

Том 20, № 04, 2017

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 20, No. 04, 2017

Издается с 1998 г.

Москва
2017

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, профессор, д.т.н., д.ю.н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Зам. главного редактора** – Воробьев В.В., профессор, д.т.н., заведующий кафедрой МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Ответственные секретари главной редакции** – Наумова Т.В., доцент, к.филос.н., доцент МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Полешкина И.О., к.э.н., доцент МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Члены главной редакции** – Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, д.ф.-м.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Ципенко В.Г., заслуженный деятель науки РФ, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, профессор, д.филос.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Туркин И.К., профессор, д.т.н., заведующий кафедрой МАИ (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия;
– Калугин В.Т., проф., д.т.н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
– Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, профессор, д.ф.-м.н., профессор МФТИ, Москва, Россия;
– Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, профессор, д.т.н., Москва, Россия;
– Лю Джонда, профессор, PhD, президент (ректор) Технологического университета Нингбо, Нингбо, Китай;
– Дамиан Ривас Ривас, профессор, PhD, профессор Университета Севильи, Севилья, Испания;
– Сайдахмедов Р.Х., профессор, д.т.н., ректор Ташкентского государственного технического университета им. А.Р. Беруни, Ташкент, Узбекистан;
– Франко Персиани, PhD, директор Межведомственного Центра промышленных исследований в авионавтике, Болонский университет, Болонья, Италия;
– Владимир Немец, PhD, Факультет транспортных наук, Отделение воздушного транспорта, Чешский технический университет, Прага, Чешская республика.
– Станислав Сзабо, PhD, декан Факультета авионавтики, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая республика.

Редакционная коллегия выпуска

- Ответственный редактор выпуска** – Нечаев Е.Е., заслуженный работник транспорта РФ, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Ответственный секретарь** – Чехов И.А., к.в.н., доцент МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Члены редакционной коллегии** – Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, профессор, д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Сулаев С.А., профессор, д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;
– Рудельсон Л.Е., профессор, д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Chief Editorial Board

Editor-in-chief

Boris Eliseev, Professor, Doctor of Science, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Deputy Editor-in-chief

Vadim Vorobyov, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Executive Secretaries

Tatiana Naumova, Associate Professor, Candidate of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Irina Poleshkina, Associate Professor, Candidate of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Member of the chief editorial Board

Anatoly Kozlov, Professor, Doctor of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Vladimir Tchipenko, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Olga Garanina, Professor, Doctor of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Igor Turkin, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Vladimir Kalugin, Professor, Doctor of Science, Dean, Bauman University, Moscow, Russia;

Dmitry Lukin, Professor, Doctor of Science, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Vacily Shapkin, Professor, Doctor of Science, State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Lyu Zhongda, Professor, PhD, President (Rector), Ningbo University of Technology, Ningbo, China;

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

Ravshan Saydakhmedov, Professor, Doctor of Science, Rector, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;

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

Vladimir Němec, 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.

Issue Editorial Board

Issue Editor

Evgenii Nechaev, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Issue Secretary

Igor' Chekhov, Candidate of Science, Associate Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Issue Editorial Board Members

Aleksandr Logvin, Professor, Doctor of Science, Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Stanislav Sulaev, Professor, Doctor of Science, Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Lev Rudel'son, Professor, Doctor of Science, Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А. Постановка и решение задачи оперативной коррекции потоков прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма.....	8
Михайлин Д.А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон	18
Чехов И.А., Чехов О.И. Алгоритм формирования динамической очереди беспилотных летательных аппаратов при заходе на посадку	25

ТРАНСПОРТ

Самойленко В.М., Петров Ю.В., Ратенко О.А. Распределение температуры в многослойных металлокерамических покрытиях при нестационарном тепловом воздействии	33
Огунвоchl Б.Д., Баланчук Е.А., Кандыба К.С. Моделирование отказов в автоматизированной системе управления воздушным движением	41
Ассоров Н.А. К вопросу построения прилетного потока воздушных судов	52
Нечаев Е.Е., Суринт П.С. Анализ организации воздушного движения на аэродромах с низкой интенсивностью полетов в зарубежных странах	59
Марюхненко В.С., Ерохин В.В. Структурный синтез навигационного обеспечения триадной интегрированной системы навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий	69
Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета воздушных судов при организации воздушного движения	78
Скрыпник О.Н. Системы координат и координатные преобразования для задач аэронавигации	88
Чехов И.А. Пути развития систем навигации в рамках внедрения концепции CNS/ATM	98

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Тельпуховская О.Н. Моделирование воздушной обстановки с использованием объектно-ориентированной системы программирования.....	107
Рудельсон Л.Е., Смородский С.Н., Степаненко А.С. Стратегия контроля целостности данных в концепции управления общесистемной информацией	114

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Нечаев Е.Е., Дерябин К.С. Характеристики интерферометрических бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны при секторном обзоре.....	127
--	-----

Стукалов С.Б., Стукалов Д.С., Кондриков В.И.

Возможности практического применения оптико-электронных систем визуализации на воздушных судах..... 135

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Картышев О.А., Николайкин Н.И.

Проекты санитарно-защитных зон аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок как основа оценки соответствия их деятельности экологическим требованиям 146

Воробьев В.В., Власова А.В.

Роль радиоэлектронного оборудования в управлении безопасностью полетов при реализации глобального аэронавигационного плана ИКАО..... 156

Феоктистова О.Г., Туркин И.К., Баринов С.В.

Актуальность оценки производственного риска на авиапредприятиях..... 162

CONTENTS

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Lebedev G.N., Malygin V.B., Mikhaylin D.A.

Problem setting and solution of the response correction of arrival and departure air traffic flow in the vicinity of the field by means of the genetic algorithm 8

Mikhaylin D.A.

Neural network algorithm safe overflight aerial obstacles and prohibited land areas 18

Chekhov I.A., Chekhov O.I.

Formation algorithm of dynamic turn for unmanned aerial vehicles on approach 25

TRANSPORT

Samoilenko V.M., Petrov Y.V., Ratenko O.A.

Temperature distribution in multilayer metal-ceramic coatings under nonstationary thermal effects 33

Ogunvoul B.D., Balanchuk E.A., Kandyba K.S.

Fault diagnosis of an aircraft control surfaces with an automated control system 41

Assorov N.A.

On the arrival traffic flow organization 52

Nechaev E.E., Surint P.S.

Analysis of air traffic control management at airports with low flight intensity in foreign countries 59

Maryukhnenko V.S., Erokhin V.V.

Structural synthesis of navigation support of triad integrated navigation system on the basis of inertial and satellite technologies 69

Lugovaya A.V., Konovalov A.E.

Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management 78

Skrypnik O.N.

Coordinate systems and transformations for air navigation tasks 88

Chekhov I.A.

Ways of navigation systems development within the implementation of the CNS / ATM concept 98

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Tel'puhovskaya O.N.

The modeling of air situation using object-oriented programming system 107

Rudel'son L.E., Smorodskiy S.N., Stepanenko A.S.

Strategy of data integrity control for system wide information management concept 114

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Nechayev E.E., Deryabin K.S.

Characteristics of airborne interferometric synthetic aperture radar with sector scan 127

Stukalov S.B., Stukalov D.S., Kondrikov V.I.

Opportunities of electro-optic visualization practical applications on board the aircraft 135

MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

Kartyshev O.A., Nikolaykin N.I.

Projects on airports, airfields, helicopter aerodromes and landing grounds sanitary protection areas as the basis of their activity compliance assessment to ecological requirements..... 146

Vorob`yov V.V., Vlasova A.V.

The role of navigational aids in flight safety management within ICAO global air navigation plan. 156

Feoktistova O.G., Turkin I.K., Barinov S.V.

Relevance of process risk assessment in airlines 162

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-8-17

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОТОКОВ ПРИЛЕТА
И ВЫЛЕТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В РАЙОНЕ АЭРОДРОМА
С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ¹, В.Б. МАЛЫГИН², Д.А. МИХАЙЛИН¹

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

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

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ
(гранты № 16-08-00070 и № 17-29-03185)

Повышение эффективности работы аэродрома в значительной степени зависит от качества решения проблем на границах взаимодействия различных технологических участков, в том числе использование одной взлетно-посадочной полосы (ВПП) прилетающими и вылетающими воздушными судами (ВС). При определенной интенсивности вылетающего и прилетающего потоков движения воздушных судов неизбежно возникает конфликт их интересов, где расставить приоритеты зачастую бывает сложно даже для опытных диспетчеров, вследствие чего возникают ошибки при принятии решения.

В данной работе сформулирована задача оперативной коррекции времени посадки и взлета воздушных судов, использующих одну ВПП в условиях возникновения конфликта интересов «прилет-вылет» при повышенной операционной интенсивности. Выбор варианта оптимального решения производится с учетом обоюдных интересов без полного перебора и оценки всех вариантов решения.

В этой связи предложен генетический алгоритм, предлагающий простой и эффективный подход к решению задачи выбора оптимального управления при обеспечении безопасности полетов на приемлемо высоком уровне. В качестве критериев оценки оптимальности выбора используется оценка дополнительного расхода авиационного топлива.

Показаны преимущества применения генетического алгоритма при выборе решения по сравнению с принятым сегодня «командным» вариантом разрешения конфликта вылета и прилета в районе аэродрома.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, воздушные суда, генетический алгоритм, конфликт вылета-прилета.

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества подходов к решению задачи выбора оптимального компромисса между интересами вылетающих и заходящих на посадку ВС особое место занимают параметрические методы оптимизации [1–4]. Среди них методы линейного и целочисленного программирования (Лангража) и т. п. Как правило, эти методы используют один заданный или сформулированный критерий оптимизации. Классическим критерием является расход топлива. Однако на практике одного критерия бывает недостаточно, что приводит к снижению продуктивности решения. Применение численных методов оптимизации с полным перебором всех вариантов решения имеет ограничения ресурсов памяти вычислителя и времени решения. С увеличением параметров задачи время решения увеличивается в геометрической прогрессии. В этой связи все большую популярность приобретают попытки решения многокритериальных задач без полного перебора всех вариантов решения [5–11]. В этом случае говорят не о строгой оптимальности, а о наилучшем результате за меньшее число итераций.

Целью данной работы является поиск наилучшего варианта разрешения конфликта вылета и прилета при ограниченном числе итераций при условии, что в начале поиска есть некоторые рациональные варианты решения («предки»), из которых специальным образом формируется множество комбинаций этих вариантов («потомков»), позволяющих сформировать на каждом шаге эволюции улучшенное усеченное множество («элиту»). Этот подход позволяет повторять намеченные действия нужное число раз и получить ответ при следующей постановке задачи.

1. Решается задача оперативной коррекции потока прилет-вылет с помощью соответствующей задержки, позволяющей обеспечить безопасный интервал Δ между освобождением ВПП после посадки и взлетом воздушных судов. На рис. 1 показана картина потока прилета и вылета на одну ВПП при наличии общего числа M_0 свободных стоянок на перроне. На рулежной дорожке скопилось очередь ВС, ожидающих разрешения взлета, которым заходящие на посадку ВС не позволяют осуществить вылет, т. к. нарушится условие обеспечения безопасности полетов (БП) вследствие нарушения безопасного интервала Δ , предусмотренного в этом случае в каждом аэропорту.

2. Условием наступления негативного авиационного события – нарушения уровня БП можно считать сокращение временного интервала между моментом разрешения экипажу ВС посадки t_i и моментом начала разбега при взлете τ_i i -й пары ВС менее допустимого $|t_i - \tau_i| < \Delta$.

3. Необходимо не допускать сокращения интервала Δ путем планирования задержек прилета или вылета по актуальным парам ВС, число которых задано и равно n .

4. Разобьем n упомянутых событий прилета и вылета на две группы. В первой группе момент τ_i наступает раньше момента t_i , т. е. в приоритете интересы вылетающего ВС конфликтующей пары (после наступления момента τ_i управляющие воздействия со стороны диспетчера будут связаны с заходящим на посадку ВС), во второй группе – наоборот. При этом условие безопасности выполняется для обеих групп. С точки зрения сложности того или иного варианта воздействия со стороны диспетчера на пару ВС следует отдать предпочтение второй группе.

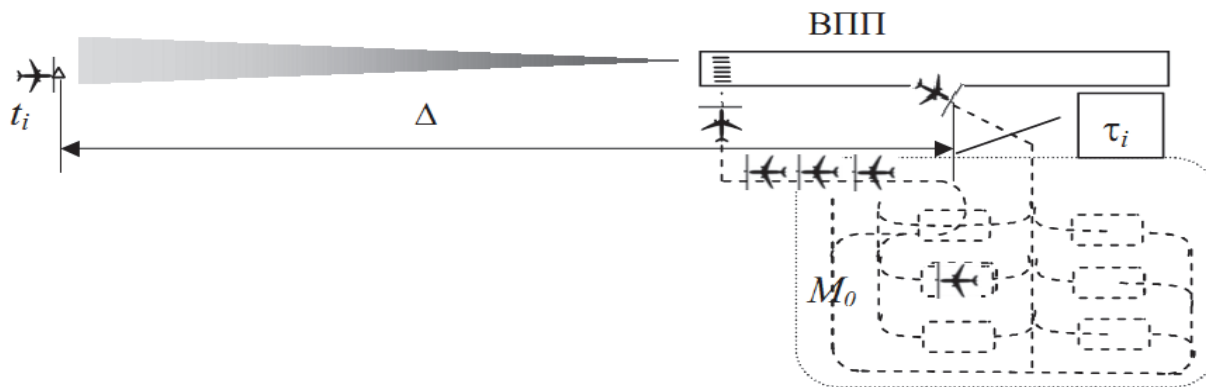


Рис. 1. Конфликт интересов обеспечения вылета и прилета в районе аэродрома
Fig. 1. The conflict of interests to ensure departure and arrival in the vicinity of the aerodrome

Действительно, задержать вылет ВС, находящегося на исполнительном старте на земле, легче и надежнее, чем вмешиваться в пилотирование и давать указания экипажу по регулированию скорости заходящего на посадку ВС или отправлять его на повторный заход. Критическим состоянием в обеих группах является скопление в секторе УВД такого количества ВС, которое диспетчер не в состоянии обслужить. В первой группе это состояние наступает в воздухе, во второй – на земле. В качестве примера такого состояния можно считать отсутствие свободных стоянок на перроне $M_0 = 0$. Наступление этого события делает невозможным выполнение посадок вообще. Аналогично можно обозначить ситуацию воздушной «пробки» через $\Pi_0 = 0$. Примем обе группы событий n_1 и n_2 равными:

$$n_1 = n_2 = 0,5 n.$$

5. В целях недопущения нарушения уровня БП рассмотрим следующие возможности применения управляющих воздействий для обеих групп, сопряженные с дополнительными затратами топлива.

