельности участников. В связи с этим делается обоснование создания единой системы контроля и регулирования транспортно-сервисных услуг, целями которой будут являться обеспечение контроля и мониторинга состояния предприятий и всей системы в целом, предупреждение опасных тенденций и кризисов; обеспечение обоюдных гарантий и защиты рисков как поставщиков, так и потребителей; создание единого расчетного центра; выработка критериев оценки участников рынка (рейтинги состоятельности, надежности и другие методики оценок). Все это в комплексе позволит предотвращать негативные последствия для транспортных предприятий. Рассматривается структура такой комплексной системы, необходимые подсистемы и их функционал. Предлагаются конкретные решения, реализация которых позволит построить элементы единой системы контроля на базе существующих и эксплуатируемых в отрасли инвенторных и дистрибутивных систем, а также механизм регулирования и эффективного влияния на предприятия транспортной отрасли.

Ключевые слова: система контроля предприятий транспортной отрасли, единый расчетный центр, предупреждение опасных тенденций, инвенторные и дистрибутивные системы, государственное регулирование.

ПРОБЛЕМЫ

Транспортная отрасль в нашей стране, помимо решения глобальных государственных задач, направленных на развитие регионов и обеспечения их доступности вне зависимости от удаленности, традиционно несет и большую социальную нагрузку. На это направлены различные дотационные программы, открывающие для граждан возможность получать услуги, не доступные конкретно в их регионе (например, медицинские), решать широкий круг вопросов и проблем, начиная от отстаивания своих интересов в высших органах власти и заканчивая сугубо бытовыми проблемами.

Это является одной из причин, по которой любая значимая сбойная ситуация на транспорте вызывает бурную реакцию граждан, широко и долго освещается в СМИ. В результате для решения возникшей проблемы и снижения возникающей социальной напряженности требуется задействовать государственные ресурсы, нести расходы, порой избыточные, принимать не всегда оправданные организационные и кадровые решения, привлекать другие предприятия сферы, частично перекладывая ответственность и финансовую нагрузку на них.

Наиболее яркие из примеров последних лет – это решение проблем авиакомпаний «Трансаэро», ВИМ-авиа и Саратовских авиалиний. В целом наиболее острые вопросы удалось решить, и градус напряженности был существенно снижен. Но это в первую очередь относится к проблемам рядовых граждан. Что касается предприятий, которые вели дела с проблемными авиа-

компаниями, то там положение совершенно иное. Все они вышли из сложившейся ситуации с потерями. И хотя проблема частных предприятий не является в полной мере проблемой государства, дополнительная нагрузка на бизнес является проблемой отрасли в целом, так как может являться причиной цепной реакции несостоятельности. И этого допускать никак нельзя. Пример тому – «парад банкротств» туроператоров в 2014 году, когда приходилось задействовать государственные ресурсы для возвращения наших туристов. А сколько мелких турагентств ушло с рынка в результате краха всех этих крупных компаний! И это – мелкий и средний бизнес, развитие которого уже давно является принципиальной задачей, стоящей перед государством.

Следующей проблемой отрасли, которая особенно остро проявляется в кризисные периоды, является отсутствие гарантий и ответственности как поставщиков услуг перед потребителями, так и наоборот. Особенно остро эта проблема проявляется в сегменте B2B. В первую очередь это задержки и неплатежи. Предприятиям, потребляющим услуги, как правило, требуется получение необходимого сервиса «здесь и сейчас». Оплата же требуется (и происходит) с отсрочкой, порой весьма существенной. Иногда это – главное условие сотрудничества, определяющее выбор поставщика и закрепляемое в контракте. По этой причине возникают риски обслуживания подобных предприятий, на которые приходится соглашаться в связи с высокой конкуренцией. При этом чем крупнее предприятие-потребитель, тем выше получают риски и зачастую тем сложнее обеспечивать своевременные платежи и возврат средств в критических ситуациях. Особенно если какие-то сложности испытывает само предприятие-потребитель услуг.

Помимо описанного выше риска, транспортно-сервисным предприятиям приходится сталкиваться с откровенно недобросовестными плательщиками. Таковыми являются и предприятия, периодически чрезмерно затягивающие оплату счетов, и те, кто намеренно использует высочайшую конкуренцию в сфере транспортного обслуживания и просто меняют поставщика, оставив предыдущего с незакрытыми долгами.

Отсрочка оплат оформленных услуг приводит к другой проблеме: вынужденное кредитование предприятий транспортными компаниями и агентствами. То есть мы получаем «де-факто» банковские услуги в небанковском секторе. И здесь возникает еще один важный фактор, увеличивающий риски в отрасли. Заключается он в следующем. Агентства, работающие в корпоративном (B2B) секторе, сталкиваются с тем, что перечислять денежные средства перевозчикам они обязаны регулярно: в ТКП на еженедельной основе, в BSP Russia на еженедельной основе, а при прямых договорах с перевозчиками бывают еще более строгие правила перечисления выручки и даже условия работы по предоплате. А с крупными предприятиями-потребителями расчет происходит существенно реже и может достигать 1 раза в 30, 40 и даже 60 дней. Если брать крупнейшую государственную добывающую компанию, то срок ее расчетов по контрактам достигает 90 дней. Соответственно, все ее подрядчики и субподрядчики также закрепляют в своих контрактах с обслуживающими их транспортно-сервисными предприятиями этот срок расчетов по оформленным перевозкам. Таким образом, возникает существенный «кассовый разрыв», покрывать который агентства должны за счет своих или заемных средств. Соответственно, любая ошибка в экономических расчетах или воздействие неучтенных внешних факторов может привести к тому, что очередная оплата в адрес перевозчиков не будет произведена, агентство потеряет аккредитацию и вынужденно уйдет с рынка. А это, в свою очередь, приведет к потерям средств самими перевозчиками, так как имеющиеся банковские гарантии проблемных агентств слишком часто покрывают лишь малую долю реальных потерь.

Отсрочку оплат в несколько месяцев закрепляют не только крупные коммерческие предприятия. Эта тенденция очень четко прослеживается и в государственных контрактах и тендерах. Несмотря на нацеленность подобных тендеров, как заявляется, на «закупки у субъектов малого предпринимательства и социально ориентированных некоммерческих организаций», фактически подобные предприятия исключаются из списка претендентов, в первую очередь по финансовым показателям из-за включения обязательных условий неподъемных отсрочек (30–60 дней), га-

рантий для обеспечения контрактов и сложных систем согласования актов по уже предоставленным услугам, что также удлинит процесс возврата уже затраченных на обслуживание средств. Также непонятно включение в условия тендеров некоторых требований, например наличия туроператорской лицензии, что весьма затратно, когда речь идет о предоставлении услуг по продаже перевозок и оформлению авиационных и железнодорожных билетов, т. е. для деятельности, не требующей лицензирования. Для устранения подобных перекосов также необходимы единые правила и система их учета и регулирования.

В технологическом плане есть проблемы, касающиеся уровня разработки (и даже самого существования) отечественных инвенторно-дистрибутивных систем для всех видов транспорта. И здесь важно наличие единых требований Минтранса ко всем этим системам. Разумеется, есть успешные в той или иной мере решения для авиационного, железнодорожного транспорта. Но все остальные виды транспорта требуют либо доработок, либо разработок «с нуля», чтобы быть успешно интегрированными с существующими платформенными решениями, как для их дистрибуции, так и для возможности контроля соответствующих рынков и бизнеса.

Что касается самой существующей системы контроля и предупреждения опасных тенденций, то она также требует доработок. Наиболее отстроенной она выглядит для авиационного транспорта, хотя даже здесь есть справедливая критика и претензии к ее состоятельности. Как уже отмечалось выше, есть примеры, когда система не позволяла вовремя скорректировать деятельность проблемных, при этом весьма крупных, вплоть до отраслеобразующих, предприятий. В результате происходили кризисы на рынке, что являлось причиной и приводило к несостоятельности ряда предприятий-партнеров смежного бизнеса.

Перечисленные проблемы подводят к выводу о насущной необходимости единой автоматизированной системы для всего транспорта в целом, построенной на единой платформе с едиными принципами и подходами к анализу рисков и организации бизнес-процессов, а также соответствующими рычагами управления ими.

ЦЕЛИ СИСТЕМЫ

Можно выделить ряд целей такой единой системы. Во-первых, обеспечение контроля и мониторинга состояния предприятий и всей системы в целом. В этой сфере уже есть эффективные наработки и действующие в настоящее время методы [1, 2]. Но, требуется разработка системы предупредительных мер, например, по аналогии с существующими во взаимоотношениях аккредитованных агентств и IATA. Подобный подход дает возможность предупреждения опасных тенденций и кризисов [3]. В этом случае возможно построение системы штрафных баллов, как например, в BSP/IATA. Суть его заключается в следующем: предприятия, которые не выполняют те или иные требования резолюций IATA или перестают соответствовать принятым критериям и нормам, получают штрафные баллы, а заработав 4 балла, автоматически лишаются аккредитации. Кроме того, проводятся регулярные проверки и аудит компаний также с целью выявления проблемных предприятий.

Во-вторых, система призвана обеспечить обоюдные гарантии и защитить риски как поставщиков, так и потребителей.

В-третьих, для успешного решения всего комплекса поставленных задач потребуется создание единого расчетного центра. Аналогичные центры существуют и успешно функционируют для авиационного транспорта: отечественный в ТКП и зарубежный на базе IATA. Поэтому можно использовать имеющийся опыт, но потребуется его масштабировать для охвата всех видов транспорта [4, 5].

В-четвертых, выработка критериев оценки участников рынка (рейтинги состоятельности, надежности и другие методики оценок). Здесь также можно использовать опыт подобных систем в ТКП или в IATA, но в более широком спектре критериев и оцениваемых сфер деятельности, и с учетом специфики различных видов транспорта [6, 7].

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

Построение системы контроля и регулирования транспортно-сервисных услуг является достаточно сложной задачей [8, 9]. Для ее успешного решения требуется разделить ее на ряд ключевых подсистем, в рамках которых уже решать более узкие задачи. Принципиально эти подсистемы должны быть следующими:

- финансово-контрактная подсистема;
- подсистема взаиморасчетов;
- контрольно-ревизионная подсистема;
- отчетно-статистическая подсистема;
- инвенторные подсистемы.

Для финансово-контрактной подсистемы [10] необходимо создание и внедрение математической модели контроля деятельности предприятий отрасли на основе утвержденных критериев и методик. Реализация подобной подсистемы потребует решения еще целого ряда задач, среди которых можно выделить следующие.

1. Формализация отношений поставщика и потребителя в сегменте B2B.
2. Обеспечение регистрации компаний, а также контрактов, в первую очередь ключевых, в системе. Соответственно, станет возможным контроль и мониторинг их исполнения.
3. Разграничение зон ответственности за предоставление услуг, а именно:
 - а) включение банков в качестве участников процесса при отложенных оплатах,
 - б) исключение транспортных компаний и агентств из процесса кредитования предприятий.
4. Обеспечение контроля лимитов, предоставленных компаниям и потребителям. Это требует внедрения соответствующего учета и ведения баланса.
5. Контроль бюджета и его расходования, что особенно важно для потребляющих транспортные услуги различных государственных институтов и учреждений, а также исполнителей по госконтрактам.
6. Ведение платежно-кредитной истории предприятий, ее анализ и предупреждение участников рынка при неблагоприятных тенденциях.
7. Страхование рисков для коммерческих операций и контрактов.

Подсистема взаиморасчетов, помимо своей основной задачи проведения расчетов между участниками системы, должна исполнять еще множество следующих функций.

1. Учет и контроль транзакций по услугам. Здесь необходимо разработать и внедрить побилетный учет для каждой проводимой транзакции: продажа, возврат, обмен. Подобные решения в авиационной сфере хорошо известны и используются как различными глобальными распределительными системами (ГРС), так и перевозчиками.
2. Сбор финансовой информации по оформленным услугам.
3. Выпуск документов после «одобренных» транзакций. Возможно, это потребует введения неких «кодов авторизации», что также уже было решено во многих смежных отраслях.
4. Формирование счетов, учет платежей.
5. Формирование ризон-кодов («коды причин» дают информацию о ситуации на рейсах в момент продажи и оформления билетов и обосновывают применение тарифа, особенно если он отличается от разрешенного трэвел-политикой предприятия), их подтверждение по запросу (экспертиза), выявление недобросовестных и нерыночных методов ведения бизнеса.

Функции, которые должны быть возложены на контрольно-ревизионную подсистему.

1. Одобрение транзакций по критериям финансово-контрактной подсистемы.

Это ключевая функция, которая позволяет реально воздействовать на участников рынка и регулировать процесс продажи услуг. Смысл заключается в том, что без одобренной транзакции невозможно провести продажу и оформить услугу (перевозку) или сделать изменения в уже оформленных документах (билетах). Реализация подобного функционала потребует доработок

во взаимодействии с CRS авиакомпаний и ГРС. Но в результате появится возможность как ограничивать глубину продажи при необходимости, так и накладывать другие, более «точечные» ограничения на деятельность транспортных и сервисных предприятий отрасли. Кроме того, процесс «одобрения» уже существует в авиационной отрасли, он понятен, хотя его реализация была сделана для других задач авиаперевозчиков.

2. Мониторинг контрольных значений деятельности предприятий, определенных утвержденными методиками.

3. Выявление опасных тенденций на рынке, их анализ и предупреждение.

4. Включение ограничительных мер при выходе за критические значения критериев:

а) ограничение глубины продажи (с возможностью детализации по направлениям, регионам и рынку в целом),

б) динамическое ограничение – по объему выручки.

Одним из направлений развития данной подсистемы является возможность разработки и обеспечения так называемой «трэвел-политики» применительно для госучреждений, а возможно и иных организаций. Соответственно, это позволит вести учет разрешений и правил, установленных для персонала госучреждений, контролировать бюджет расходов на поездки и в результате минимизировать расходы.