Для первой ($t_i > \tau_i$) и второй ($\tau_i > t_i$) групп событий имеются следующие альтернативные решения $j = 1, 2, 3$:

а) $j = 1$ – задержать прилет на раннем этапе захода на посадку путем применения векторения, увеличив тем самым момент времени t_i на величину $[\Delta - (t_i - \tau_i)]$, что неизбежно приведет к дополнительному расходу топлива за счет увеличения времени полета;

б) $j = 2$ – отправить заходящее на посадку ВС на повторный заход, т. е. задержать прилетающее ВС на значительное время T ($T > \Delta$). Безусловно, это окажет влияние на весь прилетный поток и может привести к ситуации Π_0 ;

с) $j = 3$ – задержать вылетающее ВС на время $(\Delta + \delta_i)$, пока заходящее на посадку ВС не освободит ВПП после посадки. В этом случае дополнительные затраты топлива потребуются при ожидании разрешения на взлет.

6. На вероятность наступления событий Π_0 и M_0 существенное влияние может оказывать интервал времени $\zeta_{(i,i+1)}$ между этапами решения – интервал времени между окончанием решения по текущей паре ВС и началом решения по следующей паре ВС.

По параметру $\zeta_{(i,i+1)}$ возможны следующие варианты:

– $\zeta_{(i,i+1)} \gg \Delta$ – влияние не оказывается;

– $\zeta_{(i,i+1)} > \Delta + S_\Delta$ – влияние имеется, но требуется дополнительное расстояние S_Δ или временной интервал, гасящий инерцию завершения решения задачи по конкретной паре ВС. Например, после разрешения взлета и окончания решения задачи по конкретной i -й паре ВС необходимо дождаться примерного равенства скоростей взлетающего ВС текущей пары и заходящего на посадку ВС следующей $i+1$ -й пары ВС;

– $\zeta_{(i,i+1)} \leq \Delta + S_\Delta$ – влияние, вынуждающее авиадиспетчера решать задачу по следующей паре ВС в рискованном темпе, что зачастую приводит к ошибочным решениям.

7. В целом процесс прилета-вылета характеризуется следующей группой заданных параметров:

Δ – минимальное время между разрешением посадки и взлета, гарантирующее безопасность;

n – число пар ВС, образующих две группы равной численности n_1 и n_2 ;

M_0 – общее число стоянок на перроне;

M – число свободных стоянок на перроне;

T – время ухода на повторный заход;

C_ϕ – коэффициент потерь топлива за задержку вылета при включенных двигателях;

C_Π – коэффициент потерь топлива за задержку прилета, $C_\Pi > C_\phi$.

Каждая пара ВС характеризуется параметрами:

t_i – момент времени выдачи разрешения на посадку;

τ_i – момент времени выдачи разрешения на взлет и начало разбега при взлете;

δ_i – модуль разности времен t_i и τ_i ($\delta_i > \Delta$);

Δt_i – априорное время задержки посадки по одному ВС до оперативной коррекции потока;

$\Delta \tau_i$ – априорное время задержки при вылете для аналогичных условий;

$\zeta_{(i,i+1)}$ – интервал времени между завершением решения задачи по текущей паре ВС и наступлением момента начала решения задачи по следующей паре ВС.

Таким образом, каждая пара ВС характеризуется вектором состояния

$$\varphi_i = [\delta_i, \Delta t_i, \Delta \tau_i, \zeta_{(i,i+1)}].$$

Требуется:

- определить состав частных показателей качества управляющих воздействий, учитывающих как задержки времени прилета и вылета, так и дополнительные затраты топлива (потери топлива);
- сформулировать общий критерий J эффективности в виде единой свертки частных показателей, чтобы использовать его для отбора лучших вариантов плана;
- определить основные параметры генетического алгоритма поиска оптимума и составить программу его работы;
- произвести моделирование действия генетического алгоритма оптимизации и оценить результаты.

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЕДИНОГО КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОТОКА ПРИЛЕТА-ВЫЛЕТА

В качестве частных показателей качества коррекции на каждом i -м шаге общей задачи примем следующие параметры:

- σ_i – дополнительные потери топлива;
- $\beta_{cp.i}$ – итоговое среднее время задержки прилета и вылета;
- $\beta_{max.i}$ – максимальное время задержки i -й пары;
- ρ_i – потери времени на последующем шаге от решения на текущем шаге;
- μ_i – дополнительные потери из-за недостатка свободных стоянок на перроне ($M_i = M_0$).

Все эти параметры зависят от вектора состояния пары φ_i и от номера альтернативы управляющего воздействия j . В частности, для $j = 1$ результат анализа качества коррекции можно записать как систему правил:

$$\begin{aligned}\sigma_i &= C_{\pi} (\Delta - \delta i); \\ \beta_{cp.i} &= (\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i - \delta i) 0,5; \\ \beta_{max.i} &= \max(\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i - \delta i); \\ \rho_i &= Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}}; \mu_i = 0.\end{aligned}\tag{1}$$

Аналогичным образом можно с учетом различных задержек времени и потерь топлива для альтернатив ($j = 2$) сформулировать аналогичные правила:

$$\begin{aligned}\sigma_i &= C_{\pi} T; \\ \beta_{cp.i} &= (\Delta t_i + \Delta \tau_i + T) 0,5; \\ \beta_{max.i} &= \max(\Delta t_i + T/\Delta \tau_i); \\ \rho_i &= Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}}; \mu_i = 0.\end{aligned}\tag{2}$$

Соответственно для альтернативы $j = 3$ имеем:

$$\begin{aligned}\sigma_i &= C_{\pi} (\Delta + \delta i); \\ \beta_{cp.i} &= (\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i + \delta i) 0,5; \\ \beta_{max.i} &= \max(\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i + \delta i); \\ \rho_i &= Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}}; \mu_i = T/M_0.\end{aligned}\tag{3}$$

Для проведения оценки качества корректирующих воздействий в целом, можно в общем случае использовать хорошо зарекомендовавшую себя в других подобных задачах [3, 4] свертку, равную сумме линейных и мультипликативных слагаемых

$$J = K_1 \sum \sigma_i + K_2 \sum \beta_{cp.i} + K_3 \sum \beta_{max.i} + K_4 \sum \rho_i + K_5 \sum \mu_i + K_6 \prod \sum \sigma_i \cdot \sum \beta_{cp.i} \cdot \sum \rho_i \cdot \sum \mu_i \Rightarrow \min. \quad (4)$$

Последний член в (4) позволяет получить более сбалансированное решение. Для упрощения расчетов в статье применяется только линейная свертка, а весовые коэффициенты и коэффициенты потерь установлены опросом экспертов:

$$K_1 = 0,4; K_2 = 0,2; K_3 = 0,1; K_4 = 0,1; K_5 = 0,2; K_6 = 0; C_b = 1; C_n = 4; \Delta = 10; T = 15; M_0 = 5; n = 6.$$

Чтобы свести (1)–(4) в единое целое в виде локального критерия J_i для одной пары, воспользуемся следующим:

$$J_i = \begin{cases} 0,4C_n(\Delta - \delta_i) + 0,1(\Delta t_i + \Delta + \tau_i - \delta_i)0,5 + 0,1\max[\Delta t_i + \Delta + \tau_i + \delta_i] + 0,1Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}} & \text{для } j=1; \\ 0,4C_n T + 0,1(\Delta t_i + \Delta \tau_i + T)0,5 + 0,1\max\left[\Delta \tau_i + \frac{T}{\Delta \tau_i}\right] + 0,1Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}} & \text{для } j=2; \\ 0,4C_b(\Delta + \delta_i) + 0,1(\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i + \delta_i)0,5 + 0,1\max[\Delta t_i + \Delta + \Delta \tau_i + \delta_i] + 0,1Te^{-\frac{2\xi_i}{\Delta}} + \frac{T}{M_0} & \text{для } j=3. \end{cases} \quad (5)$$

Соотношение (5) будет использовано при выборе лучших вариантов решения на каждом шаге работы генетического алгоритма [5].

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Генетический алгоритм является элементом искусственного интеллекта и воспроизводит процесс эволюции с целью совершенствования свойств определенного вида живой природы. Этот процесс состоит из трех основных видов повторяющихся операций – скрещивания, мутации и отбора лучших представителей – «элиты». При этом для того, чтобы запустить этот процесс, необходимо иметь начальное множество исходных представителей («предков»). При этом обычно число предков N невелико. Зато после их скрещивания и мутации оно резко возрастает. Полученные «потомки» обладают самыми разнообразными свойствами – как худшими, так и лучшими. В завершение одного шага (v) эволюции происходит отбор лучших предков при заданной целевой функции отбора – в нашем случае вычисляется сумма $\sum_{i=1}^n J_i$ по формуле (5).

Далее процесс эволюции повторяется, и в качестве «предков» рассматривается «элита», полученная на предыдущем шаге эволюции. Преимущество генетического алгоритма заключается в том, что за ограниченное число попыток внесения детерминированного и стохастического разнообразия удается достаточно быстро достичь не строго оптимального, но близкого к нему решения.

Рассмотрим действие генетического алгоритма на конкретном примере. Примем в качестве начальной «элиты» упомянутые три альтернативы решения задачи (j) на каждом ее шаге, число которых ($n = 6$). Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

i	1	2	3	4	5	6
δi	2	-3	5	-1	-2	3
Δt_i	5	10	15	0	40	45
$\Delta \tau_i$	60	25	30	80	0	70
$\zeta_{(i,i+1)}$	6	15	8	13	16	20

Произведенные расчеты функции J_i для трех альтернатив j представлены в табл. 2. Генетическими признаками или атрибутами являются три ранее описанные альтернативы j для шести шагов общей задачи. В первых шести ячейках каждой строки представлены значения локальных критериев, вычисленных по формуле (5).

Итоговые аддитивные суммы локальных критериев для каждого варианта («предка»), оцениваемые одним числом и стремящиеся минимизировать несовершенство качества произведенной коррекции, представлены в последнем столбце. Таким образом, число «предков» в «элите» ($N = 3$) равно трем, число генетических признаков ($U = 6$) равно шести.

Таблица 2
Table 2

i/j	1	2	3	4	5	6	$\sum_{i=1}^6 J_i$
1	22,8	13,3	18	24,8	14,4	35,2	128,5
2	21,2	17,4	16,1	32	14,4	35,4	136,5
3	25,2	17,4	16,1	32	14,4	35,2	130,3

В качестве процедуры скрещивания разобьем генетический код каждого варианта «предка» на отдельные блоки, число которых ($r = 2$), т. е. меньше N . В этом случае каждому варианту соответствуют два блока по три генетических признака в каждом. Пронумеруем их, как показано на рис. 2, а ниже перечислим результаты скрещивания.

Вариант 1						Вариант 2						Вариант 3					
1	2	—	—	—	—	—	—	—	3	4	—	—	—	—	—	—	—
1	4	—	—	—	—	—	—	—	3	2	—	—	—	—	—	—	—
1	6	—	—	—	—	—	—	—	3	6	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 2. Множество потомков после скрещивания при $N = 3$, $r = 2$

Fig. 2. Variety of descendants after crossing with $N = 3$, $r = 2$

Из рис. 2 видно, что получилось 9 «потомков». В качестве процедуры мутации заменим назначенный случайным образом один из генетических признаков другим, т. е. пусть число мутлируемых признаков ($\phi = 1$). При этом мутации будут подвергаться все «потомки», полученные после «скрещивания». Пользуясь логикой одной непротиворечивой замены другой, произведем замену признаков по следующему правилу:

$$\begin{aligned}
 &\text{вместо } j = 1 \text{ поставим } j = 2; \\
 &\text{вместо } j = 2 \text{ поставим } j = 3; \\
 &\text{вместо } j = 3 \text{ поставим } j = 1.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Таким образом, вместе с исходными вариантами получилось 9 мутаций на одном шаге эволюции. Процедуру отбора лучших вариантов, входящих в новую «элику», проведем с помо-

щью формулы (5) – оценка несовершенства качества каждого из 9-ти «потомков» после «скрещивания» и 9-ти «потомков» после мутации. Из полученных 18 оценок выберем три с наименьшей величиной потерь, которые и будут лучшими представителями в анализируемом поколении. Необходимо отметить, что на одном шаге (v) эволюции может быть устранен только один несовершенный признак, поэтому для его устранения необходимо произвести $0,5n$ попыток (шагов). Так как число «потомков» при «скрещивании» и мутации одинаково и равно N^r , можно получить следующую общую формулу подсчета среднего числа (L) вычислений суммированных оценок $J_0 = \sum_{i=1}^n J_i$ для каждого представителя на всех шагах эволюции:

$$L = 0,5n^2 N (N^{r-1} + n + 1). \quad (7)$$

При $n = 6$, $r = 2$; $N = 3$; $\varphi = 1$ получим $L = 540$, что меньше, чем полный перебор всех вариантов $N^n = 729$. Число попыток (v) при удачном выборе начальной «элиты» невелико и не превосходит n .

На рис. 3 представлена укрупненная блок-схема генетического алгоритма.

Результаты моделирования на одном шаге эволюции представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, итоговая сумма локальных критериев после удачной мутации на первом шаге эволюции составила минимум потерь. Для получения достигнутого результата понадобилось сформировать 9 «потомков» при «скрещивании» и 18 при мутации – всего 27 представителей одного поколения. Более детальный анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- минимальная задержка вылета и прилета после оптимизации корректирующих воздействий для условий данной задачи составляет не более 26 мин;
- за счет применения генетического алгоритма для оптимизации решений авиадиспетчера по управлению потоком прилет-вылет экономия топлива на дополнительные задержки может составить 40 %.

Таблица 3
Table 3

J_i / i	1	2	3	4	5	6	$\sum_{i=1}^6 J_i$
Отбор после скрещивания	21,2	17,4	16,1	24,8	14,4	35,2	119,1
Отбор после мутации	21,2	13,3	16,1	24,8	14,4	35,2	115

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенный генетический алгоритм оказался эффективным средством повышения качества коррекции потока прилетающих и вылетающих ВС в районе аэродрома и на его площади маневрирования. Основной эффект состоит в экономии дополнительных затрат топлива в результате оптимального управления с условием обеспечения БП.

2. Невысокая трудоемкость вычислений по генетическому алгоритму позволяет применять данный механизм оптимизации на практике в условиях повышенной интенсивности прилета и вылета на конкретном аэродроме.

3. Для строгого учета взаимовлияния пар конфликтующих между собой ВС целесообразно использовать более совершенные математические модели воссоздания динамической обстановки в районе аэродрома, в частности, используя теорию марковских цепей и теорию массового обслуживания.

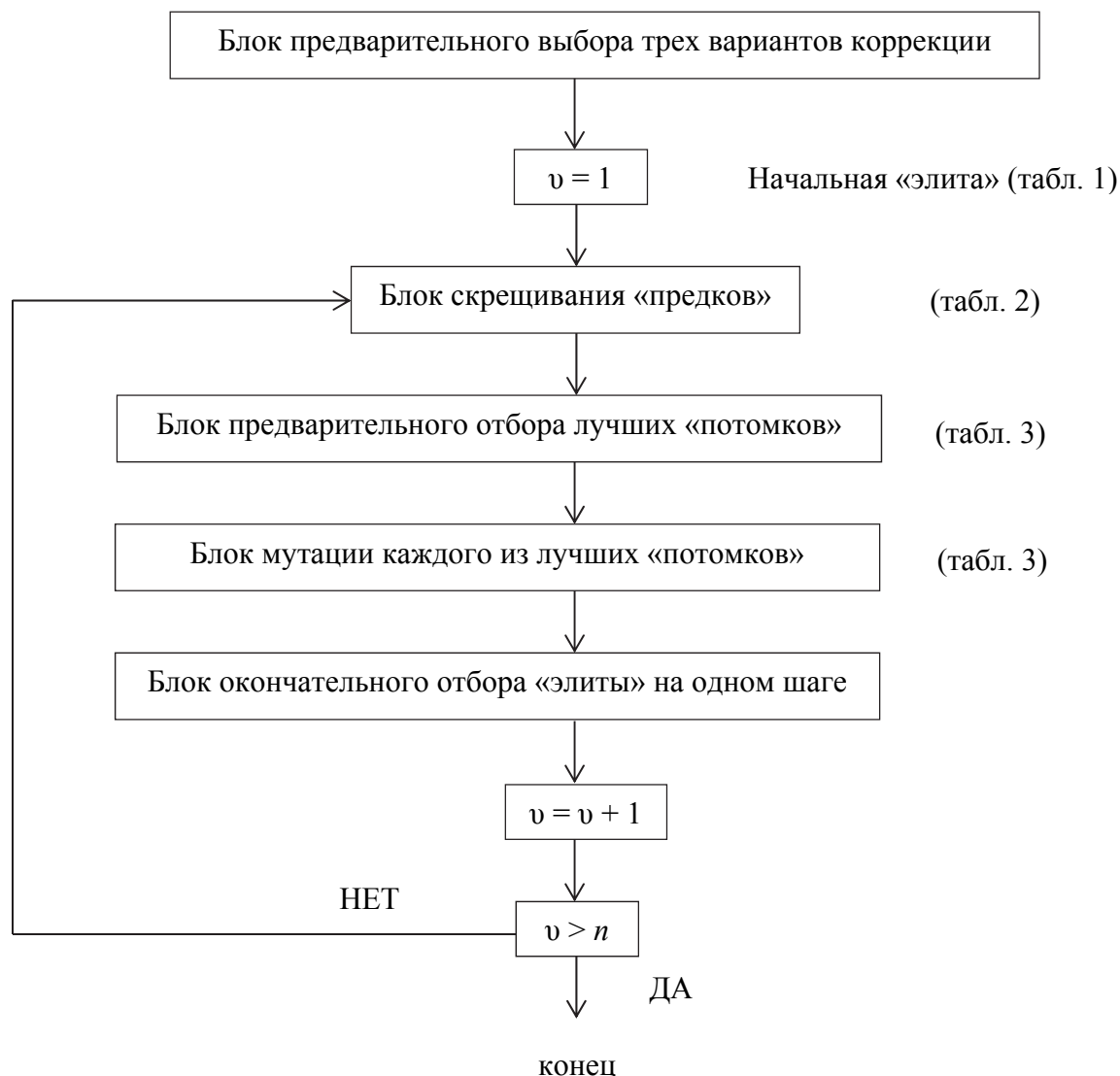


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма
Fig. 3. The flow chart of the genetic algorithm

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Г.Н. и др. Теория оптимальных систем. М.: МАИ, 1993. 317 с.
2. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
3. Лебедев Г.Н. и др. Планирование работы компьютерных систем индивидуального обучения и повышение их эффективности // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 11. С. 47–54.
4. Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л. Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многосегментной системы // Нейрокомпьютеры. 2008. № 7. С. 85–88.
5. Лебедев Г.Н., Балашова Н.М. Интеллектуальные системы управления. М.: МГТУ, 2000. 117 с.
6. Лебедев Г.Н., Мирзоян Л.А. Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 12.
7. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Нейросетевое планирование маршрута разнорысотного полета беспилотного летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 3–8.

8. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Система логического управления обходом препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Электронный журнал «Труды МАИ». 2015. № 83.

9. Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата / А.В. Кузин, Д.В. Курмаков, А.В. Лукьянов, Д.А. Михайлин // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 70.

10. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е. Алгоритм назначения приоритетной очередности случайно расположенным в пространстве воздушным судам для выхода на стандартный маршрут прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 31–36.

11. Управление полетом пассажирских самолетов при пересечении их маршрутов во время захода на посадку / Г.Н. Лебедев, П.Ч. Тин, М.Т. Зо, А.В. Медведев // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 63.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: kaf301@mai.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, авиадиспетчер МЦ АУВД, e-mail: mbv898@ya.ru.

Михайлин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент Московского авиационного института (НИУ) e-mail: tau_301@mail.ru.

PROBLEM SETTING AND SOLUTION OF THE RESPONSE CORRECTION OF ARRIVAL AND DEPARTURE AIR TRAFFIC FLOW IN THE VICINITY OF THE FIELD BY MEANS OF THE GENETIC ALGORITHM

Georgii N. Lebedev¹, Vyacheslav B. Malygin², Denis A. Mikhaylin¹

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

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

ABSTRACT

The improvement in the effectiveness of airfield operation largely depends on the problem solving quality on the interaction boundaries of different technological sections. One of such hotspots is the use of the same runway by inbound and outbound aircraft. At certain intensity of outbound and inbound air traffic flow the conflict of aircraft interests appears, where it may be quite difficult to sort out priorities even for experienced controllers, in consequence of which mistakes in decision-making unavoidably appear.

In this work the task of response correction of landing and takeoff time of the aircraft using the same RW, in condition of the conflict of interests “arrival – departure” at the increased operating intensity is formulated. The choice of optimal solution is made taking into account mutual interests without the complete sorting and the evaluation of all solutions.

Accordingly, the genetic algorithm, which offers a simple and effective approach to optimal control problem solution by providing flight safety at an acceptably high level, is proposed. The estimation of additional aviation fuel consumption is used as optimal choice evaluation criterion.

The advantages of the genetic algorithm application at decision-making in comparison with today’s “team” solution of the conflict “departure – arrival” in the airfield area are shown.

Key words: safety control, optimal control, aircraft, genetic algorithm, the conflict “departure – arrival”.

REFERENCES

1. **Lebedev G.N. et al.** *Teoriya optimalnykh sistem* [The theory of optimum systems]. Moscow, MAI, 1993, 317 p. (in Russian)
2. **Sobol E.M., Statnikov R.B.** *Vybor optimalnykh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami* [The selection of the optimum parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Science, 1981, 110 p. (in Russian)
3. **Lebedev G.N. et al.** *Planirovanie raboty kompyuternykh sistem individualnogo obucheniya I povyshenie ih effektivnosti* [Planning of the work of the computer systems of individual training and an increase in their effectiveness]. The Bulletin of Computer and Information Technologies, 2009, no 11, pp. 47–54. (in Russian)
4. **Zaytsev A.V., Talimanchuk L.L.** *Intellectualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogosegmentnoy sistemy* [Intellectual system of decision making for evaluating the scientific activity on the basis of the multisegment system]. Neurocomputers, 2008, no. 7, pp. 85–88. (in Russian)
5. **Lebedev G.N., Balashov N.M.** *Intellektualnye sistemy upravleniya* [Intellectual systems for control]. M., MGGU, 2000, 117 p. (in Russian)
6. **Lebedev G.N., Mirzozan L.A.** *Neyrosetevoe planirovanie deystviy po obletu nazemnykh obektov gruppy letatelnykh apparatov* [Neural network action planning to fly around ground objects by a group of aircraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2005, no. 12. (in Russian)
7. **Lebedev G.N., Rumakina A.V.** *Neyrosetevoe planirovanie marshruta raznovyisotnogo poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Neural network path planning of a vari-level unmanned aircraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2014, no. 5, pp. 3–8. (in Russian)
8. **Lebedev G.N., Rumakina A.V.** *Sistema logicheskogo upravleniya obhodom prepyatstviy bespilotnyim letatel'nyim apparatom pri marshrutnom polete* [The logical control system with obstacle avoidance of an unmanned aircraft in flight route]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Journal “Trudy MAI”], 2015, no. 83. (in Russian)
9. **Kuzin A.V., Kurmakov D.V., Lukyanov A.V., Mihajlin D.A.** *Neyrosetevaya realizatsiya avtomaticheskogo upravleniya bezopasnoy posadki bespilotnogo letatel'nogo apparata* [The neural network implementation of the automatic control over the safe landing of an unmanned aircraft]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Journal “Trudy MAI”], 2013, no. 70. (in Russian)
10. **Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E.** *Algoritmy naznacheniya prioritetnoy ocherednosti sluchayno raspolyozhennykh v prostranstve vozdukhnykh sudov dlya vyihoda na standartnyy marshrut pribyitiya* [The algorithm used to assign the priority sequence randomly located in space aircraft for exit to the standard arrival route]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2013, no. 198, pp. 31–36. (in Russian)
11. **Lebedev G.N., Tin P.Ch., Zo M.T., Medvedev A.V.** *Upravlenie poletom passazhirskikh samoletov pri peresechenii ih marshrutov vo vremya zahoda na posadku* [Flight control passenger aircraft crossing their routes during landing]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»*, 2013, no. 63. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Georgii N. Lebedev, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automatic and Intelligent Control Chair of Moscow Aviation Institute (National research university), kaf301@mai.ru.

Vyacheslav B. Malygin, Air Traffic Controller in Moscow Air Traffic Control Centre, mbv898@ya.ru.

Denis A. Mikhaylin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University), tau_301@mail.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

21.02.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

21.02.2017
25.05.2017

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ БЕЗОПАСНОГО ОБЛЕТА ВОЗДУШНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ И ЗАПРЕЩЕННЫХ НАЗЕМНЫХ ЗОН

Д.А. МИХАЙЛИН¹

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

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ
(гранты № 15-08-00043, № 17-29-03185 и №16-08-00070)

В статье рассматривается алгоритм безопасного облета препятствий при выполнении маршрутного полета пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами. Проведен анализ типовых препятствий, возникающих на пути следования летательного аппарата. Показано, что применение нейронных сетей для решения указанной задачи позволяет повысить быстродействие системы управления и итоговую безопасность полета, что подтверждается моделированием. В качестве структуры нейронной сети предложено использовать многослойную сеть последовательного распространения. При этом в данной работе использовалась нейронная сеть с тремя слоями. В решаемой задаче, где рассматривается движение летательного аппарата в плане, важно наличие данных о координатах Z вершин препятствия. Таким образом, было определено число входов нейронной сети, равное четырем, а число альтернатив, определяющих количество выходов нейронной сети, соответственно – пяти, так как не исключается вариант продолжения полета летательным аппаратом по исходному маршруту. В результате сформирована обучающая выборка в виде таблицы. После обучения нейронной сети было проведено моделирование ее работы с учетом заранее сформированных препятствий.

Ключевые слова: нейронная сеть, безопасность полета, летательный аппарат, маршрут.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении маршрутных полетов в ряде случаев на пути заданного движения могут быть обнаружены внезапные воздушные препятствия – дирижабли, привязные аэростаты, грозовой фронт, стратостаты и подобные, а также ряд запрещенных наземных зон, в том числе крупные населенные пункты. В этом случае необходимо быстрое решение по безопасному уклонению от этих препятствий, после чего последует возвращение на заданный маршрут полета.

Существующие в настоящее время подходы к решению задачи планирования маршрута полета в первую очередь относятся к процессу наблюдения неподвижных объектов [1]. Известно множество методов маршрутизации, начиная от метода ветвей и границ и заканчивая нейросетевыми алгоритмами планирования, когда в исходных данных указаны заданные координаты местоположения нужных наблюдаемых объектов, а результатом решения задачи является последовательность облета пунктов планируемого маршрута (ППМ).

Однако в этих методах недостаточное внимание уделено выбору маршрута облета препятствий, возникающих в ходе полета, иначе говоря, тех, информация о которых не заложена в память БЦВМ перед вылетом. Особенность этого вопроса применительно к пилотируемой авиации состоит в дефиците времени на принятие решения, а к беспилотным летательным аппаратам (БЛА) в том, что в случае внезапных изменений динамической обстановки перепланирование полета должно осуществляться без участия человека в автоматическом режиме [2].

Большое разнообразие полетных ситуаций по числу встречаемых препятствий и, главное, по их относительному местоположению по сравнению с заданной линией пути требует формирования универсального алгоритма выбора лучшего варианта уклонения, обладающего в то же время высоким быстродействием. Этим требованиям удовлетворяют нейросетевые алго-

ритмы, на вход которых подаются сигналы в виде координат, характеризующих очередное препятствие и текущее положение летательного аппарата, а на выходе формируется рекомендуемая альтернатива облета препятствия.

В данной работе задача решается в предположении, что препятствия имеют форму прямоугольников, произвольно ориентированных относительно заданной линии пути.

При этом требуется разбить траекторию полета на ряд участков, выполняющих простые полетные операции (режимы), определив границы этих участков в виде ПППМ (промежуточные пункты планируемого маршрута) и задав тем самым логику многорежимного управления при отсутствии препятствий, а в случае имеющихся препятствий определить дополнительные промежуточные ПППМ для их обхода.

При этом считается, что облет осуществляется при горизонтальном полете на одной высоте.

АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И ЗАДАННОЙ ЛИНИИ ПУТИ

Как показано в [3], перелет из текущей точки маршрута в очередную точку должен происходить внутри прямоугольной области, ограниченной текущим пунктом с одной стороны и очередным с другой. Пример такой области приведен на рис. 1.

При этом различают крупные и мелкие препятствия.