Назначение отчетно-статистической подсистемы следует из названия. Но наиболее важной ее функцией является выявление тех тенденций, которые выходят за границы традиционного поведения рынков. Именно продуманность ключевых отчетов и периодичность проводимых статистических анализов позволит своевременно реагировать на опасные изменения в отрасли.

Инвенторные подсистемы являются ключевыми составляющими системы. Именно из них получается вся первичная информация о проводимых транзакциях. Для обеспечения задачи сбора данных потребуется разработать механизмы получения данных из уже существующих ГРС. Подобные решения есть для авиационных и железнодорожных предприятий, возможно, потребуются незначительные изменения в их процессах для адаптации применительно к целям предлагаемой единой системы контроля [11]. Некоторые варианты получения необходимых данных и одобрения транзакций предложены на рис. 1. Сложнее дело обстоит с теми видами транспорта, для которых подобных инвенторных систем или нет, или они слабо развиты, не используются.

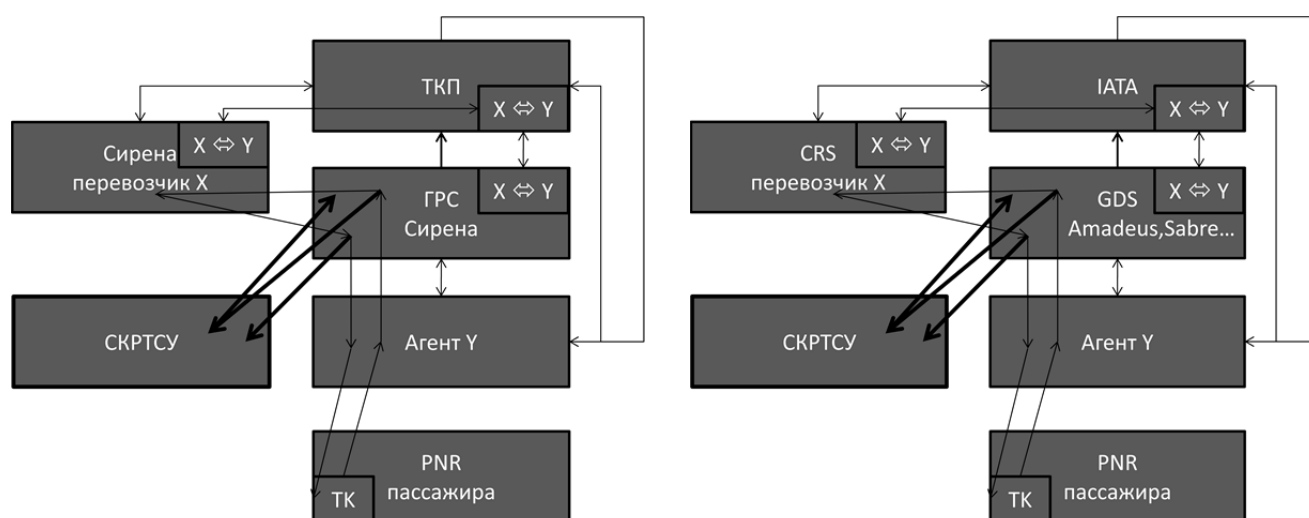


Рис. 1. Встраивание СКР ТСУ в процесс контроля продаж для ТКП и BSP IATA X – перевозчик, Y – дистрибьютор, ТК – перевозочный документ, X↔Y – соглашение перевозчика и дистрибьютора

Fig. 1. Integration of the Regulation System of Transport Services into the process of sales control for TCH and BSP IATA (X – carrier, Y – distributor, TK – transportation document, X↔Y – carrier-distributor agreement)

Таким образом, предлагаемая система контроля и регулирования транспортно-сервисных услуг является осуществимой задачей, технически реализуемой современными средствами. Результат ее внедрения позволит не только контролировать предприятия сферы и иметь эффективные рычаги воздействия, но и предупреждать опасные ситуации, которые могут критически воздействовать на все предприятия транспортной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елисеев Б.П.** Методика принятия решений по результатам анализа производственной деятельности авиакомпании / Дж. Лю, И.П. Железная, Б. Ванг // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 170–174. DOI: 10.26467/2079-0619-2015--222-170-174
2. **Фридлянд А.А., Чубукова Т.П., Кулешова Ю.Л.** Динамика отраслевого роста и финансово-экономическое состояние авиакомпаний // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 181(7). С. 130–136.
3. **Ambrož M., Korinšek J., Blaž J., Prebil I.** Integral Management of Public Transport // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. Pp. 382–391.
4. **Leendertse, W., Arts, J., Ridder, de H.** Sustainable Market Involvement in Transport Infrastructure Management // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14, № 201. Pp. 2936–2945.
5. **Albalade D., Bel G., Fageda X.** Joint versus single management of large transport infrastructures // Ocean & Coastal Management. 2013. Vol. 71, January 2013. Pp. 163–169.
6. **Konstantinos N., Giannoutakis K., Li F.** Making a Business Case for Intelligent Transport Systems: A Holistic Business Model Framework // Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal. 2012. Vol. 32, № 6. Pp. 781–804. DOI: 10.1080/01441647.2012.740096
7. **Asaul A., Malygin I., Komashinskiy V.** The Project of Intellectual Multimodal Transport System // Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 20. Pp. 25–30.
8. **Makarova I., Pachkevich A., Shubenkova K.** Ensuring sustainability of Public Transport System through Rational Management // Procedia Engineering. 2017. Vol. 178. Pp. 137–146. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.078
9. **Шубенкова К.А.** Система поддержки принятия решений как элемент региональной транспортно-логистической системы // Сб. трудов международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии в управлении транспортно-логистическими системами». Казань, 2011. С. 152–156.
10. **Niculescu M.-C., Minea M.** Developing a Single Window Integrated Platform for Multimodal Transport Management and Logistics // Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. Pp. 1453–1462.
11. **Potkanova T., Durisova M.** Specificities Identification of Value Management of Companies Providing Transport Services // Procedia Engineering. 2017. Vol. 192. Pp. 725–730.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Елисеев Борис Петрович, доктор юридических наук, доктор технических наук, профессор, ректор МГТУ ГА, info@mstuca.aero.

Камзолов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, коммерческий директор ООО «Агентство «Айлавиа», akamzolov@hotmail.com.

THE CONCEPT OF CONSTRUCTING A SYSTEM OF CONTROL AND REGULATION OF TRANSPORT SERVICES

Boris P. Eliseev¹, Alexander S. Kamzolov²

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

²*Agency Ailavia LLC, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article gives a brief analysis of the transport industry condition in the context of the provision of passenger transportation services, considers the existing problems of enterprises in the market economy conditions such as: the lack of guarantees and responsibility of suppliers to consumers, and vice versa (delays and non-payments, defaulters); forced lending to enterprises by transport companies and agencies, that means the use of banking services in the non-banking sector; the lack of developed for all types of transport domestic inventory and distribution systems based on the uniform requirements; the weakness of the existing system of control and prevention of dangerous trends, which leads to crises in the market and the chain reaction of insolvency of the participants. In this regard the article proves the justification for the creation of a unified system of control and regulation of transport services, aimed at providing control and monitoring of the conditions of the enterprises and the system as a whole, preventing dangerous trends and crises; providing mutual guarantees and protection of risks of both suppliers and consumers; creating a universal payment center; development of criteria for assessing market participants (ratings of solvency, reliability and other assessment methods). All this taken together will prevent negative consequences for transport companies. The structure of such a complex system, necessary subsystems and their functionality are considered. Specific solutions are proposed, whose implementation will allow constructing elements of a single control system on the basis of existing and operating in the industry inventory and distribution systems, as well as the mechanism of regulation and effective impact on the transport industry enterprises.

Key words: control system of the transport industry enterprises, a universal payment center, prevention of dangerous trends, inventory and distribution systems, governmental regulation.

REFERENCES

1. Eliseev, B.P., Lyu Dzh., Zheleznaya, I.P. and Wang, B. (2015). *Metodika prinyatiya resheniy po rezul'tatam analiza proizvodstvennoy deyatel'nosti aviakompaniy* [Decision-Making Methods Based On The Analysis Of Airline operation]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 222, pp. 170–174. DOI:10.26467/2079-0619-2015--222-170-174 (in Russian)
2. Fridlyand, A., Chubukova, T. and Kuleshova, Y. (2012). *Dinamika otraslevogo rosta i finansovo-ekonomicheskoe sostoyanie aviakompaniy* [Dynamics of industry growth and financial and economic condition of airlines]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 181(7), pp. 130–136. (in Russian)
3. Ambrož, M., Korinšek, J., Blaž, J. and Prebil, I. (2016). *Integral Management of Public Transport*. Transportation Research Procedia, vol. 14, pp. 382–391.
4. Leendertse, W., Arts, J. and Ridder, de H. (2016). *Sustainable Market Involvement in Transport Infrastructure Management*. Transportation Research Procedia, vol. 14, pp. 2936–2945.
5. Albalade, D., Bel, G. and Fageda, X. (2013). *Joint versus single management of large transport infrastructures*. Ocean & Coastal Management, vol. 71, January 2013, pp. 163–169.
6. Konstantinos, N., Giannoutakis, K. and Li, F. (2012). *Making a Business Case for Intelligent Transport Systems: A Holistic Business Model Framework*. Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal, vol. 32, no. 6, pp. 781–804. DOI: 10.1080/01441647.2012.740096
7. Asaul, A., Malygin, I. and Komashinskiy, V. (2017). *The Project of Intellectual Multi-modal Transport System*. Transportation Research Procedia, vol. 20, pp. 25–30.
8. Makarova, I., Pashkevich, A. and Shubenkova, K. (2017). *Ensuring Sustainability of Public Transport System through Rational Management*. Procedia Engineering, vol. 178, pp. 137–146. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.078

9. Shubenkova, K. (2011). *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy kak element regionalnoy transportno-logisticheskoy sistemy* [The system of decision-making support as an element of regional transport and logistics system]. Proceedings of the International scientific and practical conference "Modern information technologies in the management of transport and logistics systems". Kazan, Russia, pp. 152–156. (in Russian)

10. Niculescu, M.-C. and Minea, M. (2016). *Developing a Single Window Integrated Platform for Multimodal Transport Management and Logistics*. Transportation Research Procedia, vol. 14, pp. 1453–1462.

11. Potkanova, T. and Durisova, M. (2017). *Specificities Identification of Value Management of Companies Providing Transport Services*. Procedia Engineering, vol. 192, pp. 725–730.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris P. Eliseev, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Juridical Sciences, Professor, Rector of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, info@mstuca.aero.

Alexander S. Kamzolov, Candidate of Technical Sciences, Commercial Director in "Ailavia" LLC Agency, akamzolov@hotmail.com.

Поступила в редакцию 14.07.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 14.07.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК: 338.22.021.1

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-113-123

SOME ASPECTS OF AVIATION SERVICE MARKET

A.V. PARKHIMOVICH¹

¹*AppleRetai, Vienna, Austria*

The present day globalization in economy is closely connected with the development of air transport-one of the fastest growing sectors of economy, which provides long-distance transport, primarily to passengers. The mobility of population has increased and as a consequence the single transport space has been formed. After the crisis of 2015–2016 the economy of civil aviation is characterized by the rapid growth, increased passenger turnover, a high percentage of seat occupancy and the change in the structure of the air transportation market. The state of the air transportation market is characterized by globalization, deregulation, information and privatization. The services which air companies offer to the market are related to a high-tech product. At the same time, modern conditions require airlines to take measures to improve their performance, taking into account the internal and external factors affecting this business, as well as a set of incentive measures for workers in this industry. Thus, the article discusses the process of industry deregulation, gives several examples of market functioning models, highlights their main characteristics and shows options for making managerial decisions. Efficiency evaluation is a prerequisite condition for the implementation of airline development strategies. The principles of market economy required the restructuring of relations in distributive system and material incentive. In this regard, we summarize the experience of several labor remuneration decisions, as an integral part of airline management. The article gives an overview of the modern air transportation market characteristics, identifies the problems and prospects for its development. The relevance of the article is stipulated by the expanded presence of airlines in the world market and, as a consequence, by the necessity to investigate the up-to-date trends in market development, exposure the main factors that affect the competitiveness of air companies. The article is of interest for aviation experts as well as for readers who are keen on aircraft.

Key words: airline, cargo, innovation, passengers, flights, market, transport, efficiency.

INTRODUCTION

In the present day conditions of globalization in the basic processes of social and economic life of mankind, the possibility of rapid movement for people and cargo for long distances to various places, including the remotest destinations of the world, makes the air transportation market one of the most promising and dynamic transport markets.

The development of aviation has led to the increase in mobility of population and to the decrease of distances between different regions of the world. The service of single transport, finance, telecommunication and production has been formed. Due to these changes, airlines must timely modify and improve their work efficiency, revise the organizing mechanism of the enterprise economic life, re-think the conceptual approaches, and change the business model itself.

MODELS OF AIR TRANSPORTATION MARKET

There are three main models of the passenger air transportation market: paternalistic, liberal and mixed. By the paternalistic model we understand large airlines controlled by the state. The examples are countries such as: Thailand, Singapore, UAE, Finland, and China. By the liberal model we observe the state provided free competition and the state itself does not interfere in the economic activities of airlines.

Russia, Italy, Malaysia, etc. adhere to the principles of market competition and consequently, implement a mixed model. The market of air passenger transportation in these countries is characterized by the fact that the state, as a rule, owns the controlling stake in the airline and affects its production activities, restraining competition.

AIR TRANSPORT MANAGEMENT

The efficiency of the airline in the management of passenger traffic is considered when we take into account the development trends of the air transportation industry: the expansion of the air transportation market including the tourist segments of the market; Erasing the boundaries between regular and charter airlines; growth of costs (aircraft-engine fleet, control and transportation control systems). The current state of the market is characterized by: globalization; deregulation; informatization; privatization.