Крупным считается такое препятствие, у которого одно из измерений больше соответствующего измерения прямоугольной области перелета, то есть облет препятствия без выхода из полетной области невозможен. Если одновременно и большая и меньшая границы препятствия выходят из зоны, препятствие считается крупным, и алгоритм переходит к назначению точек облета препятствия вне области, выбирая кратчайший маршрут. Координаты назначенных точек записываются в обновленное полетное задание, алгоритм переходит к проверке следующего препятствия.

Для встречи с мелкими препятствиями в [3] рассмотрены возможные расположения препятствий относительно полетной зоны, когда между ними есть пересечения или касания, в этом случае их необходимо облетать. Все ситуации, когда пересечения или касания нет, сведены в особую ситуацию «нет угрозы». Примеры взаимного расположения приведены на рис. 2.

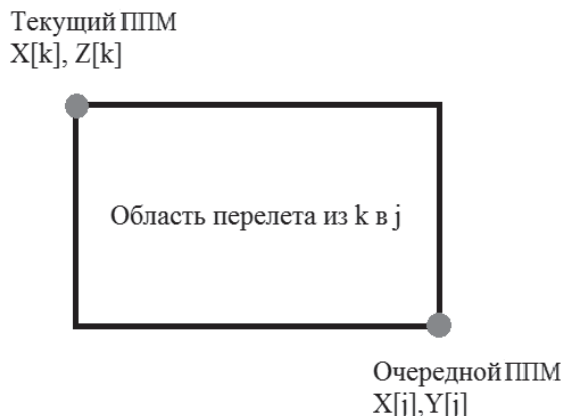


Рис. 1. Пример прямоугольной области перелета в очередной пункт маршрута
Fig. 1. An example of the rectangular flight area to the next destination

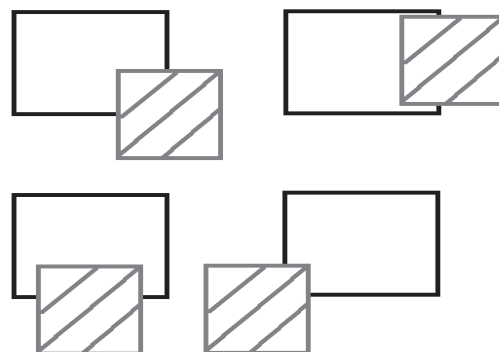


Рис. 2. Примеры взаимного расположения области перелета (черный прямоугольник) и препятствия (заштрихованная область)
Fig. 2. Examples of the mutual arrangement of an overflying area (a black rectangle) and obstacles (shaded area)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИМЕРОВ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ОБЛЕТЕ ПРЕПЯТСТВИЙ

Прежде всего необходимо остановиться на характеристиках самой нейронной сети. В данной работе используется успешно зарекомендовавшая себя многослойная сеть последовательного распространения [4–11], легко обучаемая с помощью существующих стандартных программ NeuroPro в среде Matlab. К характеристикам такой сети относятся:

- число слоев и число нейронов в каждом слое;
- число входных сигналов;
- число выходных альтернатив принятия решений;
- весовые коэффициенты и пороговые значения каждого нейрона, которые определяются в результате компьютерного обучения.

В данной работе используется широко распространенный случай применения трех слоев: входного, промежуточного и выходного. При этом число нейронов во входном слое было принято равным числу входных сигналов, соответственно число нейронов в выходном слое – равным числу альтернатив принятия решений, а число нейронов в промежуточном слое – двум нейронам, обобщающим соответственно ситуацию слева и справа от заданной линии пути, как показано на рис. 3.

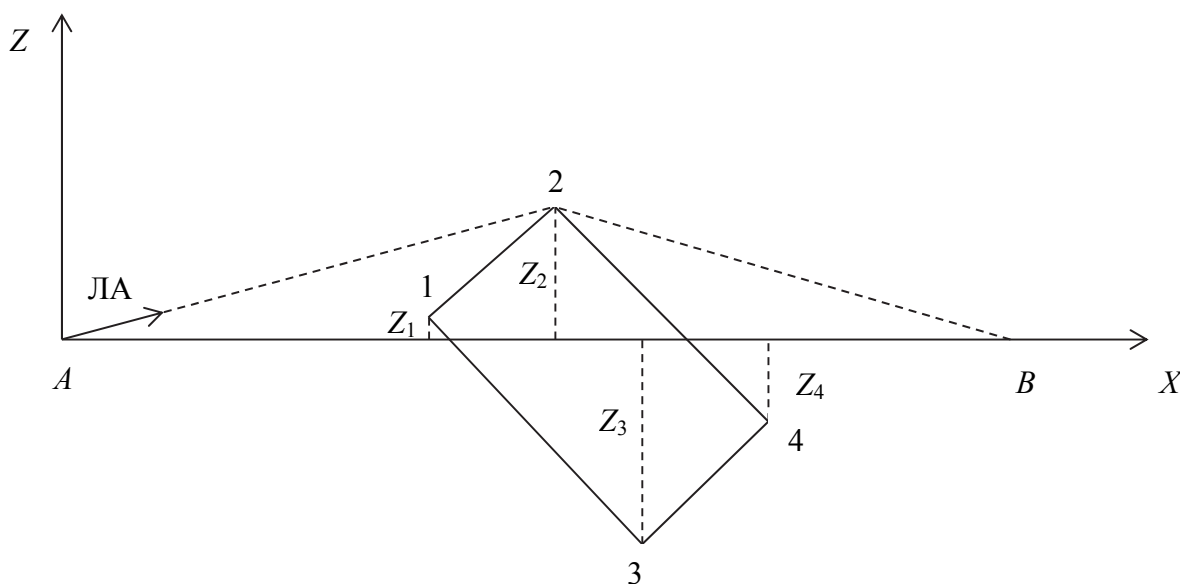


Рис. 3. Пример расположения прямоугольного препятствия на заданной линии пути
Fig. 3. An example of a rectangular obstacle arrangement on the given track

На рис. 3 нумерация вершин препятствия выполнена по мере возрастания координаты X , а главную информацию о безопасности облета содержат координаты вершин Z_i .

Видно также, что облет препятствия обусловлен вершиной 2, координата Z_2 которой, с одной стороны, является максимальной из всех координат вершин слева от линии пути, а с другой стороны, координата Z_2 меньше максимальной координаты Z_3 из всех вершин справа. В этом случае обеспечивается минимум длины нового пути облета препятствия, показанного на рис. 3 пунктиром.

Из приведенного пояснения и рис. 3 следует, что в целом возможны следующие случаи:

- все вершины прямоугольника находятся слева от заданного пути, т. е. $Z_i \geq 0$. В этом случае препятствие не представляет угрозы;
- все вершины находятся справа, т. е. $Z_i \leq 0$, что также не представляет угрозы;

– одна из вершин находится слева или справа, а остальные – по другую сторону заданной линии пути. Нетрудно доказать, что именно эта вершина входит в траекторию облета препятствия;

– наиболее сложный случай, когда две вершины находятся слева, а другие две – справа от заданной линии пути. При этом выбранной вершиной может быть любая из четырех.

Таким образом, получается, что общее число входных сигналов в первом приближении равно 4 (если использовать систему координат X и Z согласно рис. 3) $Z_i, i = 1, \dots, 4$, а число выходных альтернатив равно 5 (с учетом четырех вершин и альтернативы ($j = 5$) безопасного полета по исходному заданному пути).

Составление примеров для обучения в первых трех перечисленных случаях не представляет труда. Для последнего сложного случая составить примеры несложно, но их число должно быть достаточно большим, чтобы используемая выборка была состоятельна. В табл. 1 представлен один из вариантов этих примеров.

Таблица 1
Table 1

i	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	j
1	25	15	20	5	1
2	20	10	15	15	1
3	-30	15	-10	0	1
4	20	30	15	10	2
5	10	-20	-15	15	2
6	10	20	30	10	3
7	-10	-20	-25	-30	4

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ

При моделировании работы предложенного алгоритма в качестве тестового задания был предложен маршрут из 9 точек, одна из которых начальная. Порядок и расположение точек (ППМ маршрута) показано на рис. 4.

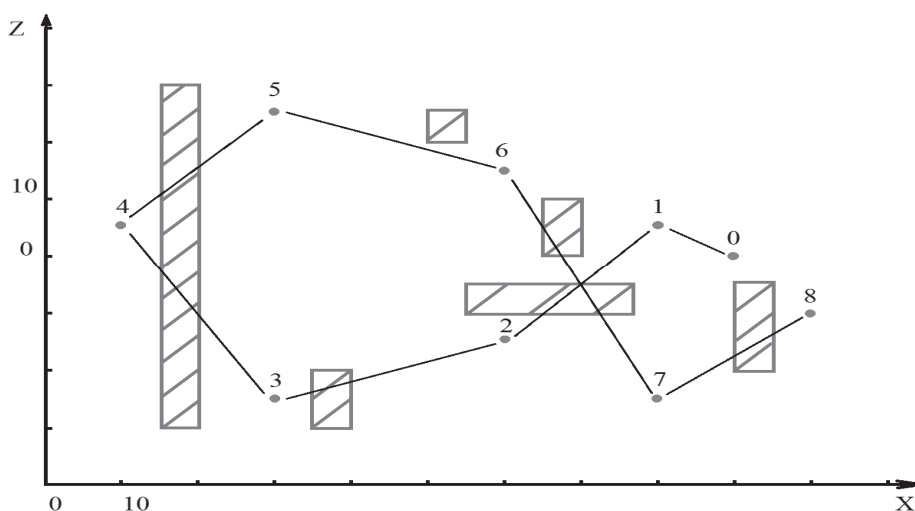


Рис. 4. Иллюстрация препятствий на пути следования ЛА
Fig. 4. The obstacles illustration on the aircraft path

Результат работы алгоритма представлен на рис. 5.

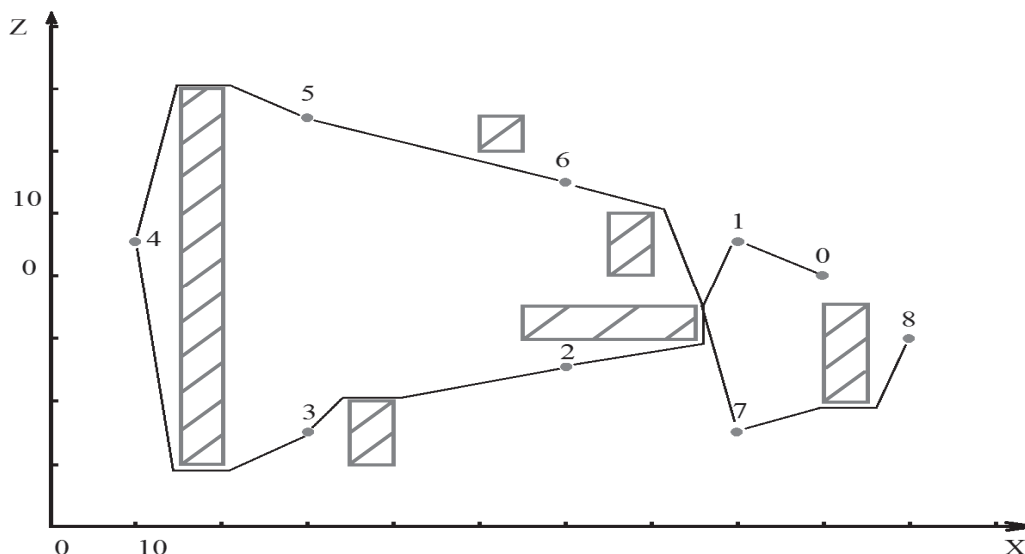


Рис. 5. Результат компьютерного моделирования работы нейросетевого алгоритма облета препятствий
Fig. 5. The result of computer simulation for operation of neural network algorithm of obstacles avoidance

Из рис. 5 видно, что в результате перепланирования новый маршрут успешно обходит все препятствия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое разнообразие полетных ситуаций по числу встречаемых препятствий требует формирования универсального алгоритма выбора лучшего варианта уклонения, обладающего в то же время высоким быстродействием. Этим требованиям удовлетворяют нейросетевые алгоритмы, на вход которых подаются сигналы в виде координат, характеризующих очередное препятствие и текущее положение летательного аппарата, а на выходе формируется рекомендуемая альтернатива облета препятствия.

В статье приводится разработанный алгоритм, который в реальном времени формирует кусочно-линейную траекторию обхода вершин препятствий.

Компьютерное моделирование маршрутного полета с учетом препятствий показало высокое быстродействие алгоритма, а также способность формировать оперативный репортаж о фактах встречи с препятствием, выборе варианта действий и сообщать координаты вновь назначенных ППМ маршрута для передачи наземным службам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Г.Н., Мирзоян Л.А. Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 12.
2. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Нейросетевое планирование маршрута разнорысотного полета беспилотного летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 3–8.
3. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Система логического управления обходом препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Электронный журнал «Труды МАИ». 2015. № 83.
4. Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата / А.В. Кузин, Д.В. Курмаков, А.В. Лукьянов, Д.А. Михайлин // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 70.

5. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е. Алгоритм назначения приоритетной очередности случайно расположенным в пространстве воздушным судам для выхода на стандартный маршрут прибытия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 198, С. 31–36.
6. Управление полетом пассажирских самолетов при пересечении их маршрутов во время захода на посадку / Г.Н. Лебедев, П.Ч. Тин, М.Т. Зо, А.В. Медведев // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. № 63.
7. Лебедев Г.Н. и др. Теория оптимальных систем. М.: МАИ, 1993. 317 с.
8. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
9. Лебедев Г.Н. и др. Планирование работы компьютерных систем индивидуального обучения и повышение их эффективности // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 11. С. 47–54.
10. Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л. Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многосегментной системы // Нейрокомпьютеры. 2008. № 7. С. 85–88.
11. Лебедев Г.Н., Балашова Н.М. Интеллектуальные системы управления. М.: МГТУ, 2000. 117 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Михайлин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент Московского авиационного института (НИУ), e-mail: tau_301@mail.ru.

NEURAL NETWORK ALGORITHM SAFE OVERFLIGHT AERIAL OBSTACLES AND PROHIBITED LAND AREAS

Denis A. Mikhaylin¹

¹Moscow Aviation Institute (national research university), Moscow, Russia

The article presents the algorithm of safe flying around obstacles when making en route flight of manned and unmanned aircraft. The analysis of obstacles in the path of the aircraft is carried out. It is shown that the application of neural networks for this problem solving allows to increase the control system performance and total flight safety. It is proved by modelling. The multilayer network consistent distribution is proposed to be used as neural network structure. In this work a neural network with three layers is used. To solve the problem the aircraft movement in plan is considered. It is important to have data on the Z coordinates of the obstacles vertices. Finally the number of neural network inputs was determined to be four. The number of alternatives, determining the number of neural network outputs is respectively five. As the continuing of the aircraft flight along the original route is possible, as a result, a training sample is in the form of a chart. After training the neural network simulations of its work were made. Obstacles have been formed in advance.

Key words: neural network, flight safety, aircraft, route.

REFERENCES

1. Lebedev G.N., Mirzozan L.A. *Neyrosetevoe planirovanie dejstviy po obletu nazemnykh obektov gruppy letatelnykh apparatov* [Neural network action planning to fly around ground objects by a group of aircraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2005, no. 12. (in Russian)
2. Lebedev G.N., Rumakina A.V. *Neyrosetevoe planirovanie marshruta raznovyisotnogo poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Neural network path planning of a vari-level unmanned aircraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2014, no. 5, pp. 3–8. (in Russian)
3. Lebedev G.N., Rumakina A.V. *Sistema logicheskogo upravleniya obhodom prepyatstviy bespilotnyim letatelnyim apparatom pri marshrutnom polete* [The logical control system with obstacle

avoidance of an unmanned aircraft in flight route]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Journal “Trudy MAI”], 2015, no. 83. (in Russian)

4. Kuzin A.V., Kurmakov D.V., Lukyanov A.V., Mihajlin D.A. *Neyrosetevaya realizatsiya avtomaticheskogo upravleniya bezopasnoy posadkoy bespilotnogo letatel'nogo apparata* [The neural network implementation of the automatic control over the safe landing of an unmanned aircraft]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Journal “Trudy MAI”], 2013, no. 70. (in Russian)

5. Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E. *Algoritm naznacheniya prioritetnoy ocherednosti sluchayno raspolyzhennym v prostranstve vozdushnyim sudam dlya vyihoda na standartnyy marshrut pribytiya* [The algorithm used to assign the priority sequence randomly located in space aircraft for exit to the standard arrival route]. *The Scientific Bulletin of MSTUCA*, 2013, no. 198, pp. 31–36. (in Russian)

6. Lebedev G.N., Tin P.Ch., Zo M.T., Medvedev A.V. *Upravlenie poletom passazhirskih samoletov pri peresechenii ih marshrutov vo vremya zahoda na posadku* [Flight control passenger aircraft crossing their routes during landing]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»*, 2013, no. 63. (in Russian)

7. Lebedev G.N. et al. *Teoriya optimalnykh sistem* [The theory of optimum systems]. Moscow, MAI, 1993, 317 p. (in Russian)

8. Sobol E.M., Statnikov R.B. *Vybor optimalnykh parametrov kompyuternykh sistem individual'nogo obucheniya i povysheniya ih effektivnosti* [The selection of the optimum parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Science, 1981, 110 p. (in Russian)

9. Lebedev G.N. et al. *Planirovanie raboty kompyuternykh sistem individual'nogo obucheniya i povysheniya ih effektivnosti* [Planning of the work of the computer systems of individual training and an increase in their effectiveness]. *The Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2009, no. 11, 47–54 pp. (in Russian)

10. Zaytsev A.V., Talimanchuk L.L. *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniya dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogosegmentnoi sistemy* [Intellectual system of decision making for evaluating the scientific activity on the basis of the multisegment system]. *Neurocomputers*, 2008, no. 7, 85–88 pp. (in Russian)

11. Lebedev G.N., Balashov N.M. *Intellektualnye sistemy upravleniya* [Intellectual systems for control]. M., MGGU, 2000. 117 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Denis A. Mikhaylin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University), tau_301@mail.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 28.02.2017
Accepted for publication 25.05.2017

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-25-32

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧЕРЕДИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ

И.А. ЧЕХОВ¹, О.И. ЧЕХОВ²

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

²ЗАО «Позитив Текнолоджиз», г. Москва, Россия

В последнее время проявляется большой интерес к использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как со стороны хозяйствующих субъектов, так и со стороны силовых ведомств. Однако для применения БПЛА в гражданских целях в настоящее время имеется ряд проблем, которые связаны с использованием воздушного пространства, и без их решения невозможно полноценное использование БПЛА. Необходимо отметить, что уровень безопасности полетов, как для обычных воздушных судов, так и для БПЛА, имеет первостепенное значение. Для определения уровня безопасности полетов необходимо использовать современные методы обработки информации и иметь возможность оперативно контролировать текущий уровень безопасности полетов. С этой целью должна использоваться наиболее полная информация о движении воздушных судов и беспилотных летательных аппаратов в текущий момент времени, а также структура используемого воздушного пространства. Задача разработки процедур и маневров, разрешающих потенциально конфликтную ситуацию между воздушными судами, в том числе и БПЛА, является крайне важной для обеспечения безопасности воздушного движения, особенно в районе аэродрома назначения или посадки. В статье рассматривается возможность построения алгоритма формирования динамической очереди и выбора траектории при заходе на посадку беспилотных летательных аппаратов. При сборе статистических данных использовалась технология автоматического зависимого наблюдения в режиме радиовещания. Реализация алгоритма посадки выполнена по критериям обеспечения экономичности и безопасности полетов. Разработанное программное обеспечение предусматривает использование только открытых данных о движении воздушных судов в районе аэродрома. Предложенный алгоритм может быть адаптирован для организации воздушного движения БПЛА в любом заданном воздушном пространстве.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, процедура захода на посадку, программное обеспечение, автоматическое зависимое наблюдение в радиовещательном режиме.

ВВЕДЕНИЕ

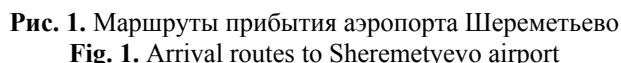
Вопросы обеспечения безопасности полетов (БП) воздушных судов (ВС) всегда являлись основной задачей Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Создание в рамках ИКАО концепции CNS/ATM прежде всего было связано с аэронавигационными требованиями по обеспечению БП. В последние годы возник новый тип воздушных средств – беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые стали активными участниками использования воздушного пространства (ИВП).

Эти новые тенденции ИВП нашли свое отражение в нормативных документах ИКАО [1, 2] и в соответствующих документах ГА РФ [3]. При этом возникли и новые проблемы, связанные с обеспечением полетов БПЛА, но, главное, с обеспечением их посадки в заранее предусмотренных местах.

В работах [5, 6] рассмотрен метод решения задачи оптимального распределения и расстановки произвольно расположенных в ВП объектов воздушного движения в очередь при заходе на посадку на примере московских аэропортов Шереметьево, Домодедово и Внуково. При этом поставленная задача решается при условии сохранения безопасных расстояний между летательными аппаратами (ЛА) путем вычисления динамических приоритетов в виде соответствующих количественных оценок, учитывающих первоначальную удаленность ЛА от линии заданного пути, ожидаемую (прогнозируемую) дальность до других ЛА, движущихся в очереди.

Можно утверждать, что задача автоматизации управления оперативным планированием прилета на аэродромы Московского узлового диспетчерского района (МУДР) в определенном

Однако проблема организации воздушного движения БПЛА, включая обеспечение их посадки, является достаточно острой, так как само понятие организации воздушного движения с целью посадки БПЛА в РФ возникло совсем недавно. Необходимо обратить внимание, что требования по БП БПЛА находятся на том же уровне, что и предъявляемые к обычным ЛА.



В связи со сказанным рассмотрим разработку алгоритма формирования динамической очереди БПЛА при заходе на посадку, основываясь на данных, полученных по технологии автоматического зависимого наблюдения в радиовещательном режиме (АЗН-В) [4] в аэропорту Шереметьево.

Алгоритм назначения динамических приоритетов ЛА базируется на методах теории управления [10, 11] и учитывает близость ЛА к точке входа в глиссаду, направление полета и близость к соседним ЛА. Далее нас интересует возможность автоматизации процесса принятия решения при формировании очереди захода на посадку БПЛА.

Пусть имеется множество ЛА A_i , где $i = \overline{1, T}$, расположенных в анализируемом ВП.

Каждый i -й ЛА характеризуется в дискретный момент времени t_k вектором состояния X_j , определяемым координатами:

- X_{j1} – геодезическая широта, градусы;
- X_{j2} – геодезическая долгота, градусы;
- X_{j3} – курс, градусы (ψ_j);
- X_{j4} – высота (эшелон), метры (футы) (Y_j);
- X_{j5} – скорость, узлы (V_j);
- X_{j6} – тип ЛА;
- X_{j7} – дискретный момент времени в формате Timestamp (UNIX), секунды (t_k);
- X_{j8} – номер рейса (идентификатор) ЛА.

Движение i -го ЛА в выбранной системе координат XOZ описывается типовой системой дифференциальных уравнений [8, 9]:

$$\begin{cases} \dot{V}_i = g \cdot n_{Xi}; \\ \dot{\Psi}_i = -\left(\frac{g}{V_i}\right) \cdot n_i; \\ \dot{x}_i = V_i \cdot \cos \Psi_i; \\ \dot{z}_i = -V_i \cdot \sin \Psi_i, \end{cases} \quad (1)$$

где V_i – скорость ЛА; $[x_i, y_i]^T$ – координаты центра масс ЛА, индекс T означает операцию транспонирования; g – ускорение свободного падения; Ψ_i – угол курса (пути) ЛА в плоскости XOZ.

Соответственно, вектор управления u_i можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = [n_{Xi}, n_i]; \\ n_{X_{\min}} \leq |n_{Xi}| \leq n_{X_{\max}}; \\ |n_i| \leq n_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где n_{Xi} – тангенциальная перегрузка; n_i – нормальная перегрузка.

Для решения задачи примем следующие допущения:

- 1) для каждой ВПП заданы исходные углы Ψ_{0j} , $j = \overline{1, m}$. Общее число полос равно m , но на практике обычно $m = 2$. По ним определяются курсы посадки Ψ_{ki} ;
- 2) для каждой из ВПП рассматривается задача выведения на трассу ЛА при условии их безопасного захода на посадку;
- 3) в качестве постоянных параметров на участках траектории принимается максимально допустимое нормальное ускорение $n_{\max}$ при разворотах и тангенциальное ускорение при снижении ЛА – $n_{X_{\max}}$;
- 4) окончательное решение относится к одной из альтернатив ($a = 1, 2$).

При $a = 1$ принимается решение о введении ЛА в воздушный эшелон. При $a = 2$ принимается решение об уходе ЛА на второй круг.

В рамках сформулированных исходных положений необходимо:

- 1) разработать алгоритм для сбора статистических данных в соответствии с заданным вектором переменных состояний ЛА;

2) определить возможные (прогнозируемые) траектории движения ЛА в наблюдаемом районе;

3) распределить ЛА между трассами, т. е. сформировать очередь для всех ЛА. На основе полученной таблицы сформировать списки ЛА, заходящих на посадку для каждой ВПП;

4) определить очередность захода на посадку и приземления ЛА для каждой трассы, а также возможные списки ЛА, уходящих на второй круг.

Для реализации рассматриваемого алгоритма была собрана статистика движения ЛА в зоне ответственности аэропорта Шереметьево.

Полученные статистические результаты приведены в табл. 1, где верхняя строка показывает расчетную очередь захода на посадку по приведенным соотношениям, а нижняя – реальную последовательность приземлившихся ЛА.

Таблица 1
Table 1

11	16	7	4	3	5	6	1	2	15	9	10	13	14	17	12	8	22	20	18	19	21
11	14	6	1	5	7	3	2	4	18	9	10	12	13	15	17	8	20	22	16	19	21

Как следует из табл. 1, реальные показатели значительно отличаются от расчетных, т. е. в условиях реальных имеющихся данных используемый алгоритм не дает адекватной оценки, соответственно, не может быть использован на практике.

Поэтому воспользуемся предложенным в [7] алгоритмом описания траектории движения ЛА с кусочно-постоянными участками при помощи логарифмической спирали.

С учетом системы уравнений (1) были получены следующие выражения для движения ЛА:

$$x_g(\Psi) = \frac{V_0^2 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot (\Psi - \Psi_0) \cdot n_X}{n_Z}\right)} \cdot \cos(\Psi - \varphi)}{g \cdot \sqrt{4n_X^2 + n_Z^2}} - \frac{V_0^2 \cdot (2 \cdot n_X \cdot \cos(\Psi_0) + n_Z \cdot \sin(\Psi_0))}{g \cdot (4n_X^2 + n_Z^2)}, \quad (3)$$

$$z_g(\Psi) = \frac{V_0^2 \cdot e^{\left(\frac{2 \cdot (\Psi - \Psi_0) \cdot n_X}{n_Z}\right)} \cdot \sin(\Psi - \varphi)}{g \cdot \sqrt{4n_X^2 + n_Z^2}} + \frac{V_0^2 \cdot (n_Z \cdot \cos(\Psi_0) - 2 \cdot n_X \cdot \sin(\Psi_0))}{g \cdot (4n_X^2 + n_Z^2)}. \quad (4)$$

Приведенные выражения (3) и (4) являются уравнениями логарифмической спирали, которая в общем виде записывается как

$$\begin{cases} x_g = a \cdot e^{b\theta} \cdot \cos \theta, \\ z_g = a \cdot e^{b\theta} \cdot \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Нетрудно установить соответствие между обозначениями выражений (5) и (3), (4).

Тогда алгоритм аппроксимации участка траектории движения ЛА логарифмической спиралью будет состоять из следующих шагов.

1. Получение текущего состояния ЛА:

$$x(t_k) = [V(t_k), \Psi(t_k), x_g(t_k), z_g(t_k)].$$

2. Загрузка состояния ЛА в предыдущий момент времени $x(t_{k-1})$:

$$x(t_{k-1}) = [V(t_{k-1}), \Psi(t_{k-1}), x_g(t_{k-1}), z_g(t_{k-1})].$$

3. Определение текущей тангенциальной перегрузки ЛА:

$$n_X(t_k) = \frac{V(t_k) - V(t_{k-1})}{g \cdot (t_k - t_{k-1})}.$$

4. Определение текущей нормальной перегрузки ЛА:

$$n_Z(t_k) = \frac{\Psi(t_k) \cdot n_X(t_k)}{\ln \left(\frac{g \cdot n_X(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) + V(t_{k-1})}{V(t_{k-1})} \right)}.$$

5. Аппроксимация движения ЛА участком логарифмической спирали по последовательным тактам времени в соответствии с приведенными выше требованиями.

Самое главное, что использование данного математического анализа позволит перейти от решения системы дифференциальных уравнений для описания движения ЛА к описанию соответствующих участков движения аналитическими зависимостями, что существенно сократит время построения траекторий.

Далее производится формирование очередности захода на посадку в следующей последовательности.

1. Получение исходного вектора состояния ЛА.