MOTIVATION OF STAFF

For effective functioning of the airline, it is necessary to use every employee's diversity for his psycho-physiological and motivational potential. In Russia, nowadays, grading is widely used (evaluation of the employee by his rank in the company). In Sweden, for example, equal pay for equal work is established. In Japan, two rates are used: personal (based on seniority and age of employees) and labor (depending on the qualification and performance of work). The system of individualization of wages is applied in France. The UK implemented the system of payment for individual contracts. In the US, the combination of piecework and time systems, applicable collective bonus systems are often available, individual enterprises apply the system of labor remuneration, in which the increase depends on the growth of skills and the number of professions mastered.

Pilots are the most expensive specialists in the labor market in terms of price/ labor ratio. The average monthly salary of the captain of foreign types of aircraft in 2016 amounted to: in the US – from \$11 to \$33 thousand; in Europe – about 7 thousand euro; in Turkey – about 3,5 thousand euro, but additional compensations are paid; in Russia – from \$5 to \$10 thousand; China – up to \$29 thousand. The salary of pilot flying in the low-cost companies is more modest. For example, in Jet Blue it is about \$7.7 thousand¹.

ECONOMIC INDICATORS

The airline, having a set of basic economic indicators, conducts a comparative analysis which is the basis for management decisions made. However, the structure of the operating costs for airlines flying along long-haul routes and airlines serving routes of short distances is very different. The strategy of enterprises is also different. A number of airlines perform a significant share of technical maintenance of an aircraft engineering on their own, have their own handling units, others, turn to service-oriented companies.

Accordingly, the structure of income and expenses in airlines differs from each other. The economic indicators used are: the number of passengers carried, the volume of traffic carried, the number of aircraft and motor fleet, etc. One of the indicators of the airline's efficiency is the ratio of the result achieved to the investments in personnel.

EFFICIENCY OF AIRLINES

It is important for the airline to monitor performance in comparison to other air carriers. Carrying out a comparative analysis, managers work in the direction which is aimed at the airline performance improvement. The efficiency of functioning including technical, economic and financial

¹ Сколько получают пилоты крупнейших мировых авиакомпаний [Электронный ресурс] // РБК. Режим доступа: <https://www.rbc.ru/photoreport/15/06/2017/5941b2459a7947d315cafd45> (дата обращения: 24.08.2018).

indicators is determined by the DEA method (data envelopment analysis) [13]. With the help of this method, the limits of the airline production capabilities are built, and their effectiveness is estimated. The evaluation of functioning efficiency is a prerequisite for the development and implementation of the airline development strategies. Evaluation of airlines efficiency is important from the position of shareholders, investors, and the society as a whole.

CHARACTERISTICS OF THE AIR TRANSPORTATION MARKET

We are going to analyze the development of air transportation world market in the past 5 years. Freight air transport, the volume of cargo, express and diplomatic mail, transported at each stage of the flight (starting from take off of the aircraft to the next landing), are measured in metric tons multiplied by the number of kilometers traveled. Figure 1² shows the dynamics of air cargo transportation performed by the world transportation leaders.

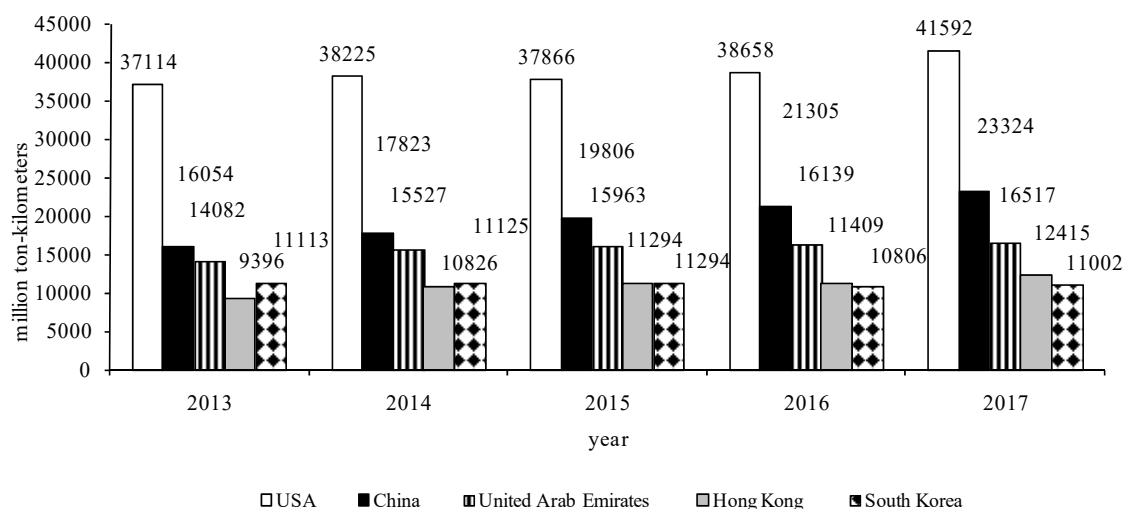


Fig. 1. Air cargo transported by world leaders in 2013–2017, million tons-km

Looking at the volume of air cargo we see that the world leaders in transportation are the United States, China, the United Arab Emirates, Hong Kong, South Korea. If we compare years 2017 and 2013, we can see that the indicators increased by 12–45% for all countries except South Korea (a decrease of 1%). The decrease in freight traffic was noted in the United States in 2015 and in South Korea in 2016. In the remaining periods, all the surveyed countries had an increasing rate of air cargo transportation.

The US is the leader. In recent years, the US market has shown moderate growth, due to its maturity. The growth of transportation in the region is facilitated by the favorable economic situation and economic growth of the country [16, p. 78]. Passenger air transportation is shown in Figure 2². The amount of passengers transported by airplanes includes both domestic passengers and passengers of international air carriers registered in the country.

² Воздушный транспорт [Электронный ресурс] // Мировой атлас данных. Режим доступа: <https://knoema.ru/atlas/topics/Транспорт> (дата обращения: 24.08.2018).

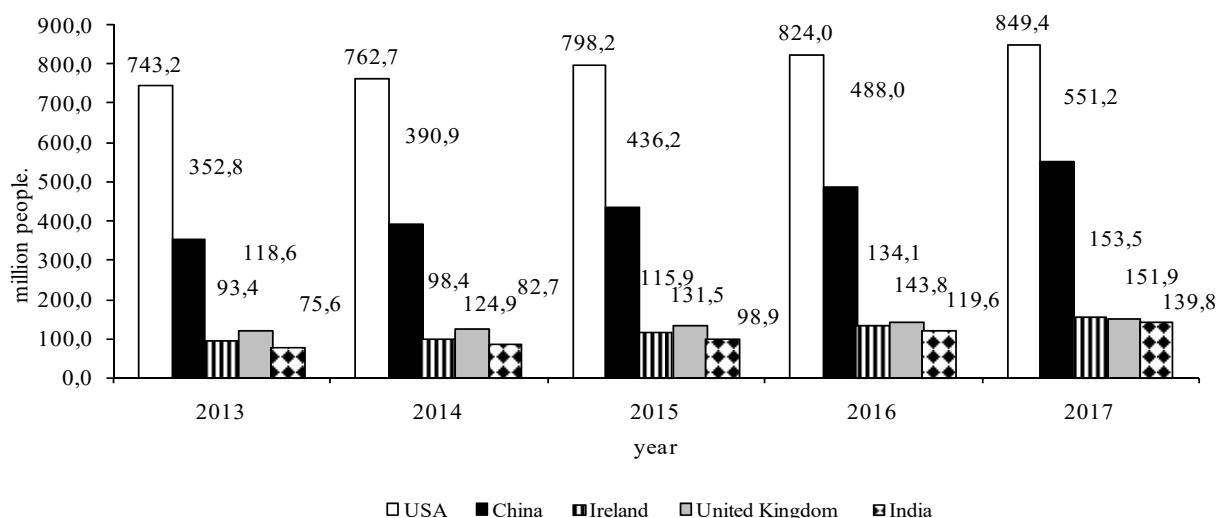


Fig. 2. Dynamics of passenger transportation by air transport performed by world leaders in 2013–2017, mil

For all the leading countries there has been an increase in the rate of passengers transported by air over the past 5 years. At the moment, the undisputed leader in terms of passenger traffic – is the United States. The country shows a high rate due to the great intensity of domestic traffic to the extensive areas, the relatively even location of large cities in the eastern part of the country, as well as a high degree of mobility of the population.

The dynamics of the world's passenger flow is presented in Figure 3².

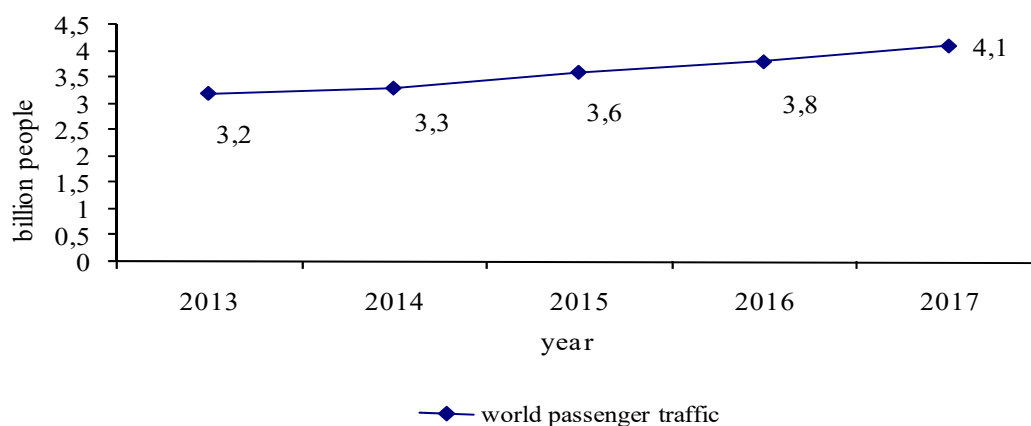


Fig. 3. Dynamics of world passenger traffic in 2013–2017, billion people

It is evident that the world passenger flow increases annually. The main factors that influenced the world demand dynamics in 2017 (8% growth) were the following two – gradual growth in demand from the countries of the East and the continued collapse of oil prices, which led to the decline in fuel prices and the cost of flights.

The dynamics of the registered take-offs of air transport will be studied in Figure 4². The number of registered take-offs of air transport is the domestic and foreign flights that have been registered in the country.

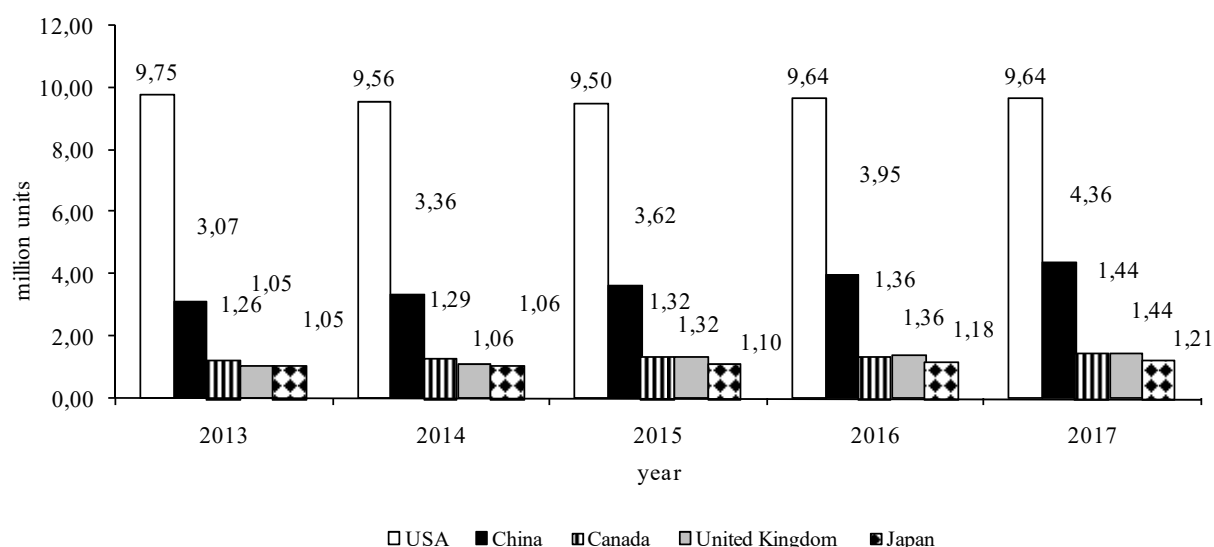


Fig. 4. Dynamics of the registered air transport take-offs of world leaders in 2013–2017, million units

All the countries surveyed, with the exception of the United States, recorded the annual increase in the rise of air transport, and the US had only growth in 2016 (although it is the largest in the world, the US remains the leader). We will analyze the main indicators of civil aviation in the Russian Federation in Table 1³.

Table 1

Analysis of the main indicators of civil aviation in the Russian Federation in 2013–2017

Indicators	2013 Yr.	2014 Yr.	2015 Yr.	2016 Yr.	2017 Yr.	From 2017 to 2013
Dynamics of passenger traffic in the country, billion pass. km.	225,2	241,4	226,8	215,6	259,4	34,2
Dynamics of cargo turnover in the country, thousand tkm	5011591	5151564	5450618	6579350	7591534	2579942
Passenger transport volume, mln.	85	93	92	89	105	20

The freight turnover in the country increased annually over the last 5 years. Such indicators as passenger traffic and passenger transportation increased in 2014 and 2017 and declined in 2015–2016. In general, the contraction of the air transportation market in 2015–2016 was due to both the general economic decline, the decrease in real incomes of the population and the devaluation of the ruble, which led to the rise of air tickets cost and holidays abroad, as well as a number of external factors unrelated to the economy. In particular, the shock to the Russian air transportation market was the cessation of air travel between Russia and Egypt and the suspension of almost for a year the charter flights

³ Key performance indicators of civil aviation [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта. Режим доступа: <https://www.favt.ru> (дата обращения: 24.08.2018).

with Turkey⁴. At the same time, it was Turkey and Egypt that together accounted for about 40% of the organized outbound tourist flow from Russia [11, p. 185]. The maximum decrease in the number of passenger air travel was achieved in 2016, when the decline was 4%. There have been major changes during these years: a decrease in real incomes of population, partial reorientation to domestic tourism. But in just 2017, the airline market was marked by a large increase by 19%, because of: deferred demand; strengthening of the ruble, which had a positive impact on international flights; the growth of domestic resort flights, flight resumption with Turkey and partially with Egypt, the increase of the low-cost airlines flights share by 30% and a 7% decrease in prices due to the refusal of carrying baggage and elimination of catering on board. It is possible to analyze the dynamics in the number of passengers carried by the largest companies of the Russian Federation in 2013–2017 in Table 2⁵.

Table 2

Dynamics in the number of passengers carried by the largest companies
of the Russian Federation in 2013–2017, mil

Name of airline	2013 Yr.	2014 Yr.	2015 Yr.	2016 Yr.	2017 Yr.	From 2017 to 2013
Aeroflot–Russian Airlines	20,9	23,61	26,11	28,98	32,85	12
Russia	4,6	5,2	4,75	8,1	11,15	7
Siberia	7,1	7,9	8,2	9,5	9,95	3
UralAirlines	4,4	5,1	5,4	6,47	8	4
"UTairAviationCompany	8,2	8,56	5,5	6,65	7,3	–1
Transaero	12,5	13,2	11,2	0	0	–13
The share of 5 airline-leaders in terms of the number of passengers carried from the total volume of civil aviation, %	63	62,8	61,4	67,4	65,9	3

The past 5 years showed a rapid growth among the following airlines: Aeroflot, Russia, Siberia (S7), Ural Airlines. The share of the 5 leading airlines in terms of the passenger number carried has also increased by 3 percent from the total volume of civil aviation. At the same time, 85–90% of Russian carriers are weak in terms of their material base, financial capabilities and other indicators. The remaining 10% of airlines account for a greater number of air traffic, for example, such leaders as Aeroflot, UTair, Siberia, etc. [10, p. 58].

The Russian air service market is characterized by a differentiated oligopoly: the presence of several large airlines, differentiation of products (on the time of flight departure, on the quality of service on board, on advertising campaigns, etc.) [1, p. 19].

PROBLEMS AND PROSPECTS OF AVIATION SERVICES MARKET DEVELOPMENT

The total volume of the results shown by the Russian airlines differs significantly from the results of the world's leading air carriers (American Airlines, United Airlines and Delta Air lines, Turk-

⁴ Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/14861.pdf> (дата обращения: 24.08.2018).

⁵ Passenger transportation [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта. Режим доступа: <https://www.favt.ru> (дата обращения: 24.08.2018).

ish Airlines, Lufthansa, Air France and British Airways, Qatar Airways) as much as dozens of times (according to profits, number of passengers carried, etc.), Russian airlines also loose in the quality and diversity of services and customer services, in terms of technical equipment, frequency of flights, the number of routes in certain directions, etc.

Despite the number of undeniable advantages of Russian air carriers (low tariffs for international flights, the efficiency of the route network, the successful geographical location of Russia, linking Europe and Asia), there are different points of view and a number of shortcomings and problems in the market of aviation services.

Kholopov K.V. and Sokolova O.V. think that in terms of cargo transportation, Russian transport companies have poorly organized transportation process; there are too many air carriers on the routes [14, p.119]. Nikiforova N.Y.U. believes that most Russian transport companies need to upgrade their fixed assets. The existing problem is particularly related to airlines [9, p. 124]. In Russia, about 80% of air travel is from Moscow, to Moscow or through Moscow [6, p. 189]. Jamay E.V. and Demin S.S. think that the development of air transportation market in the country is hindered by the insufficient development of the airport infrastructure in some regions of the country [4].

Another problem is the lack of investment. Today, the main pusher of transport infrastructure development sector is public investment in various targeted programs, including private investment which is also important for the successful development of transport infrastructure⁶.

According to Khryseva A.A. and Chekalova A.A. it is necessary to increase attention to the development of safety management systems for aircraft, develop regional and local airports and widely introduce IT technologies [15, p. 54].

Toporkov A.M. believes that it is necessary to develop the Russian domestic aviation industry in such areas as modernization of aircraft industry complex technological base; formation of a full cycle development and production of civil aircraft; improvement of lending mechanisms for the supply of domestic aviation equipment and the aviation leasing system; improvement of state regulation and corporate management system in aviation industry; formation of a large-scale long-term program for state purchases of aviation equipment [12].

In order to increase the profitability of Russian airlines, it is necessary to optimize costs through energy-efficiency programs, including methods like updating the fleet of aircraft; creating loyalty programs; increasing the motivation and qualification of staff [2].

Danilin A.A. considers that it is necessary to reduce the rate of value added taxes on the transportation of national airlines within Russia; create the conditions for the acquisition of domestic aircraft (interest rate financing, soft loans and loans, subsidies) by Russian air carriers; improve the regulations and standards for luggage transportation, registration of passengers, in general, the provision of services by Aeroflot [3].

According to the opinion of Matveeva AV and Maltsev AA. the development of low-cost airlines will accelerate the dynamics of world passenger traffic [8, p. 80].

Problems in the low-cost passenger air transportation market in Russia require special attention. At present we can only see "Pobeda" airline in the segment of domestic low-cost airlines while several years before there were SkyExpress, "Avianova", "Dobrolet" airlines [5, p. 176].

Matveeva A.V. believes that an effective mechanism for the development of local and regional passenger air travel in Russia lies in the development of low-cost airlines and the formation of low-cost units [7].

⁶ Обзор российского транспортного сектора в 2016 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ru/pdf/2017/04/ru-ru-transport-survey.pdf> (дата обращения: 24.08.2018).

CONCLUSION

The globalization of economy has significantly changed the structure of air transportation and increased the requirements for the efficiency of transport systems. This article provides an opportunity to visualize a number of hidden problems that enable the state and the leadership of airlines to concentrate their efforts on such measures that will improve the overall indicators.

The current state of the aviation services industry, taking into account the high-tech nature of its development, involves all kinds of innovations. It is necessary to renew fixed assets, increase investment, develop airport infrastructure, introduce IT technologies, and increase flight safety.

The further development of aviation services market in Russia, the development of domestic aviation industry, the increase in low-cost units (low-budget air passenger services), the development of regional and local airports, and the improvement of airline taxations is necessary.

Taking into account the experience of leading airlines, it is necessary to raise the salaries of the airline personnel, to improve aviation services: to create loyalty programs, to promote sales through mobile applications, to improve the comfort of flights (comfortable seats, interesting entertainment, USB connectors, the use of headphones with noise reduction, flexible configuration of seats in the cabin, the possibility of organizing on-board business meetings, etc.).

The authors used scientific and analytical works of scientists specializing in aviation transport issues, as well as the Internet materials.

The recommendations given in the article can be used at different levels of the airlines management decision process.

REFERENCES

1. **Bogomolov, E.V.** (2015). *Proyavlenie oligopolii na rynke passazhirskikh aviaperevozok v Rossii* [Manifestation of oligopoly in the market of passenger air transportation in Russia]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], no. 4, pp. 19–21. (in Russian)
2. **Voropaeva, L.N.** (2018). *Prakticheskie aspekty povysheniya effektivnosti deyatel'nosti aviakompaniy* [Practical aspects of increase of efficiency of activities of the airlines]. *Voprosy ekonomiki i prava* [Questions of economy and law], vol. 3, no. 117, pp. 57–66. (in Russian)
3. **Danilin, A.A.** (2018). *Sovremennye problem passazhirskikh aviaperevozok v Rossii: prerogative gosudarstva i otrasli* [Modern problems of passenger air transportation in Russia: the prerogative of the state and industry] [Electronic resource]. *Federalnyy tsentr nauki i obrazovaniya Evensiss* [Federal Center for Science and Education]. URL: <http://evansys.com/articles/ekonomika-i-menedzhment-sovremennyy-vzglyad-na-izuchenie-aktualnykh-problem-sbornik-nauchnykh-trudov/seksiya-2-ekonomika-i-upravlenie-narodnym-khozyaystvom-sovremennye-problemy-passazhirskikh-aviaperevozok-v-rossii-prerogativa-gosudarstva-i-otrasli/> (accessed 24.08.2018). (in Russian)
4. **Jamay, E.V. and Demin, S.S.** (2018). *Analiz tekushchikh tendentsiy i prognoz razvitiya otechestvennogo rynka grazhdanskoy aviatsionnoy tekhniki* [Analysis of current trends and forecast of development of the domestic market of civil aircraft] [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tekushchikh-tendentsiy-i-prognoz-razvitiya-otchestvennogo-rynka-grazhdanskoy-aviatsionnoy-tehniki> (accessed 24.08.2018). (in Russian)
5. **Zagaynova, E.V.** (2017). *Model dinamicheskogo tsenoobrazovaniya na rynke passazhirskikh aviaperevozok* [Model of dynamic pricing in the market of passenger air transport]. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [Journal of Economic Theory], no. 4, pp. 176–182. (in Russian)
6. **Kirov, I.V. and Sorokina, E.O.** (2017). *Analiz rynka passazhirskikh aviaperevozok v Rossii (1990–2016 gg.)* [Analysis of the passenger market in Russia (1990–2016)]. *Science Time*, no. 1(37). pp. 189–196. (in Russian)

7. **Matveeva, A.V.** (2018). *Razvitie mestnikh i regionalnikh napravleniy, kak osnova rosta rossiyskogo rynka passazhirskih aviaperevozok* [Development of local and regional directions as a basis for the growth of the Russian market of passenger air transport] [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-mestnyh-i-regionalnyh-napravleniy-kak-osnova-rosta-rossiyskogo-rynka-passazhirskih-aviaperevozok> (accessed 24.08.2018). (in Russian)
8. **Matveeva, A.V. and Maltsev, A.A.** (2017). *Loukostery kak vector dinamichnogo razvitiya mirovogo rynka aviaperevozok* [Low-cost Airlines as a vector of dynamic development of the world air transport market]. Russian foreign economic Bulletin, no. 8, pp. 80–91. (in Russian)
9. **Nikiforova, N.Yu.** (2017). *Analiz problem finansovo-khozyaystvennoy deyatel'nosti aviakompaniy (na primere AO «Polyarnye avialinii»)* [Analysis of the problems of financial and economic activity of airlines (for example, JSC "Polar airlines")]. *Prorivnye nauchnye issledovaniya: problemy, zakonomernosti, perspektivy: sb. statey VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Breakthrough research: problems, patterns, prospects. Collection of articles of the VIII International scientific-practical conference], pp. 124–127. (in Russian)
10. **Prokopenko, A.I.** (2015). *Konkurentnaya sreda na rynke aviaperevozok i ee formirovaniye* [Competitive environment in the market of air transportation and its formation]. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii: po materialam IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Belgorod, 31 dekabrya 2015 g.* [Modern trends in the development of science and technology], vol. 9, no. 5, pp. 58–62. (in Russian)
11. **Sukhovey, O.N.** (2016). *Razvitie rynka aviaperevozok* [Development of the air transportation market]. *Simvol nauki* [Symbol of science], vol. 11, no. 11–1, pp. 185–187. (in Russian)
12. **Toporkov, A.M.** (2018). *Sravnitel'nyy analiz razvitiya mezhdunarodnykh i otechestvennykh korporatsiy aviatsionnoy promyshlennosti* [Comparative analysis of the development of the international and domestic corporations of the aviation industry] [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'nyy-analiz-razvitiya-mezhdunarodnyh-i-otechestvennykh-korporatsiy-aviatsionnoy-promyshlennosti> (accessed 24.08.2018). (in Russian)
13. **Tuturov, S.A. and Nachev, M.V.** (2018). *Otsenka effektivnosti deyatel'nosti aviakompanii i ee rastushchie puti* [Estimation of efficiency of activity of the airline and its growing the way] [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-deyatelnosti-aviakompanii-i-puti-ee-povysheniya> (accessed 24.08.2018). (in Russian)
14. **Kholopov, K.V. and Sokolova, O.V.** (2017). *Sovremennye faktory i tendentsii razvitiya mezhdunarodnykh rynkov passazhirskikh i gruzovikh vozdukhnykh perevozok i mesto Rossii na rynkakh aviauslug* [Current factors and trends in the development of international markets of passenger and freight air transport and the place of Russia in the markets of air services]. Russian foreign economic Bulletin, no. 6, pp. 119–129. (in Russian)
15. **Khryseva, A.A. and Chekalova, A.A.** (2017). *Prioritetnye napravleniya sovershenstvovaniya uslug aviakompaniy na rynke passazhirskikh aviaperevozok* [Priorities for improving services of the airlines in the passenger airline market]. *Izvestiya VSTU, Ser. Actual problems of reforming russian economy (the theory, practice and perspective)* [News of Volgograd state technical University], no. 7(202), pp. 54–57. (in Russian)
16. **Shepelev, D.R.** (2016). *Rynok aviaperevozok v usloviyakh krizisa* [Air transportation Market in crisis]. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire* [Fundamental and applied research in the modern world], vol. 13, no. 2, pp. 78–81. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Anton V. Parkhimovich, Master Degree, Specialist, Apple Retail Vienna, Austria.
antonparkhimovich@gmail.com.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЫНКА АВИАЦИОННЫХ УСЛУГ

А.В. Пархимович¹

¹Apple Retail, г. Вена, Австрия

Нынешняя глобализация мировой экономики тесно связана с развитием воздушного транспорта, который является одной из самых быстрорастущих отраслей экономики, обеспечивая дальние перевозки, прежде всего пассажиров. Повысилась мобильность населения, образовалось единое транспортное пространство. Экономика гражданской авиации после кризиса 2015–2016 годов характеризуется быстрым ростом, увеличением пассажирооборота, высоким процентом занятости кресел, изменением самой структуры рынка авиаперевозок. Состояние рынка авиаперевозок характеризуют глобализация, дерегулирование, информация, приватизация. Выставляемые авиакомпаниями на рынок услуги относятся к высокотехнологичному продукту. В то же время современные условия требуют от авиакомпаний принятия мер для повышения их эффективности функционирования с учетом внутренних и внешних факторов, воздействующих на этот бизнес, а также комплекса мер стимулирования труда работников отрасли. Рассмотрены процессы дерегулирования отрасли, приведены некоторые примеры моделей функционирования рынка, выделены их основные характеристики, показаны некоторые варианты принятия управленческих решений. Оценка эффективности – необходимое условие реализации стратегий развития авиакомпаний. Принципы рыночной экономики потребовали перестройки системы распределительных отношений и материального стимулирования. В этой связи обобщен опыт ряда решений в области оплаты труда как составной части управления авиапредприятием. В статье дан обзор характеристик современного рынка авиаперевозок, выявлены проблемы и перспективы развития. Актуальность статьи обусловлена расширением присутствия авиакомпаний на мировом рынке и, как следствие, необходимостью исследования современных тенденций развития рынка, выявления основных факторов, определяющих конкурентоспособность авиакомпаний. Статья представляет интерес как для специалистов в области авиации, так и для читателей, интересующихся авиационной тематикой.