2. Отбор координат множества реперных точек, определяющих начальное положение ЛА в данном регионе.

3. Формирование траектории перевода ЛА в выбранную на основании п. 2 ближайшую реперную точку. Для этого определяется траектория программного разворота с заданными значениями нормальной и тангенциальной перегрузок до направления, касательного с текущей траектории разворота и траектории разворота, проходящей через реперную точку с выходом на прямолинейный участок.

4. Выполняется оценка времени программного разворота, времени движения по прямолинейному участку и времени движения по траектории, сумма которых дает время полета ЛА к точке входа в глиссаду.

5. Если интервал времени до предыдущего ЛА не превышает заданной величины, включить данный борт в очередь. В противном случае произвести расчеты для другой возможной траектории движения. Если не удастся найти траекторию, удовлетворяющую условию минимального интервала между ЛА, данный борт отправляется в зону ожидания.

На основе описанного выше алгоритма было проведено сравнение реального распределения очереди ЛА с расчетным в аэропорту Шереметьево и построена табл. 2, аналогичная по структуре табл. 1.

Таблица 2
Table 2

1	2	4	3	5	6	8	7	9	10	11	12	13	14	15	17	16	18	19	20	21
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Также было проведено сравнение измеренного времени прохождения маршрута расчетного для той же выбранной группы ЛА. Средняя разница между измеренной и расчетной продолжительностью полета составила 17 с, что является 1 % относительно среднего измеренного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа реальных полетных данных было выполнено сравнение реального времени движения ЛА по маршруту следования и расчетного при заданных начальных положениях ЛА с учетом типовых значений динамики изменения высоты и скорости при снижении ЛА, которое показало, что разница при рассмотренной выборке в 21 ЛА составила не более 1 %. При планировании движения группы ЛА можно считать сформированный алгоритм как достаточно точный для расчета оценки времени захода на посадку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ИКАО Doc 4444 ATM/501 Организация воздушного движения. Монреаль: ИКАО, 2007.
2. Приложение 11 к Конвенции о международной гражданской авиации. Обслуживание воздушного движения. 13-е изд. Монреаль: ИКАО, 2001.
3. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации» (с изменениями от 21 июля 2016 года): утв. Пр. Минтранса России от 25.11.2011 № 293; ФАП от 25.11.2011.
4. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский и др.; под ред. Г.А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003. 414 с.
5. Малыгин В.Б., Губенко С.В., Турков А.Н. Новый метод УВД в зонах ожидания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209.
6. Использование системы приоритетного обслуживания при внедрении автоматизированного управления прилетом-вылетом в воздушном пространстве Московского аэроузла / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, Тип Пхон Чжо // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 180.
7. Карпунин А.А., Воронов Е.М. Аппроксимация участка траектории движения в плоскости динамической управляемой системы при помощи логарифмической спирали // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 11. 7 с. [Электронный ресурс]. URL: http://technomag.edu.ru/file/505020.html?__s=1 (дата обращения 23.01.2017).
8. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Оборонгиз, 1962. 549 с.
9. Лебедев А.А., Карабанов В.А. Динамика систем управления беспилотными летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1965. 528 с.
10. Плотников В.Н. Принятие решений в системах управления. Теория и проектирование алгоритмов принятия оперативных решений. Ч. 1. М.: МГТУ, 1993. 172 с.
11. Плотников В.Н. Принятие решений в системах управления. Ч. 2. М.: МГТУ, 1994. 142 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чехов Игорь Анатольевич, кандидат военных наук, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, i.chehov@mstuca.aero.

Чехов Олег Игоревич, специалист группы системной интеграции ЗАО «Позитив Технологиз», cheolegv@rambler.ru.

FORMATION ALGORITHM OF DYNAMIC TURN FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES ON APPROACH

Igor A. Chekhov¹, Oleg I. Chekhov²

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

²*ZAO "Positive Technologies", Moscow, Russia*

ABSTRACTS

Great interest in using unmanned aerial vehicles has recently been shown, both from economic entities, and from national security, defense and law enforcement agencies. However, for using UAV for the civil purposes there is now a number of problems which are connected with the use of airspace and without solving them it is impossible to use the UAV fully. It should be noted that the level of flight safety, both for regular aircraft, and for the UAV, has the primary value. It is necessary to use modern methods of data processing and to have an opportunity to quickly and effectively control the current flight safety level. For this purpose the fullest information on the current movement of aircraft and unmanned aerial vehicles, and also on the structure of the used airspace has to be used. The problem of procedures and maneuvers development that resolve potential traffic conflict including the UAV, is extremely important for air traffic safety especially in the vicinity of the destination or landing aerodrome. The possibility of creation of an algorithm of dynamic turn formation and the choice of a trajectory on approach of unmanned aerial vehicles is considered in this article. The technology of automatic dependent surveillance broadcast was used when collecting statistical data. Implementation of the landing algorithm is executed based on the criteria of ensuring efficiency and flight safety. The developed software provides the use only of open data on the aircraft movement in terminal airspace. The suggested algorithm can be adapted for air traffic management of the UAV in any selected airspace.

Key words: the unmanned aerial vehicle, approach procedure, the software, automatic dependent surveillance broadcast.

REFERENCES

1. ICAO Doc 4444 ATM/501 Air Traffic Management. Montreal. ICAO, 2007.
2. Annex 11. Air Traffic Services. 13th edition. Montreal. ICAO, 2001.
3. *Federalniye aviatsionnye pravila «Organizatsiya vozdušnogo dvizheniya v Rossijskoy Federatsii»* [Federal Aviation Regulations of Flight Rules "Air Traffic Management in Russian Federation"] (with the changes from 21.07.2016): Approved by the Russian Minister of Transport from 25.11.2011 № 293. (in Russian)
4. **Bochkarev V.V., Kravcov V.F., Kryzhanovskij G.A.** *Kontseptsiya i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoj aviatsii / pod red. G.A. Kryzhanovskogo* [The concept and the CNS/ATM systems in civil aviation]. Moscow, Akademkniga, 2003, 414 p. (in Russian)
5. **Malygin V.B., Gubenko S.V., Turkov A.N.** *Noviy metod UVD v zonah ozhidaniya* [A new method of controlling air traffic in waiting areas]. The Scientific Bulletin of the MSTUCA, 2014, no. 209. (in Russian)
6. **Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E., Tip Phon Chzho.** *Ispolzovanie sistemy prioritnogo obsluzhivaniya pri vnedrenii avtomatizirovannogo upravleniya priletom-vyletom v vozdušnom prostranstve Moskovskogo ajerouzla* [Use of system of priority service at introduction of auto-

mated management of an arrival departure in airspace of the Moscow TMA]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2012, no. 180. (in Russian)

7. **Karpunin A.A., Voronov E.M.** *Approksimacija uchastka traektorii dvizhenija v ploskosti dinamicheskoy upravlyaemoj sistemy pri pomoshhi logarifmicheskoy spirali* [Approximation of the phase of trajectory of the movement in the plane of the dynamic operated system by means of a logarithmic spiral]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie* [Science and education. Electronic scientific journal], 2011, no. 11, p. 7. Available at: http://technomag.edu.ru/file/505020.html?__s=1 (accessed 23.01.2017). (in Russian)

8. **Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S.** *Dinamika poleta bespilotnyh letatel'nyh apparatov* [Flight dynamics of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Oborongiz, 1962, 549 p. (in Russian)

9. **Lebedev A.A., Karabanov V.A.** *Dinamika sistem upravlenija bespilotnymi letatel'nymi apparatami* [Dynamics of control systems of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1965, 528 p. (in Russian)

10. **Plotnikov V.N.** *Prinyatie resheniy v sistemah upravleniya. Teoriya i proektirovanie algoritmov prinjatiya operativnyih resheniy*. [Decision-making in control systems. Theory and design of algorithms of adoption of operational decisions]. Part 1. Moscow, MGTU, 1993, 172 p. (in Russian)

11. **Plotnikov V.N.** *Prinjatие resheniy v sistemah upravleniya*. [Decision-making in control systems]. Part 2. Moscow, MGTU, 1994, 142 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor A. Chekhov, Candidate of Military Sciences, Associate Professor of Air Traffic Control Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, i.chehov@mstuca.aero.

Oleg I. Chekhov, Specialist of the System Integration Group ZAO "Positive Technologies", cheolegv@rambler.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

21.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

21.01.2017
25.05.2017

ТРАНСПОРТ

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-33-40

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.М. САМОЙЛЕНКО¹, Ю.В. ПЕТРОВ¹, О.А. РАТЕНКО¹

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

Прогресс в авиационном двигателестроении определяется возрастанием рабочих параметров газотурбинных двигателей, который неизбежно сопровождается повышением значений рабочих температур и нагруженности высокоответственных элементов горячего тракта турбины. Кроме того, повышаются требования к надежности двигателя в целом. Выполнение этих требований прежде всего обуславливается работоспособностью материалов лопаток турбин и обеспечивается применением высокожаропрочных никелевых сплавов в сочетании с комбинированными теплозащитными покрытиями.

В статье решается задача оценки влияния нестационарного теплового воздействия на распределение температуры в многослойном теплозащитном покрытии. С целью оценки работоспособности теплозащитного покрытия предложен метод вычисления температурного поля по профилю лопатки и глубине покрытия, базирующийся на решении основного одномерного дифференциального уравнения теплопроводности.

Данный метод позволяет оценить работоспособность теплозащитного покрытия, а также дает возможность подобрать комбинацию слоев теплозащитного покрытия для конкретных условий эксплуатации лопаток газотурбинного двигателя.

Кроме того, с помощью предложенного метода можно оценить воздействие нестационарного теплового потока на структуру жаропрочного сплава лопатки турбины двигателя, а следовательно, оценить ресурс с данным теплозащитным покрытием. При температурах 1150–1200 °С и выше в жаропрочных никелевых сплавах происходит процесс коагуляции основных упрочняющих когерентных частиц γ' -фазы на основе интерметаллида Ni_3Al , вместо кубоидов формируются длинные пластины волнистой формы, происходит образование топологически плотноупакованных фаз, представляющих собой игольчатые образования. Эти процессы приводят к значительному ухудшению прочностных характеристик жаропрочных сплавов. Проводя расчеты по предложенной методике, можно прогнозировать работоспособность лопаток турбин, имея информацию об интенсивности фазовых превращений в сплаве и о температурных забросах в процессе работы газотурбинного двигателя (по данным бортовых систем контроля и фиксации параметров).

Ключевые слова: лопатка турбины, комбинированные теплозащитные покрытия, теплопроводность, долговечность, работоспособность.

ВВЕДЕНИЕ

В современных экономических условиях авиационные двигателестроительные корпорации находятся в постоянной «борьбе» за право установки своей продукции на вновь создаваемые типы воздушных судов, а для этого необходимо сконструировать более совершенный газотурбинный двигатель (ГТД), чем у конкурентов, по определяющим параметрам: удельная тяга, удельная масса, степень сжатия воздуха в компрессоре, экономичность, надежность, ресурс, шумовые показатели.

Повышение тяги двигателя в современном двигателестроении является одной из важных задач. Как известно из формулы Б.С. Стечкина (1), повысить тягу двигателя можно двумя способами:

1) увеличить расход воздуха, что повлечет за собой увеличение габаритных размеров двигателя, а это крайне нежелательно в связи со сложностями крепления таких двигателей к летательному аппарату, и его массы;

2) повысить скорость истечения газа в выходном сечении сопла, что может быть достигнуто путем увеличения температуры газов перед турбиной.

$$P = G_{\Gamma} \cdot c_c - G_B \cdot V, \quad (1)$$

где P – тяга двигателя; G_B и G_{Γ} – расходы воздуха на входе в двигатель и газа на выходе из сопла; V и c_c – скорость полета и скорость истечения газа на выходе из сопла.

Именно второй способ является наиболее перспективным, но в то же время довольно сложным, поскольку требует решения многих задач, в числе которых: поиск новых жаропрочных материалов/покрытий; изобретение новых методов получения жаропрочных материалов/покрытий; создание методик, направленных на повышение или как минимум сохранение показателей долговечности и работоспособности элементов турбины газотурбинных двигателей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из наиболее перспективных направлений решения задачи повышения работоспособности теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей, в условиях непрерывно растущих значений температур газа перед турбиной, является применение различных защитных покрытий. Наиболее широкое применение на двигателях гражданской авиации получило теплозащитное покрытие (ТЗП), выполняющее функции теплового барьера между высокотемпературным потоком газа и материалом лопатки, а также защиты от газовой коррозии.

ТЗП представляют собой многослойные покрытия, состоящие из одного, двух или более слоев и металлического жаростойкого подслоя (ЖСП). Работоспособность ТЗП при их работе на лопатках турбин ГТД находится в зависимости от многих факторов. Из анализа данных о причинах разрушения покрытий [1–4] выявлено, что основными процессами, приводящими к разрушению, являются следующие.

Термоциклирование (нестационарный температурный режим, обусловленные им термические деформации слоёв, малоцикловая усталость).

Окисление границы керамика – жаростойкий подслоя.

Конкретные условия воздействия на поверхностные слои в каждом двигателе в качестве определяющего параметра работоспособности выдвигают либо первый, либо второй из процессов. Решение задачи расчета оценки предельной длительности сопротивления защитной системы на определенной лопатке при заданных термических и механических воздействиях в процессе работы двигателя включает прежде всего потребность в знании температурного поля по профилю лопатки и глубине ТЗП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для численного прогнозирования долговечности теплонапряженных деталей, и в первую очередь лопаток турбин газотурбинных двигателей, предлагается алгоритм расчета и определения температурного поля в многослойном металлокерамическом покрытии, базирующийся на использовании дифференциального уравнения теплопроводности [5]. Это уравнение устанавливает связь между пространственным и временным изменением температуры тела, иными словами, с помощью него осуществляется математическое описание переноса тепла внутри тела.

Для решения поставленной задачи приняты следующие допущения.

1. Система покрытий представляет собой набор бесконечных плоских слоев пластин.
2. Физические характеристики каждого слоя постоянны по толщине соответствующего слоя и неизменны при любых значениях температур (к физическим характеристикам слоя будем относить: удельную теплоемкость (c_p), плотность (ρ), коэффициент теплопроводности (λ)).

В принятых допущениях однородности слоев уравнение теплопроводности [6] для i -го слоя примет вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $U = U(x, t)$ – температура; t – время; x – координата по направлению от поверхности; $a^2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коэффициент температуропроводности.

Для решения уравнения (2) необходимо знать начальные условия (распространение температуры в теле в начальный момент времени) и граничные условия (геометрическая форма тела, закон взаимодействия между телом и окружающей средой).