Ключевые слова: авиакомпания, грузоперевозки, инновации, пассажиры, перелеты, рынок, транспорт, эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богомолов Е.В.** Проявление олигополии на рынке пассажирских авиаперевозок в России // Транспортное дело России. 2015. № 4. С. 19–21.
2. **Воропаева Л.Н.** Практические аспекты повышения эффективности деятельности авиакомпаний // Вопросы экономики и права. 2018. № 3(117). С. 57–66.
3. **Данилин А.А.** Современные проблемы пассажирских авиаперевозок в России: прерогатива государства и отрасли [Электронный ресурс] // Федеральный Центр науки и образования Эвенсис. Режим доступа: <http://evansys.com/articles/ekonomika-i-menedzhment-sovremennyy-vzglyad-na-izucheniye-aktualnykh-problem-sbornik-nauchnykh-trudov/sektsiya-2-ekonomika-i-upravlenie-narodnym-khozyaystvom-sovremennyye-problemy-passazhirskikh-aviaperevozok-v-rossii-prerogativa-gosudarstva-i-otrasli/> (дата обращения: 24.08.2018).
4. **Джамай Е.В., Демин С.С.** Анализ текущих тенденций и прогноз развития отечественного рынка гражданской авиационной техники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tekuschiy-tendentsiy-i-prognoz-razvitiya-otechestvennogo-rynka-grazhdanskoy-aviatsionnoy-tehniki> (дата обращения: 24.08.2018).
5. **Загайнова Е.В.** Модель динамического ценообразования на рынке пассажирских авиаперевозок // Журнал экономической теории. 2017. № 4. С. 176–182.
6. **Кирова И.В., Сорокина Е.О.** Анализ рынка пассажирских авиаперевозок в России (1990–2016 гг.) // Science Time. 2017. № 1(37). С. 189–196.
7. **Матвеева А.В.** Развитие местных и региональных направлений как основа роста российского рынка пассажирских авиаперевозок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-mestnyh-i-regionalnyh-napravleniy-kak-osnova-rosta-rossiyskogo-rynka-passazhirskikh-aviaperevozok> (дата обращения: 24.08.2018).
8. **Матвеева А.В., Мальцев А.А.** Лоукостеры как вектор динамичного развития мирового рынка авиаперевозок // Российский внешнеэкономический вестник. 2017. № 8. С. 80–91.

9. **Никифорова Н.Ю.** Анализ проблем финансово-хозяйственной деятельности авиакомпаний (на примере АО «Полярные авиалинии») // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сб. статей VIII Международной научно-практической конференции. 2017. С. 124–127.
10. **Прокопенко А.И.** Конкурентная среда на рынке авиаперевозок и ее формирование // Современные тенденции развития науки и технологий: по материалам IX Международной научно-практической конференции, г. Белгород, 31 декабря 2015 г. 2015. № 9–5. С. 58–62.
11. **Суховей О.Н.** Развитие рынка авиаперевозок // Символ науки. 2016. № 11–1. С. 185–187.
12. **Топорков А.М.** Сравнительный анализ развития международных и отечественных корпораций авиационной промышленности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-razvitiya-mezhdunarodnyh-i-otechestvennyh-korporatsiy-aviatsionnoy-promyshlennosti> (дата обращения: 24.08.2018).
13. **Тутуров С.А., Найшев М.В.** Оценка эффективности деятельности авиакомпании и ее растущие пути [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-deyatelnosti-aviakompanii-i-puti-ee-povysheniya> (дата обращения: 24.08.2018).
14. **Холопов К.В., Соколова О.В.** Современные факторы и тенденции развития международных рынков пассажирских и грузовых воздушных перевозок и место России на рынках авиауслуг // Российский внешнеэкономический вестник. 2017. № 6. С. 119–129.
15. **Хрысева А.А., Чекалова А.А.** Приоритетные направления совершенствования услуг авиакомпаний на рынке пассажирских авиаперевозок // Известия ВолГТУ. Сер. Актуальные проблемы реформирования российской экономики: теория, практика, перспективы. 2017. № 7(202). С. 54–57.
16. **Шепелев Д.Р.** Рынок авиаперевозок в условиях кризиса // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2016. Т. 13, № 2. С. 78–81.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Пархимович Антон Викторович, магистр, специалист Apple Retail,
antonparkhimovich@gmail.com.

Поступила в редакцию 08.08.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 08.08.2018
Accepted for publication 20.11.2018

УДК 629.735.33

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-124-140

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА ПРЕДСТОЯЩЕГО ПОЛЕТА ДЛЯ ВЕРТОЛЕТОВ С УЧЕТОМ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОУСЛОВИЙ

А.Л. РЫБАЛКИНА¹, Е.И. ТРУСОВА², В.Д. ШАРОВ¹

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

²Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
г. Москва, Россия

Задача обеспечения безопасности полетов решается как на стадии проектирования и изготовления авиационной техники, так и при ее эксплуатации. На безопасность полетов влияют три группы факторов: человеческий фактор, технический фактор и неблагоприятные внешние условия. Несмотря на то, что только около 3 % авиационных происшествий обусловлены влиянием неблагоприятных внешних условий, во многих случаях имело место сочетание человеческого фактора как основного при наличии сопутствующих неблагоприятных внешних условий, в первую очередь неблагоприятных метеоусловий. В статье приведен сравнительный анализ уровня безопасности полетов в коммерческой гражданской авиации РФ и США, выполнен анализ статистики авиационных происшествий, связанных с влиянием метеоусловий. Так как наибольшее количество авиационных происшествий, связанных с влиянием неблагоприятных метеоусловий, произошло с вертолетами, в работе рассмотрена возможность повышения безопасности полетов вертолетов путем создания методики оценки рисков, связанных с влиянием неблагоприятных метеоусловий, перед выполнением конкретных полетов. Проанализированы методики оценки риска, такие как матрица оценки рисков ИКАО, контрольный перечень CFIT, FRAT, и показана целесообразность использования методики FRAT. На основе методики FRAT, после доработки раздела «Условия эксплуатации ВС», была получена методика оценки рисков на предстоящий полет для вертолетов. Для интерпретации полученных значений уровня риска была предложена шкала допустимости уровня риска для предстоящего полета.

Ключевые слова: метеоусловия, оценка рисков, безопасность полетов.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасностью полетов (БП) называют состояние¹, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, снижены до приемлемого уровня и контролируются, т. е. управляются. Таким образом, управление риском БП как на государственном уровне (в рамках Государственной программы по БП), так и на уровне авиапредприятия (в Системе управления БП – СУБП) является основным инструментом управления БП². Под управлением риском для БП (и управлением БП в целом) понимается управление производственными процессами. Для формирования управляющих воздействий необходимо оценивать риск, связанный с проявлениями существующих и потенциальных факторов опасности в авиационной деятельности. Традиционно выделяются три группы таких факторов – «Человек – Машина – Среда». В данной статье рассматриваются вопросы управления риском группы факторов «Среда», а именно подгруппы «Неблагоприятные метеоусловия».

¹ Приложение 19 к Конвенции о Международной гражданской авиации Управление безопасностью полетов. 2-е изд. 2016.

² О порядке разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими: постановление Правительства Российской Федерации от 18.11.2014 № 1215.

Авиация находится в большой зависимости от погодных условий, так как вся ее деятельность осуществляется в атмосфере. В полете на воздушное судно (ВС) оказывают влияние температура, давление воздуха, направление и скорость ветра, количество, характер и высота облаков, осадки.

Существуют метеоусловия и опасные метеоявления, которые исключают взлет и посадку ВС (сильный сдвиг ветра на этапе захода на посадку, ветер на взлетно-посадочной полосе (ВПП), превышающий допустимые значения, грозовая деятельность на аэродроме, сильные ливневые осадки, сильная болтанка, загрязнение ВПП хуже допустимого состояния, пыльные и песчаные бури, сильное обледенение ВС и т. д.). Самое совершенное оборудование ВС и аэродрома не исключает зависимость авиации от погоды, а высокая надежность авиационной техники не всегда обеспечивает адекватно высокий уровень безопасности [1]. В мировой авиационной практике известны случаи авиационных катастроф, связанных с попаданием воздушных судов в сложные метеоусловия и опасные метеоявления.

Для управления риском, связанным с метеоусловиями, как и для рисков, связанных с проявлениями других факторов опасности, применяются различные методы, часть которых описана, например, в работах [2, 3]. При этом, разумеется, должны использоваться современные знания в области авиационной метеорологии и результаты исследований воздействий экстремальных метеорологических и геофизических явлений на полет воздушного судна [4, 5, 6].

Однако, как показал анализ, существует очевидная необходимость улучшать имеющиеся и создавать новые подходы к оценке, анализу и выработке управленческих решений для риска, связанного с метеоусловиями, непосредственно перед полетом.

Задача особенно актуальна при эксплуатации вертолетов, а также легких и сверхлегких самолетов, которые в большей степени, чем другие ВС, зависят от метеоусловий.

СОСТОЯНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ РФ

Традиционно авиаперевозки относятся к наиболее безопасным видам транспорта. Однако некоторые расчеты показывают, что такие утверждения справедливы, только если оценивать уровень БП по показателю «количество погибших на 1 миллион пассажиро-километров» [7]. Как представлено в указанной монографии, по абсолютному количеству погибших воздушный транспорт в РФ за период 1992–2010 гг. уступал только автомобильному (конечно, с большим отрывом), а по количеству погибших на 1 миллион перевезенных вообще опережал все другие виды транспорта. Похожие оценки приводились и для гражданской авиации (ГА) США 1980-х годов в классической работе [8].

Когда говорят о высоком уровне безопасности ГА, обычно ссылаются на статистику ИКАО, однако нужно помнить, что ИКАО рассчитывает свои показатели только для регулярных коммерческих авиаперевозок, оставляя «за кадром» чартерные авиарейсы, авиационные работы, а также авиацию общего назначения (АОН). На рис. 1 приведены абсолютные данные из анализа БП ИКАО за 2016 г.³

Сравнение уровня БП в ГА РФ с мировыми показателями обычно выполняется именно по этому сегменту (рис. 2), как показано в анализе ФАВТ⁴.

³ ICAO Safety Report 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.icao.int/safety/Pages/Safety-Report.aspx> (дата обращения: 05.07.2018).

⁴ Данные по безопасности полетов в гражданской авиации РФ в 2016 г. ФАВТ, 2017.

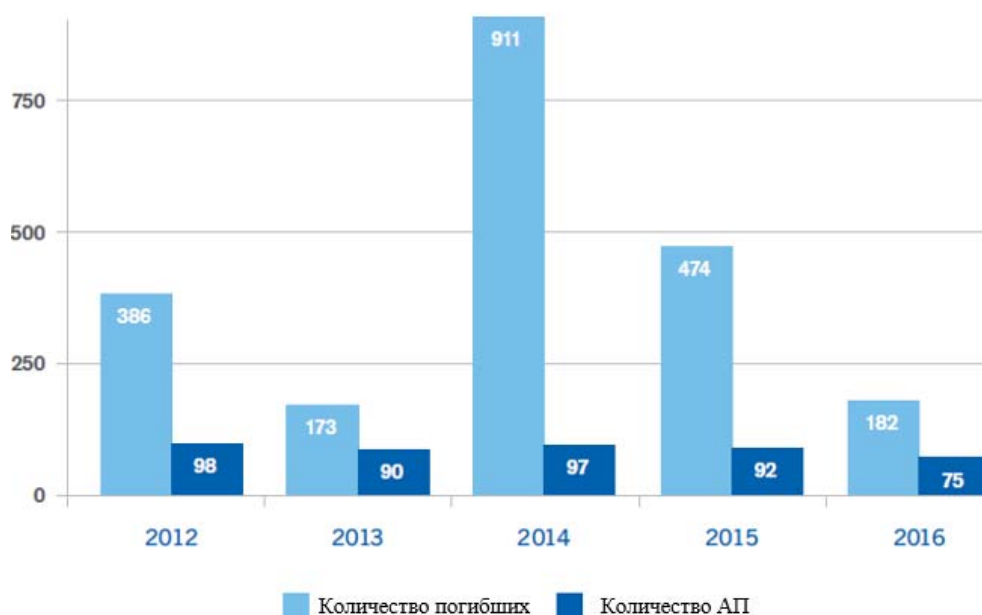


Рис. 1. Количество авиационных происшествий и погибших в них людей при регулярных коммерческих полетах государств – членов ИКАО

Fig. 1. The number of accidents and fatalities during scheduled commercial flights of ICAO member states

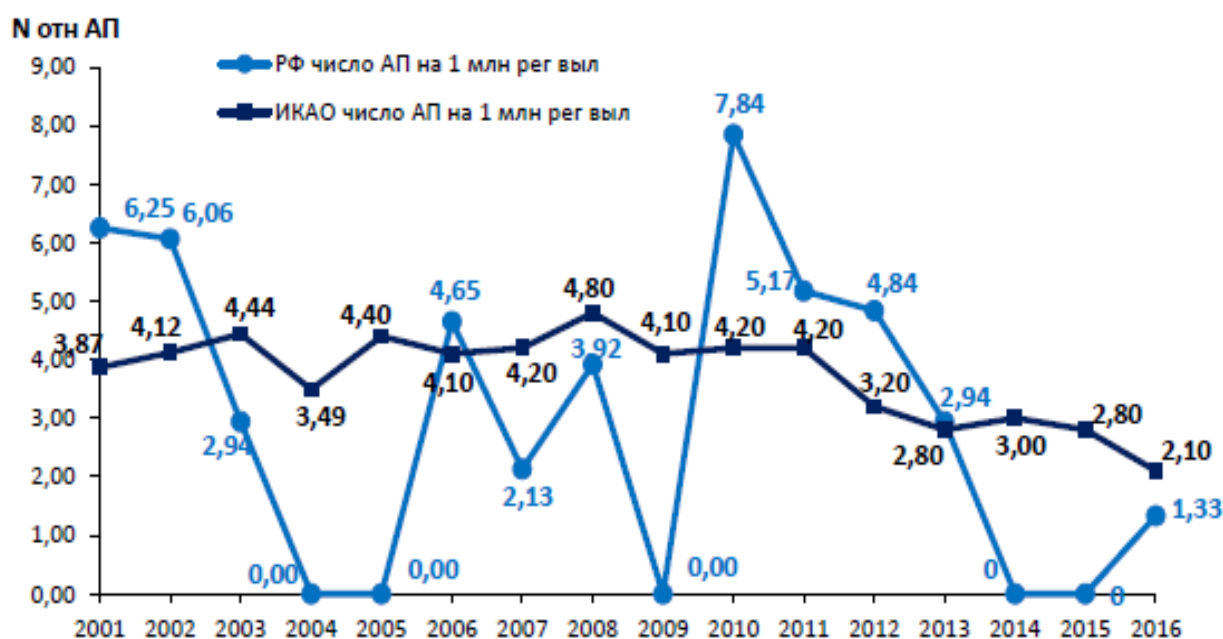


Рис.2. Сравнение уровня БП для регулярных коммерческих авиаперевозок в РФ и ИКАО

Fig. 2. Comparison of a flight safety level for scheduled commercial air transportation in the Russian Federation and ICAO

Из графика видно, что уровень БП в мире на регулярных рейсах с 2014 г. повышается. В РФ в этом сегменте не было авиационных происшествий (АП) в 2014–2015 гг., а в 2016 г. произошло одно АП (11.10.2016 авария самолета Ан-26). Соответственно, появилось ненулевое значение показателя, но оно существенно ниже, чем в среднем по странам ИКАО.

Всего в коммерческой ГА РФ в 2016 г. произошло 16 АП, из них 6 катастроф (все при выполнении авиационных работ), в которых погибли 29 человек. Для сравнения – в 2015 г. произошло 12 АП, из них 5 катастроф, погибло 27 человек. С учетом некоторого снижения по налету часов относительное количество АП на 100 тыс. часов налета в 2016 г. увеличилось с 0,42 до 0,59, количество катастроф – с 0,18 до 0,22, количество погибших на 1 млн перевезенных – с 0,29 до 0,32. Таким образом, объективные данные свидетельствуют, что уровень БП в коммерческой ГА РФ в 2016 г. по сравнению с 2015 г. понизился.

Представляется, что сравнивать уровень БП в коммерческой авиации РФ нужно и с уровнем стран – лидеров отрасли. На рис. 2 и 3 приведены диаграммы, построенные авторами статьи на основе информации, полученной из ФАВТ, и данных Национального бюро по безопасности на транспорте (NTSB) США⁵.

Можно видеть, что уровень БП по всем приведенным показателям в коммерческой авиации РФ ниже, чем в США. Особенно велика разница в важном для общества показателе – относительном количестве погибших на 1 млн перевезенных человек (рис. 4).

Однако в целом гражданская авиация США уносит гораздо большее число человеческих жизней, чем ГА РФ, если учитывать АОН. В АОН (General Aviation) США в 2015 г. произошло 1209 АП, в которых погибло 376 человек, а в 2016 г. – 1266 АП, погибло 386 человек⁶.

В АОН РФ, по данным ФАВТ, в 2015 г. было 29 АП, погибло 33 человека, в 2016 г. – 36 АП, погибло 30 человек. Как видим, абсолютные показатели значительно лучше, чем в США, что неудивительно, учитывая огромную разницу в количестве ВС и полетов в этом сег-

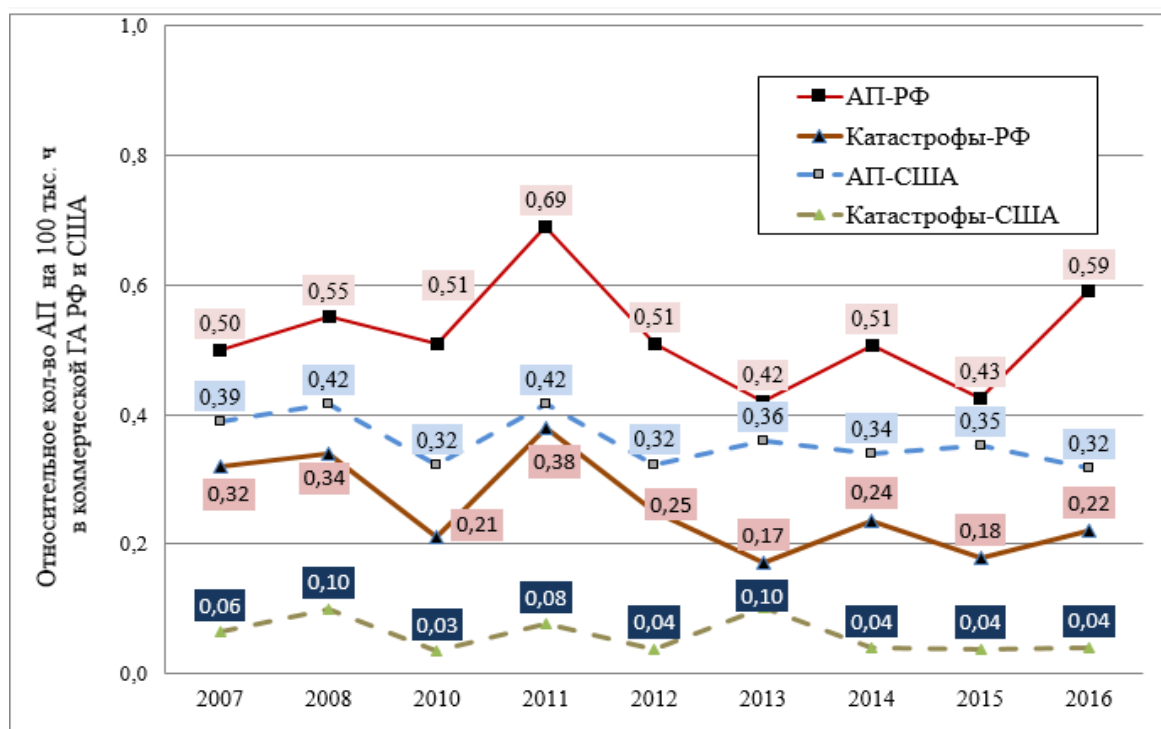


Рис. 3. Сравнение уровня БП в коммерческой ГА РФ и США по относительному количеству АП и катастроф
Fig. 3. Comparison of a flight safety level in commercial civil aviation of the Russian Federation and the United States based on the relative number of incidents and disasters

⁵ NTSB, Aviation Statistics [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nts.gov/investigations/data/Pages/aviation_stats.aspx (дата обращения: 5.07.18).

⁶ NTSB, Data & Stats [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nts.gov/investigations/data/Pages/Data_Stats.aspx (дата обращения: 5.07.2018).

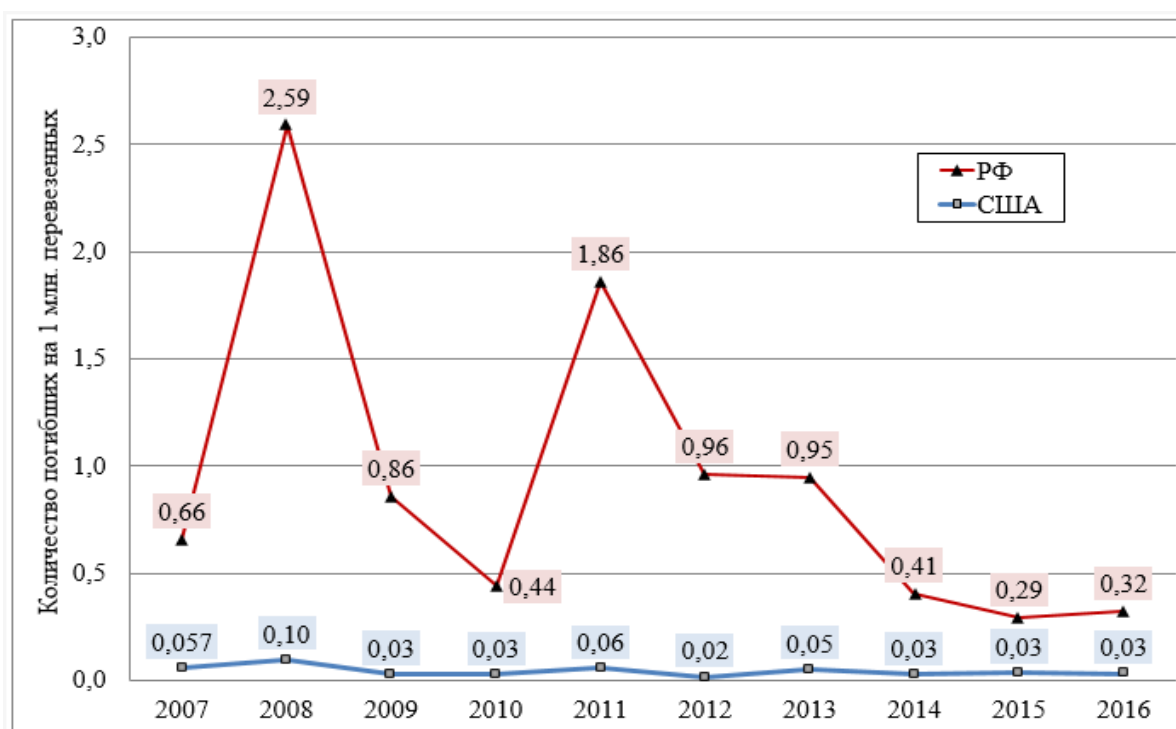


Рис. 4. Сравнение уровня БП в коммерческой ГА РФ и США по относительному количеству погибших в авиакатастрофах

Fig. 4. Comparison of a flight safety level in commercial civil aviation of the Russian Federation and the United States based on the relative number of fatalities in air accidents

менте ГА, однако настораживает устойчивое увеличение количества АП и катастроф в АОН РФ в последние годы.

Что касается вертолетов, то расчет на основании данных ФАВТ показывает, что за период с 2001 по 2016 г. среднее количество АП с вертолетами в коммерческой ГА РФ составляет 8,3; с самолетами – 5,8; количество катастроф с вертолетами – 5,8; с самолетами – 2,6. При этом наибольшее количество АП с вертолетами относится к типу событий «Столкновение исправного ВС с землей» (CFIT), что часто связано с попаданием ВС в сложные метеоусловия либо с неправильной оценкой метеоусловий экипажем.

Проведенный краткий анализ показывает, что положение дел с БП в ГА РФ в целом не может устраивать общество и требует продолжения постоянной работы по совершенствованию методов и средств управления риском и предотвращения АП.

Уровень БП при эксплуатации вертолетов остается ниже, чем в среднем по отрасли, при этом проблема проактивного управления риском, связанным с влиянием метеоусловий, при эксплуатации вертолетов является особо актуальной.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

Как уже отмечалось, на БП влияют три группы факторов: человеческий фактор, технический фактор и неблагоприятные внешние условия. На рис. 5 показано распределение факторов, определивших авиационные происшествия за 2010–2015 гг. в СНГ по данным докладов МАК по 296 авиационным происшествиям в ГА (включая АОН) государств СНГ, проанализированным в работе [9].



Рис. 5. Факторы, определившие авиационные происшествия за 2010–2015 гг.
Fig. 5. Factors determined the aviation accidents for the period of 2010–2015

Несмотря на то, что только 3 % АП обусловлены влиянием неблагоприятных внешних условий, во многих случаях имело место сочетание человеческого фактора как основного при наличии сопутствующих неблагоприятных внешних условий, в первую очередь неблагоприятных метеоусловий и опасных метеоявлений.

Проанализируем влияние неблагоприятных метеоусловий на безопасность полетов и рассмотрим различные пути снижения риска авиационных происшествий. В данной работе был проведен анализ 286 АП, произошедших в РФ за 2009–2016 гг. на основании окончательных отчетов о расследованиях АП⁷. Установлено, что в 26 событиях в качестве основной или сопутствующей причины было отмечено влияние неблагоприятных метеоусловий и опасных метеоявлений. Распределение этих событий по годам за указанный период приведено на рис. 6.