В рассматриваемом случае они имеют следующий вид:

Начальные условия:

$$T(x, 0) = T_0(x). \quad (3)$$

Граничные условия 1-го рода:

$$\begin{cases} T(0, t) = T_1(t); \\ T(1, t) = T_2(t). \end{cases} \quad (4)$$

Граничные условия 4-го рода (условие непрерывности температуры и потока энергии на границах слоев):

$$\begin{cases} T(l_{m-0}, t) = T(l_{m+0}, t); \\ \lambda_m \frac{\partial T}{\partial x}(l_{m-0}, t) = \lambda_{m+1} \frac{\partial T}{\partial x}(l_{m+0}, t). \end{cases} \quad (5)$$

где m – координата границы сред; l_{m-0} – координата первого слоя слева от границы слоёв; l_{m+0} – координата второго слоя справа от границы слоёв; λ_m – коэффициент теплопроводности m -го слоя; λ_{m+1} – коэффициент теплопроводности $m+1$ слоя.

Совокупность уравнения (2), а также начальных (3) и граничных условий (4), (5) называется смешанной задачей (рис. 1) для уравнения теплопроводности.

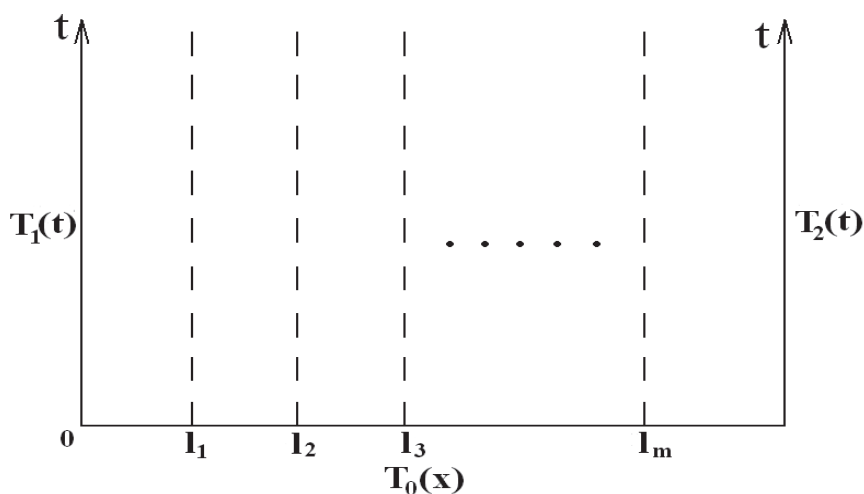


Рис. 1. Смешанная задача для уравнения теплопроводности
Fig. 1. A mixed problem for the heat conductivity equation

Для численного решения смешанной задачи была выбрана известная неявная схема Кранка – Николсона [7]. Сетка для неявной разностной схемы изображена на рис. 2.

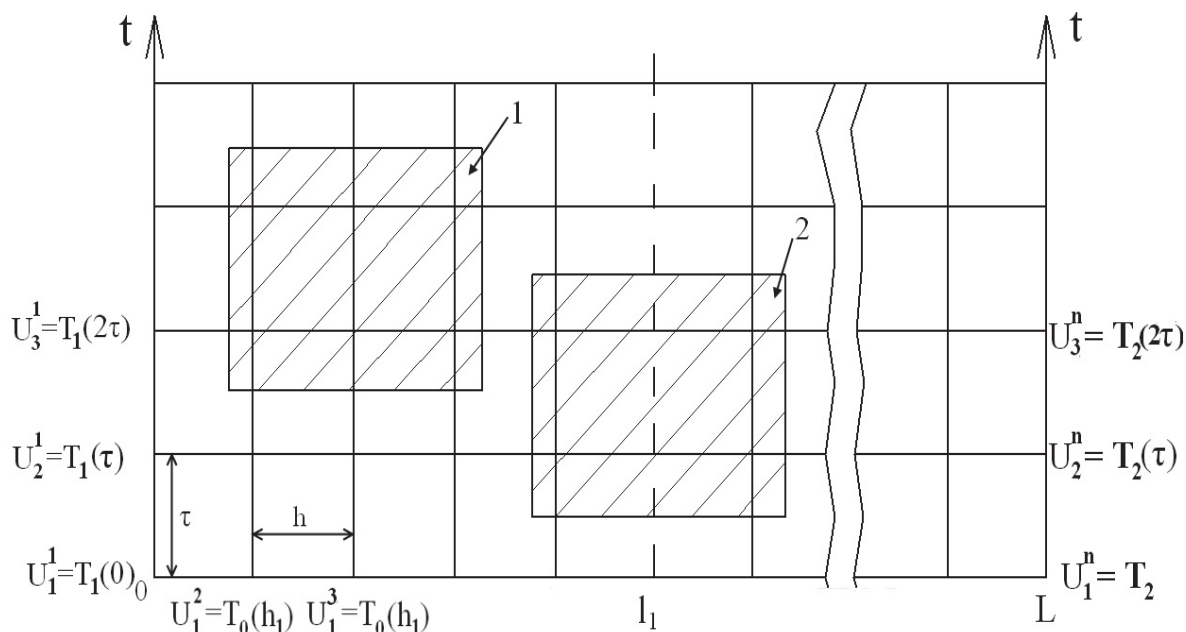


Рис. 2. Сетка для неявной разностной схемы:
1 – шаблон находится внутри слоя покрытия;
2 – граница раздела покрытий пересекает шаблон;
 τ – шаг по времени; h – шаг по координате; L – глубина слоя.

Fig. 2. Grid for the implicit difference scheme

Воспользуемся следующими конечно-разностными аппроксимациями для частных производных [8] из уравнения теплопроводности (2):

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_i^{j+1} - U_i^j}{\tau}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{a\sigma}{h^2} (U_{i+1}^{j+1} - 2U_i^{j+1} + U_{i-1}^{j+1}) + \frac{a(1-\sigma)}{h^2} (U_{i+1}^j - 2U_i^j + U_{i-1}^j), \quad (7)$$

где U_i^j – значения температуры на этой сетке (j – индекс по времени, i – по координате); σ – любое вещественное число, которое для неявной схемы Кранка – Николсона равно 0,5.

После замены частных производных в задаче (2) конечно-разностными аппроксимациями получаем разностную задачу. Причем, если шаблон находится внутри слоя (1, рис. 2), то в соответствии с принятой схемой разностное уравнение примет вид

$$aU_{i+1}^{j+1} + \left(-2a - \frac{2h^2}{\tau}\right)U_i^{j+1} + aU_{i-1}^{j+1} = -aU_{i+1}^j - \left(\frac{2h^2}{\tau} - 2a\right)U_i^j - aU_{i+1}^j. \quad (8)$$

Если же граница слоев пересекает шаблон (2, рис. 2), то, согласно (5), имеем

$$\frac{k_m(U_{i+1}^j - U_{i+1}^{j-1})}{h_m} = \frac{k_{m+1}(U_{i+1}^{j+1} - U_{i+1}^j)}{h_{m+1}}. \quad (9)$$

Из условия (4) следует, что:

$$\begin{cases} U_{i+1}^1 = T_1(i \cdot \tau); \\ U_{i+1}^n = T_2(i \cdot \tau). \end{cases} \quad (9)$$

При фиксированной координате j и меняющейся от 2 до $n - 1$ координате i уравнения (8), (9) представляют собой систему $(N - 2)$ уравнений с $(n - 2)$ неизвестными $U_{i+1}^2, U_{i+1}^3 \dots U_{i+1}^{n-1}$, которые являются решением задачи во внутренних узлах сетки на временном слое $t = j \cdot \tau$. Изложенный выше алгоритм реализован в виде программного продукта для решения уравнения теплопроводности (2) в многослойных покрытиях.

С целью апробации предложенной методики проводился расчет температурного поля двухслойного покрытия с подложкой (характеристики ЖСП приняты равными аналогичным характеристикам подложки). Геометрические и физические характеристики слоев представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Геометрические и физические характеристики слоев
Geometrical and physical characteristics of the layers

Номер слоя	1	2	3 (подложка)
Толщина, мкм	250	120	3000
Теплопроводность, Вт/м · град.	1,5	0,6	5
Удельная теплоемкость, Дж/кг · град.	1000	800	500
Плотность, кг/м ³	5500	7000	8000
Температуропроводность, м ² /с	$2,73 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$

Расчет проводился при градиенте температур (GRAD) равном 2 град./с, начальное значение температуры – 1200 °С, шаг по времени – 1 с, шаг по глубине покрытия – 25 мкм, $T_1(t) = T_2(t) = T_0(x) + j \cdot GRAD$. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Из расчетов видно, что, например, через 5 с на глубине 250 микрон значение температуры будет равно 1208,5°С. Следовательно, такая температура начнет воздействовать на структуру сплава, а значит, приводить к его разупрочнению. Таким образом, зная толщину ТЗП и температуру нестационарного воздействия, можно оценить работоспособность сплава с имеющимся ТЗП.

Таблица 2
Table 2

Распределение температуры по глубине покрытий и подложки
The temperature distribution along the depth of the coating and the substrate

		Глубина, мкм										
		0	50	150	250	350	450	850	1200	2300	2850	3300
Время, с	1	1200	1201,77	1201,4	1201,13	1200,62	1200,47	1200,34	1200,29	1200,55	1201,04	1201,82
	2	1200	1203,77	1203,3	1202,9	1201,97	1201,68	1201,40	1201,30	1201,93	1202,83	1203,82
	3	1200	1205,67	1205,1	1204,62	1203,58	1203,6	1202,95	1202,85	1203,60	1204,58	1205,76
	4	1200	1207,7	1207,12	1206,6	1205,42	1205,06	1204,71	1204,59	1205,42	1206,54	1207,78
	5	1200	1209,65	1209,03	1208,5	1207,32	1206,95	1206,59	1206,48	1207,34	1208,46	1209,74
	6	1200	1211,68	1211,06	1210,51	1209,27	1208,9	1208,53	1208,41	1209,29	1210,46	1211,76
	7	1200	1213,65	1213,02	1212,48	1211,25	1210,87	1210,50	1210,38	1211,28	1212,43	1213,74
	8	1200	1215,67	1215,05	1214,49	1213,23	1212,85	1212,48	1212,36	1213,26	1214,43	1215,76
	9	1200	1217,65	1217,02	1216,47	1215,23	1214,85	1214,47	1214,35	1215,26	1216,43	1217,74
	10	1200	1219,67	1219,04	1218,48	1217,22	1216,84	1216,47	1216,35	1217,25	1218,43	1219,76

ВЫВОДЫ

В работе предложена методика применения численного решения дифференциального уравнения теплопроводности для определения температурного поля по профилю лопатки по глубине ТЗП. С ее помощью возможно решение задачи расчета предельной длительности сопротивления защитной системы на определенной лопатке при конкретных термических и механических воздействиях при работе на двигателе.

Как известно, в литейных жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) упрочнение достигается когерентными частицами γ' -фазы на основе интерметаллида Ni_3Al , образующимися при распаде пересыщенной γ -фазы в процессе охлаждения с температуры ниже γ' -солидуса. Однако при температурах 1150–1200 °С в ЖНС происходит значительная эволюция морфологии, упрочняющей γ' -фазы кубической формы [8]. Частицы γ' -фазы коагулируют, и вместо кубоидов образуются длинные пластины волокнистой формы, при этом образуются новые μ -фазы или ε -фазы, которые представляют собой частицы игольчатой формы. С увеличением температуры скорость таких процессов увеличивается. Данные виды превращений существенно влияют на прочностные характеристики ЖНС, а следовательно, и на работоспособность лопатки турбины ГТД в целом.

Зная число температурных забросов в процессе работы ГТД (по данным бортовых систем контроля и фиксации параметров) и проводя расчеты по предложенной методике, можно прогнозировать работоспособность лопаток турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александрова Н.Д.** Коррозия лопаток турбин ГТУ и обзор методов защиты // Электронный журнал «Молодежный научно-технический вестник». 2015. № 2.
2. Исследование сопротивления слоя $ZrO_2 - 8\% Y_2O_3$ конденсационных покрытий против воздействия оксидов кальция, магния, алюминия и кремния / К.Ю. Яковчук, Ю.Э. Рудой, Л.М. Нероденко, Е.В. Оноприенко, А.В. Микитчик // Современная электрометаллургия. 2013. № 3. С. 24–32.
3. **Качанов Е.Б., Тамарин Ю.А.** Расчет долговечности теплозащитных покрытий на лопатках турбин // Технология легких сплавов. 2013. № 1. С. 11–17.
4. Исследование механизма разрушения теплозащитного покрытия / В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, В.В. Древняк, М.А. Петрова // Электрометаллургия. 2015. № 12. С. 27–31.
5. **Фарлоу С.** Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / пер. с англ. М.: Мир, 1985. 384 с.
6. **Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.** Начала теории вычислительных методов. Уравнения в частных производных. Минск: Наука и техника, 1986. 311 с.
7. **Марчук Г.И.** Методы вычислительной математики. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 456 с.
8. **Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф.** Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.
9. **Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.** Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самойленко Василий Михайлович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Петров Юрий Владимирович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, yu.petrov@mstuca.aero.

Ратенко Олег Александрович, аспирант МГТУ ГА, ratenko.oleg@yandex.ru.

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN MULTILAYER METAL-CERAMIC COATINGS UNDER NONSTATIONARY THERMAL EFFECTS

Vasiliy M. Samoilenko¹, Yuriy V. Petrov¹, Oleg A. Ratenko¹

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

ABSTRACT

Progress in the aircraft engine construction is determined by the increase of operation parameters of gas turbine engines, which is inevitably accompanied by an increase of operating temperatures and load for the vital elements of the turbine hot ducts. Furthermore, the requirements for reliability of the engine in general are also increasing. Achievement of these requirements is determined by the performance of the materials turbine blades are made of and is made possible by the application of high-heat Nickel alloys in combination with combined heat-shielding coatings.

This article dwells on the problem of assessing the impact of non-stationary thermal effects on the temperature distribution in a multilayer heatproof coating. With the aim of assessing the working capacity of heatproof coatings we propose a method of calculating the temperature field for the blade profile and the coating depth, based on the solution of the basic one-dimensional differential equation of heat conduction.

This method allows us to assess the performance of heatproof coating and also gives us an opportunity to choose a combination of heatproof coating layers for the specific operating conditions of a gas turbine engine's blades.