Рис. 6. Распределение АП в РФ, связанных с неблагоприятными метеоусловиями
(коммерческая авиация и АОН)

Fig. 6. The distribution of accidents in the Russian Federation, associated with adverse weather conditions
(commercial aviation and general aviation)

Из 26 событий 16 произошло с ВС коммерческой авиации, 10 – с ВС АОН, при этом на вертолеты приходится 21 АП (или 81 %).

Распределение АП по типам неблагоприятных метеоусловий и опасных метеоявлений, отмеченных в качестве причин АП в отчетах по расследованию, представлено в табл. 1.

⁷ Отчеты о состоянии безопасности полетов [Электронный ресурс] // Межгосударственный авиационный комитет. Режим доступа: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения: 5.07.2018).

Таблица 1
Table 1

Типы неблагоприятных метеоусловий и опасных метеоявлений,
отмеченных в качестве причин АП
Types of adverse weather conditions and hazardous meteorological phenomena
noted as causes of accidents

Виды погодных условий	Количество АП
Туман	9
Кучево-дождевая облачность	10
Сплошная слоистая облачность	6
Турбулентность	7
Ограниченная видимость	11
Ливневые осадки	9
Дымка	13
Грозовая деятельность	5
Снегопад, метель	8
Сильный порывистый ветер	9
Обледенение в облаках	6

Также было выявлено, что в девяти полетах, закончившихся АП, экипаж не обладал актуальной информацией о неблагоприятных метеоусловиях по причинам, распределение которых приведено в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Повторяемость причин, из-за которых экипаж не получил
метеоинформацию в полетах, закончившихся АП
Frequency of the causes where the crew did not receive meteorological information
in flights ended up in aviation accidents

Недостатки в метеообеспечении	Количество АП
Неоправдавшийся прогноз погоды	5
Отсутствие прогноза погоды по маршруту	1
Экипаж за метеоинформацией не обращался	3

Ситуация с метеообеспечением ГА должна измениться к лучшему в результате реализации всех мероприятий по внедрению перспективных систем и технологий метеорологического обеспечения и оснащения аэродромов радиолокационными средствами в соответствии с программой «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020 годы)»⁸.

Распределение причин АП, связанных с неблагоприятными метеоусловиями, показано на диаграммах рис. 7 и 8.

⁸ Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020 годы) [Электронный ресурс] // Федеральные целевые программы России. Режим доступа: <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2010/251/> (дата обращения: 5.07.2018).

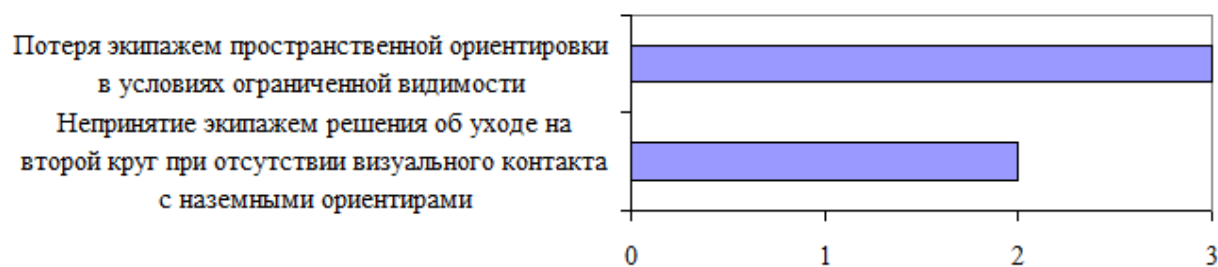


Рис. 7. Повторяемость причин, связанных с метеоусловиями, в отчетах по расследованию АП в ГА РФ за период 2009–2016 гг. (самолеты)

Fig. 7. Frequency of the reasons connected with weather conditions, in accidents investigation reports in civil aviation of the Russian Federation for the period of 2009–2016 (airplanes)



Рис. 8. Повторяемость причин АП, связанных с метеоусловиями, в отчетах по расследованию АП в РФ за период 2009–2016 гг. (вертолеты)

Fig. 8. Frequency of the reasons of the accidents connected with weather conditions in accidents investigation reports in the Russian Federation for the period of 2009–2016 (helicopters)

Можно видеть, что сложные метеоусловия и опасные метеоявления отмечаются в качестве основных или сопутствующих причин АП с вертолетами гораздо чаще, чем с самолетами, т. е. риски, связанные с погодными условиями, при эксплуатации вертолетов гораздо выше. Поэтому в данном исследовании рассматривалась возможность повышения безопасности полетов вертолетов путем создания методики оценки рисков, связанных с влиянием неблагоприятных метеоусловий, перед выполнением полетов.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКА ПРЕДСТОЯЩЕГО ПОЛЕТА

В работе были проанализированы методики оценки риска, такие как матрица оценки рисков ИКАО, контрольный перечень CFIT и инструмент оценки риска предстоящего полета FRAT.

Метод, рекомендованный ИКАО («матрица рисков ИКАО»), предполагает оценку риска в виде буквенно-цифрового индекса как сочетания экспертно оцениваемых вероятности негативного события и серьезности его проявления. В зависимости от значения индекса производится оценка приемлемости риска с помощью специальной матрицы⁹ и формируются рекомендации по его снижению.

Матрица рисков проста в применении, но имеет ряд ограничений, подробно проанализированных в работах [10, 11, 12]. В частности, метод оценивает только риск отдельных событий и не позволяет оценивать так называемые «интегральные риски» полета в целом.

Применительно к задаче оценки риска, связанного с метеоусловиями, с помощью матрицы ИКАО можно оценить риск события, которое может возникнуть, например, из-за обледенения или из-за сильного бокового ветра на посадке, но невозможно получить целостную картину общего риска от воздействия неблагоприятных метеоусловий в предстоящем полете.

Другим методом, который оценивает риск в определенном полете, является метод «Контрольный перечень CFIT»¹⁰. Метод разработан Всемирным фондом безопасности полетов для оценки риска столкновений исправных воздушных судов с землей (CFIT) в рамках международной программы по сокращению количества АП данного типа. Оценка риска производится экипажем перед заходом на посадку.

Ограничением этой методики для оценки влияния метеоусловий является то, что методика оценивает риски не на весь полет, а только при заходе на посадку. При этом в данном перечне недостаточно учитываются типы опасных метеоявлений.

Третьим рассмотренным методом является методика FRAT (*Flight Risk Assessment Tool*) – оценка риска на предстоящий полет. Данный метод оценки рисков был разработан Федеральной авиационной администрацией США (FAA)^{11,12}.

При разработке метода, как утверждают его авторы, были рассмотрены данные об авиационных событиях за длительный период, выявлены опасности и использована стандартная методология оценки риска. Метод FRAT позволяет определять, какие полеты имеют наибольший риск, выявлять факторы наибольшей опасности, внедрять предупреждающие мероприятия, когда это возможно и, соответственно, уменьшать риск.

Оценивается риск для рассматриваемого полета в зависимости от типа операции, окружающей среды, используемых ВС, подготовки экипажей и опыта эксплуатации посредством выделения трех категорий условий, определяющих риск (табл. 3).

Каждая категория содержит несколько характеристик предстоящего полета, соответствие которым рассматривается как наличие фактора опасности с присущим ему риском, который оценивается в баллах. После заполнения формуляра FRAT все баллы суммируются, и по этой сумме определяется общий риск предстоящего полета, который оценивается с помощью специальной шкалы (табл. 4).

⁹ Руководство по управлению безопасностью полетов. Дос. 9859. 3-е изд. ИКАО, 2013. 300 с.

¹⁰ Программы всемирного фонда безопасности полетов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pandia.ru/text/78/590/43993-3.php> (дата обращения: 5.07.2018).

¹¹ Flight Risk Assessment Tools [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.faa.gov/news/safety_briefing/2015/media/SE_Topic_15-08.pdf (дата обращения: 5.07.2018).

¹² Flight Risk Assessment Tool (FRAT). Information for Operators [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/info/all_infos/media/2007/inFO07015.pdf (дата обращения: 5.07.2018).

Таблица 3
Table 3

Категории факторов риска FRAT
Categories of FRAT risk factors

Категория 1	Квалификация членов летного экипажа ВС (налет, рабочее время и время отдыха экипажа)
Категория 2	Условия эксплуатации ВС (аэродром, время суток, метеоусловия)
Категория 3	Оборудование ВС (особые ограничения по РЛЭ, наличие отказов, полет по специальному разрешению)

Таблица 4
Table 4

Шкала оценки риска предстоящего полета
Scale of risk assessment of the forthcoming flight

Уровень риска в баллах	Предпринимаемые действия
0–19	Действий не требуется
20–24	Решение о вылете принимает шеф-пилот по типу ВС
25 и более	Шеф-пилот по типу ВС должен принять меры по снижению риска

Таким образом, из рассмотренных методик только методика FRAT оценивает риски на весь предстоящий полет и только в данной методике в разделе «Условия эксплуатации ВС» учитываются типы метеоусловий, а также другие неблагоприятные внешние условия предстоящего полета.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ РИСКА ПРЕДСТОЯЩЕГО ПОЛЕТА ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ FRAT

Как видно из приведенного выше анализа АП, учет сложных метеоусловий и опасных метеоявлений при эксплуатации вертолетов имеет чрезвычайно важное значение. При этом в анализируемых АП с вертолетами имели место также специфические метеоусловия, ставшие основной или сопричастующей причиной авиационных происшествий, которые не учтены в исходном перечне условий категории 2 исходного FRAT. Очевидна необходимость введения новых показателей, что и было сделано в ходе данного исследования.

В ходе проведенного исследования на основе анализа отчетов по расследованию АП в перечень условий (факторов опасности FRAT) были добавлены метеоусловия, которые не были учтены в исходной методике, такие как образование тумана на маршруте полета; сильный снегопад и метели на аэродроме (а/д) вылета и/или назначения и т. д. Помимо этого, были добавлены показатели, связанные с недостатком опыта, такие как отсутствие у пилота опыта пилотирования ВС по приборам, отсутствие у пилота опыта взлета при метеоминимуме и т. д. Часть дополнительных показателей связана с проблемами, которые уже имели место, например случаи неоправдавшегося прогноза погоды, случаи непринятия пилотом решения об уходе на второй круг или на запасной аэродром при наличии метеоусловий ниже минимумов для посадки и т. д.

На основании экспертной оценки, проведенной в одной из авиакомпаний, эксплуатирующих вертолеты, были предложены балльные оценки влияния на риск предстоящего полета следующих факторов опасности, характерных в основном для летной эксплуатации вертолетов (табл. 5).

Таблица 5
Table 5

Дополнительные факторы опасности и оценки связанных с ними рисков
Additional hazard factors and risk-related assessments

Фактор опасности	Риск (баллы)
Образование тумана на маршруте полета	3
Сильный снегопад и метель на а/д вылета и/или назначения	3
В течение года имел место хотя бы один случай неоправдавшегося прогноза погоды	3
В течение года имел место хотя бы один случай несвоевременного информирования об ухудшении погоды по данному маршруту	3
В течение года имел место хотя бы один случай непринятия пилотом решения об уходе на второй круг/на запасной аэродром при наличии метеоусловий ниже минимумов для посадки	4
Условия, способствующие образованию снежного вихря	4
Отсутствие у пилота опыта пилотирования ВС по приборам	3
Отсутствие у пилота опыта взлета при метеоминимуме	3
В течение года имел место хотя бы один случай вылета при погоде ниже посадочного минимума и отсутствии пригодного а/д в часе полета на одном двигателе	3
Отсутствие у пилота опыта взлетов/посадок с предельной составляющей бокового ветра	3

Поскольку добавлены новые позиции в перечень факторов со своими балльными оценками, необходимо скорректировать пороговые уровни по следующей методике.

1. Рассчитываются параметры исходного FRAT:

- максимально возможное количество баллов в исходном варианте FRAT (сумма баллов в приведенной ниже табл. 5 за исключением добавленных строк 36–46) $R_m = 146$;
- исходные уровни «желтого» и «красного» рисков – $R_j = 20$; $R_r = 25$.

2. Рассчитываются отношения K_j и K_r «желтого» и «красного» уровней к максимальному значению риска.

$$K_j = \frac{R_m}{R_j} = \frac{146}{20} = 7,3.$$

$$K_r = \frac{R_m}{R_r} = \frac{146}{25} = 5,84. \quad (1)$$

3. Рассчитывается сумма добавленных баллов за счет новых факторов опасности (баллы в строках табл. 4 или в строках 36–46 табл. 5):

$$\Delta R = 32.$$

4. Рассчитывается новое максимальное количество баллов:

$$R_{ml} = R_m + \Delta R = 146 + 32 = 178.$$

5. На основании рассчитанных коэффициентов «желтого» и «красного» уровней (формула (1)) рассчитываются новые значения пороговых уровней в дополненном FRAT.

$$R_{j1} = \frac{R_{m1}}{K_j} = \frac{178}{7,3} = 24.$$

$$R_{r1} = \frac{R_m}{K_r} = \frac{178}{5,84} = 30. \quad (2)$$

Таким образом, взяв за основу методику FRAT и доработав раздел «Условия эксплуатации ВС», была получена методика оценки рисков на предстоящий полет для вертолетов. Новый перечень условий приведен в табл. 6.

Таблица 6
Table 6

Оценка риска на предстоящий полет
Risk assessment for the forthcoming flight

		Показатель уровня риска	Фактический уровень риска
Раздел 1. Квалификация экипажа			
1	Налет КВС менее 200 часов на данном типе ВС	5	
2	Налет 2-го пилота менее 200 часов на данном типе ВС	5	
3	Полет с одним пилотом	5	
4	Налет КВС менее 50 часов за последние 90 дней	3	
5	Налет 2-го пилота менее 50 часов за последние 90 дней	3	
6	Рабочее время более 12 часов	4	
7	Летное время более 8 часов	4	
8	Время отдыха экипажа вне базы менее 12 часов до начала рабочего времени	5	
Суммарный показатель факторов риска по 1-му разделу			
Раздел 2. Условия эксплуатации			
9	Заход на посадку по VOR/GPS/LOC/ADF без наведения по высоте	3	
10	Заход на посадку по схеме <i>circle to land</i>	4	
11	Заход на посадку по неопубликованным схемам	4	
12	Горный аэродром	5	
13	УВД на а/д вылета или назначения не осуществляется	3	
14	Неконтролируемый аэродром	5	
15	Не выбран запасной аэродром	4	
16	Превышение основного аэродрома более 5000 футов над уровнем моря	3	
17	ВПП мокрая	3	
18	ВПП загрязнена	3	
19	Полет в зимнее время года	3	
20	Полет в сумерках	2	
21	Полет ночью	5	
22	Длина пробега более 80 % располагаемой длины ВПП	5	

23	Перелет без пассажиров и груза	5	
24	Срочный вылет (экипаж оповещен менее чем за 4 ч до вылета)	3	
25	Международный полет	2	
26	Нет метеоинформации по а/д назначения или по маршруту полета	5	
27	Гроза на а/д вылета или назначения	4	
28	Сильная турбулентность	5	
29	Высота НГО/видимость на а/д назначения менее 200 м/2000 м	3	
30	Сильный ливневой дождь на а/д вылета и/или назначения	5	
31	Переохлажденные осадки на а/д вылета и/или назначения	3	
32	Обледенение (умеренное-сильное)	5	
33	Приземный ветер более 30 узлов (15 м/с)	4	
34	Боковой ветер более 15 узлов (7 м/с)	4	
35	Коэффициент сцепления на ВПП менее 0,4	5	
36	Образование тумана на маршруте полета	3	
37	Сильный снегопад и метели на а/д вылета и/или назначения	3	
38	В течение года имел место хотя бы один случай неоправдавшегося прогноза погоды	3	
39	В течение года имел место хотя бы один случай несвоевременного информирования об изменениях погоды по данному маршруту	3	
40	В течение года имел место хотя бы один случай неприятия пилотом решения об уходе на второй круг/на запасной аэродром при метеоусловиях ниже минимума для посадки	4	
41	Условия, способствующие образованию снежного вихря	4	
42	Отсутствие у пилота опыта пилотирования ВС по приборам	3	
43	Отсутствие у пилота опыта взлета при метеоминимуме	3	
44	В течение года имел место хотя бы один случай вылета при минимуме менее посадочного и отсутствии пригодного аэродрома в часе полета на одном двигателе	3	
46	Отсутствие у пилота опыта взлетов/посадок с предельной составляющей бокового ветра	3	
Суммарный показатель факторов риска по 2-му разделу			
Раздел 3. Оборудование			
47	Полет по специальному разрешению (без коммерческой загрузки)	3	
48	Наличие отказов по MEL, влияющих на безопасность полета	2	
49	Особые полетные ограничения по РЛЭ	2	
Суммарный показатель факторов риска по 3-му разделу			
Итого:		146	

Порядок применения методики следующий.

1. В ячейках «фактический уровень риска» записывается количество баллов, равное показателю риска соседней ячейки, если условия выполнения полета соответствуют данной характеристике. В противном случае записывается 0.

2. После анализа условий по всем характеристикам подсчитывается сумма баллов.

3. Общий уровень риска предстоящего полета оценивается по схеме, приведенной на рис. 9.

Уровень риска в баллах	Цветовой индикатор
от 0 до 23	Зеленый
от 24 до 29	Желтый
30 и более	Красный

Рис. 9. «Светофорная модель» оценки риска предстоящего полета вертолета на основе FRAT
Fig. 9. “Traffic light model” of the risk assessment of a helicopter forthcoming flight based on FRAT

«Зеленый» уровень риска соответствует наиболее благоприятным условиям полета, «желтый» риск – предупредительный, говорит о необходимости повышенного внимания к возможным проявлениям отдельных факторов, а «красный» риск требует принятия предупреждающих мер для снижения общего риска полета.

В качестве апробации методики был проведен анализ окончательных отчетов по расследованию семи АП, связанных с метеоусловиями, с вертолетами в РФ за период 2014–2016 гг. и произведена по имеющимся данным оценка индекса риска с использованием разработанной методики, которая могла бы быть проведена экипажем перед вылетом.

Результаты апробации показывают, что значительная часть полетов, закончившихся АП по причинам, связанным с метеоусловиями, получила высокие значения индекса риска. Таким образом, если бы экипажи перед этими полетами применяли разработанную методику, то, получив «красные» оценки риска полета, они могли бы принять своевременные предупреждающие меры по снижению риска, что, возможно, предотвратило бы эти АП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема влияния метеоусловий на БП продолжает оставаться актуальной. Применение современного оборудования для выполнения полетов в сложных метеоусловиях не исключает зависимость авиации от погоды. Авиационные происшествия, связанные с влиянием неблагоприятных метеоусловий, продолжают происходить.

Особенно сильно сказывается влияние сложных метеоусловий и опасных метеоявлений на БП при эксплуатации вертолетов.

Одним из эффективных методов повышения БП и предотвращения АП является разработка и использование методик проактивного управления риском. Однако большинство существующих методик не учитывают влияния метеоусловий, или учитывают его в недостаточной степени, или не позволяют получить оценку «суммарного риска» предстоящего полета с указанием «слабых мест», на которые следует обратить особое внимание при планировании полетов и непосредственно при подготовке к ним.

Применение разработанной методики оценки рисков на предстоящий полет, основанной на методике FRAT и доработанной с учетом специфики эксплуатации вертолетов в российских авиакомпаниях, поможет своевременно выявлять полеты с повышенным уровнем риска, проводить мероприятия по его уменьшению и, следовательно, повысить БП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leveson N.G. Engineering a Safer World. The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2011.
2. Зубков Б.В., Шаров В.Д. Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов. М.: МГТУ ГА, 2010. 196 с.

3. Гузий А.Г., Лушкин А.М., Щукин А.В. Методологический подход к оптимизации управления уровнем безопасности полетов по критерию эффективности // Сб. трудов Общества независимых расследователей авиационных происшествий. 2013. Вып. 25. С. 189–195.
4. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология: учебник. СПб.: РГГМУ, 2005.
5. Тихомиров Ю.В. Комплексная оценка вероятности поражения молнией самолетов гражданской авиации // Обеспечение безопасности полетов в СМУ: межвузов сб. научных трудов. М.: МГТУ ГА, 1996. С. 13–21.
6. Ларичев И.Л. Воздействие гелиогеофизических факторов на аварийность в гражданской авиации: автореферат диссертации к.т.н. / Ин-т прикладной геофизики; Росгидромет. М., 2004.
7. Плотников Н.И. Проектирование транспортных комплексов. Воздушный транспорт: монография. Новосибирск: АвиаМенеджер, 2010. 393 с.
8. Хенли Е.Дж., Куамото Х. Надежность технических систем и оценки риска: пер. с англ. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
9. Рыбалкина А.Л., Спирин А.С. Синтез метеоинформации с целью повышения уровня безопасности полетов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2015. Т. 1. С. 90–93.
10. Cox. L. What's Wrong with Risk Matrices? // Risk Analyses. 2008. Vol. 28, № 2. Pp. 497–512.
11. Махутов Н.А. Использование матриц риска при проведении оценки риска и приоритизации защитных мероприятий / Д.О. Резников, В.П. Петров, В.И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 1. С. 82–92.
12. Шаров В.Д., Воробьев В.В. Ограничения по использованию матрицы ИКАО при оценке рисков для безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 225. С. 179–187.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыбалкина Александра Леонидовна, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности Московского государственного технического университета гражданской авиации, rybalkina@list.ru.

Трусова Елена Игоревна, инженер, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, elenatru2011@yandex.ru.

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности Московского государственного технического университета гражданской авиации, vdsharov@mail.ru.

RISK ASSESSMENT METHODOLOGY FOR A FORTHCOMING FLIGHT OF HELICOPTERS TAKING INTO ACCOUNT UNFAVORABLE METEOROLOGICAL CONDITIONS

Alexandra L. Rybalkina¹, Elena I. Trusova², Valery D. Sharov¹
¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia
²State Scientific Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia

ABSTRACT

The task to provide flight safety is solved both at the stage of design and manufacture of aircraft and during its operation. Flight safety is influenced by three groups of factors: a human factor, a technical factor and marginal ambient conditions. In spite of the fact that only about 3% of aviation accidents are caused by marginal ambient conditions, in many cases there was a combination of the human factor as the main one with the availability of the accompanying unfavorable external conditions, especially marginal

weather conditions. The article provides a comparative analysis of a flight safety factor in commercial civil aviation in the Russian Federation and the United States and analyzes accident statistics caused by adverse meteorological conditions. Since the greatest number of accidents related to marginal weather conditions occurred with helicopters, the article has highlighted the possibility of increasing helicopter flight safety by creating a methodology for risk assessment associated with the influence of adverse weather conditions before the flight operation. Risk assessment techniques, such as the ICAO Risk Assessment Matrix, the CFIT checklist, FRAT, have been analyzed and the feasibility of using the FRAT methodology has been demonstrated. On the basis of the FRAT methodology after updating the section "Operating conditions of the aircraft", a risk assessment methodology for the forthcoming flight of helicopters was obtained. A risk level admissibility scale for the forthcoming flight was proposed to interpret the obtained values of the risk level.

Key words: meteorological conditions, risk assessment, flight safety.

REFERENCES

1. **Leveson, N.G.** (2011). *Engineering a Safer World*. The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England.
2. **Zubkov, B.V. and Sharov, V.D.** (2010). *Teoriya i praktika opredeleniya riskov v aviapredpriyatiyakh pri razrabotke sistemy upravleniya bezopasnostyu poletov* [The theory and practice of risk management in aviation enterprises in the development of safety management system]. Moscow: MSTUCA, 2010. 196 p. (in Russian)
3. **Guziy, A.G., Lushkin, A.M. and Shchukin, A.V.** (2013). *Metodologicheskii podkhod k optimizatsii upravleniya urovnem bezopasnosti poletov po kriteriyu effektivnosti* [Methodological approach to optimizing the management of the level of flight safety by the criterion of efficiency]. *Sb. trudov Obshchestva nezavisimikh rassledovateley aviatsionnykh proishestviy* [Collected Works of the Society of Independent Investigators of Aviation Accidents], iss. 25, pp. 189–195. (in Russian)
4. **Bogatkin, O.G.** (2005). *Aviatsionnaya meteorologiya* [Aviation meteorology]. *Uchebnik* [Textbook]. St. Petersburg: RSHU. (in Russian)
5. **Tikhomirov, Ju.V.** (1996). *Kompleksnaya otsenka veroyatnosti porazheniya molniey samoletov grazhdanskoy aviatsii* [Comprehensive assessment of the probability of lightning strikes of civil aircraft]. *Obespechenie bezopasnosti poletov v SMU: mezhvuz. sb. nauchnikh trudov* [Ensuring flight safety in IFC: Interuniversity collection of scientific papers]. Moscow: MSTUCA, pp. 13–21. (in Russian)
6. **Larichev, I.L.** (2004). *Vozdeystvie geliogeofizicheskikh faktorov na avariynost v grazhdanskoy aviatsii: avtoref. diss.* [Influence of heliogeophysical factors on the accident rate in civil aviation: thesis ph. d.]. *Institut prikladnoy geofiziki; Rosgidromet* [Institute of applied Geophysics, Roshydromet]. Moscow. (in Russian)
7. **Plotnikov, N.I.** (2010). *Proyektirovaniye transportnykh kompleksov. Vozdushnyy transport* [Design of transport complexes. Air transport]. Monograph. Novosibirsk: AviaManager, 393 p. (in Russian)
8. **Henley, E. and Kumamoto, H.** (1984). *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i otsenki riska* [Reliability of technical systems and risk assessment]. Trans. from English. Moscow: Mechanical Engineering, 528 p. (in Russian)
9. **Rybalkina, A.L. and Spirin, A.S.** (2015). *Sintez meteoinformatsii s tselyu povysheniya urovnya bezopasnosti poletov* [Synthesis of meteorological information in order to improve the level of flight safety]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»: v 2 t.* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality": 2 vol.]. Penza: PGU, vol. 1, pp. 90–93. (in Russian)
10. **Cox, L.** (2008). *What's Wrong with Risk Matrices?* Risk Analyses, vol. 28, no. 2, pp. 497–512.
11. **Makhutov, N.A., Reznikov, D.O., Petrov, V.P. and Kuksova, V.I.** (2012). *Ispolzovaniye matrits riska pri provedenii otsenki riska i prioritizatsii zaschitnykh meropriyatiy* [The use of risk matrixes when performing risk assessment and prioritization of protective measures]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Security issues and emergency situations], no. 1, pp. 82–92. (in Russian)

12. Sharov, V.D. and Vorobyev, V.V. (2016). *Ogranicheniya po ispolzovaniyu matritsy ICAO pri otsenke riskov dlya bezopasnosti poletov* [Limitations on the use of the ICAO matrix in the assessment of safety risks]. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 225, pp. 179–187. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandra L. Rybalkina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, rybalkina@list.ru.

Elena I. Trusova, Engineer, State Scientific Research Institute of Aviation Systems, lenatru2011@yandex.ru.

Valeriy D. Sharov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vdsharov@mail.ru.

Поступила в редакцию 15.08.2018
Принята в печать 20.11.2018

Received 15.08.2018
Accepted for publication 20.11.2018

ББК 05
Н 34
Св. план 2018

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 21, № 06, 2018
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 21, No. 06, 2018

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

Подписано в печать 17.12.18 г.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

17,5 усл. печ. л.

Заказ № 413 / 192

Тираж 100 экз.

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

Подписной индекс в каталоге Роспечати 84254
© Московский государственный
технический университет ГА, 2018