In addition, using the proposed method it is possible to evaluate the effect of non-stationary heat flux on the structure of high-temperature alloy of the engine's turbine blades and, therefore, to evaluate the capacity with the given coating. At temperatures of 1150–1200 °C and higher in heat-resistant Nickel alloys there starts a coagulation process of the main reinforcing coherent particle phase on the basis of the intermetallic compound, long plates with wavy shapes are formed instead of the cuboids, a formation of topologically close-packed phases which are needle-like compositions happens. These processes lead to a significant deterioration of the strength characteristics of heat-resistant alloys. Making calculations according to the proposed method it is possible to predict the performance of turbine blades, having the information about the intensity of phase transformations in the alloy and the temperature transitions in the process of gas turbine engine functioning (using the data of the on-board parameters monitoring and recording systems).

Key words: turbine blade, combined heat-resistant coating, thermal conductivity, durability, serviceability.

REFERENCES

1. **Alexandrova N.D.** *Korroziya lopatok turbin GTU i obzor metodov zashhity* [Turbine blades corrosion of gas turbines and a review of the protection methods]. *Elektronnyiy zhurnal «Molodezhnyiy nauchno-tehnicheskiy vestnik»* ["Youth scientific and technical bulletin" e-journal], Moscow, 2015, no. 2. (in Russian)

2. **Yakovchuk K.Y., Rudoy Y.E., Nerodenko L.M., Onoprienko E.V., Mikitik A.V.** *Issledovanie soprotivleniya sloya – 8% kondensatsionnykh pokrytiy protiv vozdeystviya oksidov kaltsiya, magniya, alyuminiya i kremniya* [A study of the layer resistance for – 8% condensation coatings against exposure to oxides of calcium, magnesium, aluminum and silicium]. *Sovremennaya elektrometallurgiya* [Modern electrometallurgy], 2013, no. 3, pp. 24–32. (in Russian)

3. **Kachanov E.B., Tamarin Y.E.** *Raschet dolgovechnosti teplozashhitnykh pokrytiy na lopatkakh turbin* [Calculation of turbine blades heatproof coatings durability]. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys], 2013, no. 1, pp. 11–17. (in Russian)

4. **Samoilenko V.M., Ravilov R.G., Drevniak V.V., Petrova M.A.** *Issledovanie mehanizma razrusheniya teplozashhitnogo pokrytiya* [A study of the mechanism of heatproof coating destruction]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2015, no. 12, pp. 27–31. (in Russian)

5. **Farlow S.J.** *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi dlya nauchnykh rabotnikov inzhenerov* [Partial Differential Equations for Scientists and Engineers: translated from English]. Moscow, Mir, 1985, 384 p.

6. **Kryilov V.I., Bobkov V.V., Monastyirnyi P.I.** *Nachala teorii vychislitelnykh metodov. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh* [Foundations of the computational methods theory. Equations in partial derivatives]. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], Minsk, 1986, 311 p. (in Russian)

7. **Marchuk G.I.** *Metody vychislitelnoy matematiki* [Methods of computational mathematics]. Moscow, Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury [Science. The main edition of physical and mathematical literature], 1980, 456 p. (in Russian)

8. **Berkovsky B.M., Nogotov E.F.** *Raznostnyie metodyi issledovaniya zadach teploobmena* [Differencing methods of studying the problems of heat transfer]. Minsk, *Nauka i tekhnika* [Science and technology] 1976, 144 p. (in Russian)

9. **Kablov E.N., Golubovsky E.R.** *Zharoprochnost nikelovykh splavov* [Heat resistance of Nickel alloys]. *Mashinostroenie* [Mechanical Engineering], Moscow, 1998, pp. 464. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasiliy M. Samoilenko, Professor, Doctor of Science, Head of Aviation Fuel Supply and Aircraft Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Yuriy V. Petrov, Professor, Doctor of Science, Head of Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.petrov@mstuca.aero.

Oleg A. Ratenko, PhD student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ratenko.oleg@yandex.ru.

Поступила в редакцию 10.03.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 10.03.2017
Accepted for publication 25.05.2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ СУДНОМ

Б.Д. ОГУНВОУЛ¹, Е.А. БАЛАНЧУК², К.С. КАНДЫБА³

¹Национальное агентство космических исследований и разработок, г. Абуджа, Нигерия

²Департамент производственного планирования ЗАО «ЮТи-Джи», г. Москва, Россия

³АО «Международный аэропорт Шереметьево», г. Химки, Россия

Исследуется вопрос управляемости воздушного судна при допущении отказов органов управления (ОУ) путем моделирования характеристики управления с учетом особенности его системы автоматического управления. Приводятся виды отказов органов управления самолетом, такие как клиннение, колебание, увод в крайнее положение и снижение производительности.

Обосновано, что при допущении отказа вследствие потери привода (actuator) или разрушения конструкции ОУ эксплуатационно-летные характеристики самолета значительно ухудшаются. Гражданские воздушные суда (ВС) нередко могут находиться в зонах конфликтов и террористической активности, где не исключена вероятность обстрела, например, в Сирии, Ираке, Южном Судане и т. д. Следовательно, необходима модель отказов, способная идентифицировать отказы вследствие разрушения конструкций и отказов компонентов, органов управления.

Результаты данного исследования показывают, что адекватная модель отказов является первым шагом в сторону решения задач потери управляемости ВС при допущении отказов и частью дальнейшей адаптационной модели управления. Таким образом, можно обеспечить высокую эксплуатационную живучесть и надежность ВС, а также экономически рационально повысить уровень безопасности его полетов (БП).

Результаты исследования, полученные в данной статье на основе моделирования нелинейного движения ВС при стабилизации углов по тангажу и крену, позволят в дальнейшем разработать алгоритм своевременного выявления отказа конкретной ОУ, который будет использован при проектировании автоматизированной системы управления самолетом и на стадии разработки перспективных бортовых систем управления (БСУ). Внедрение полученных результатов позволит эффективно повысить отказоустойчивость ОУ, надежность элементов конструкции ЛА и поддерживать приемлемый уровень БП при допущении частичной или полной потери управляемости ВС из-за разрушения конструктивных компонентов органов управления и отказов ОУ ВС.

Ключевые слова: система управления, модель отказов, управляемость, орган управления, рулевая поверхность, отказоустойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возросла потребность в производстве современных высокоэффективных ВС гражданского назначения. Это влечет за собой развитие технологий авиастроения: применение композиционных материалов в конструкции ВС и силовых установках; совершенствование алгоритмов при проектировании систем управления; повышение аэродинамических характеристик ЛА и другие. Необходимо отметить, что современные самолеты оборудуются высокотехнологичными средствами, такими как электронная дистанционная система управления (ЭДСУ), электрогидравлические рулевые приводы (ЭГОУ) и электрические рулевые приводы (ЭОУ), обладающими высокой надежностью и многократным резервированием.

Возможность обнаружения с дальнейшей локализацией отказов органов управления имеет большое значение в обеспечении БП, а также необходима для реализации сертификационных требований, предъявляемых к СУ самолетов гражданской авиации (ГА).

За последнее десятилетие потеря управляемости, связанная с отказами органов управления ВС, является ведущей причиной АП со смертельным исходом. «Как минимум один человек погибает в половине всех случаев АП вследствие потери управляемости. В случаях потери управляемости авиационное событие редко заканчивается инцидентом из-за высокой степени повреждения самолета» [4]. Некоторые из таких АП представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Авиационные происшествия вследствие потери управляемости самолета
Accidents due to aircraft loss of control (LOC)

Дата АП	Тип ВС	Описание/причины АП
16.02.2000	DC-8	Потеря управляемости по тангажу в результате отказа правого руля высоты
31.01.2000	MD-83	Потеря управляемости по тангажу самолета в результате отказа в полете горизонтального стабилизатора
09.08.1994	B737-300	Отклонение руля направления в противоположное направление в результате заклинивания
03.03.1991	B737-291	Потеря управляемости самолета в результате отклонения руля направления за пределы допустимого значения

Потеря управляемости самолета является одной из значимых проблем авиации, требующей новых технологических решений. Анализ статистических данных АП ВС показывает, что четверть таких событий возникает вследствие отказов и неисправностей органов управления самолетом, что является чрезвычайно катастрофическим по результативности, поскольку они чаще возникают на этапах полета, где вероятность избежать крушения ВС очень мала, что приводит к многочисленным жертвам и пострадавшим. Стремление решать проблемы потери управляемости и устойчивости ВС привело к развитию конструктивных решений отказоустойчивых систем и систем резервирования агрегатов ВС, а также применению высокоинтеллектуальных систем управления.

Электродистанционная система управления является одним из функциональных способов решения, предложенных для устранения проблем потери управляемости ВС. Однако возможности данной системы ограничены. Наряду со снижением вероятности обнаружения отказа также снижаются показатели процесса технической эксплуатации ЛА (ПТЭ) из-за увеличения количества ложных сигналов, которые в свою очередь увеличивают эксплуатационные затраты, способствующие увеличению времени нахождения ЛА в неисправном состоянии и снижающие показатель готовности ВС к полету, что является нежелательным с точки зрения эффективности ПТЭ. Целью настоящей статьи является анализ опасности отказов органов управления воздушного судна.

ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ

Нерасчетное функционирование (отказы) органов управления ВС может быть вызвано различными причинами. Основные из которых следующие.

Отказ органов управления: представляет собой полную или частичную потерю управления. Отказы ОУ могут возникать в результате обгорания или обрыва кабельных линий, короткого замыкания, повреждения, попадания посторонних предметов в привод ОУ и т. д. Отказ ОУ, приводящий только к частичной потере работоспособности, может возникать в результате гидравлической утечки, снижения напряжения питания или в результате нерасчетного повышения внешней нагрузки и т. д.

Отказ датчика обратной связи представляет собой неправильные показания датчиков, их также можно разделить на частичные и полные отказы датчиков. Полный отказ датчика показывает информацию, не отражающую реальное значение измеряемого параметра.

Повреждение рулевой поверхности приводит к изменениям физических параметров системы. Например, массовых или аэродинамических коэффициентов; или констант демпфирования и подобных, которые зачастую являются следствием структурных повреждений или разрушения конструкций. Такие отказы разнообразны и охватывают обширный класс нерасчетных случаев. На рис. 1. представлены виды отказов ОУ самолетом.

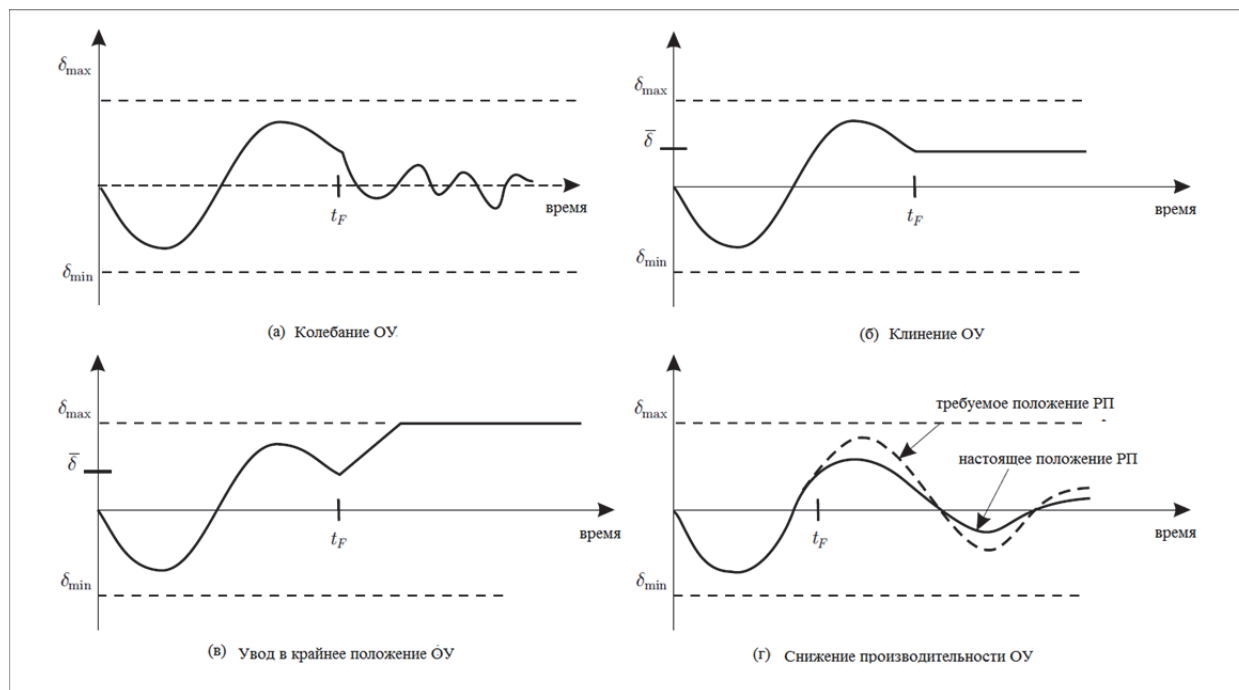


Рис. 1. Виды отказов органов управления самолетом
Fig. 1. Aircraft control surface fault types

Известны разные методы, применяемые для описания модели отказов органов управления. В целом моделирование отказов ОУ математически описывается методами, представленными на рис. 2 [10].



Рис. 2. Виды математического моделирования отказов органов управления самолетом
Fig. 2. Aircraft control surface faults mathematical modeling types

В общем случае отказ ОУ можно математически описать следующим уравнением:

$$u_i = \begin{cases} u_i(t) & \\ c_i & \\ \rho \cdot u_i(t), & 10 < \rho < 10, \end{cases} \quad (1)$$

где $c_i \in [u_{i,min}, u_{i,max}]$ – клиниение i -й рулевой поверхности в промежуточном состоянии, $u_i(t)$ – исправное состояние i -й ОУ и $\rho, 10 < \rho < 10$ – коэффициент ошибки в отклонениях ОУ.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ САМОЛЕТА

Основой имитационной модели является нелинейная модель динамики самолета, состоящая из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и уравнений состояния. Основой уравнений движения самолета являются основные Ньютоновские уравнения механики.

$$F = m \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \Omega \cdot V \right); \quad (2)$$

$$M = \frac{\partial (I \cdot \Omega)}{\partial t} + \Omega + (I \cdot \Omega), \quad (3)$$

где $V = [u \ v \ w]^T$ – вектор скорости в центре тяжести, $\Omega = [p \ q \ r]^T$ – вектор угловой скорости относительно центра тяжести, $F = [F_x \ F_y \ F_z]^T$ – вектор всех внешних сил и $M = [L \ M \ N]^T$ – вектор всех моментов. I – тензор инерции твердого тела, выражается следующим образом:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & I_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Уравнения (2) и (3) составляют основу модели движения ЛА. Компоненты линейных и вращательных осей ЛА можно рассматривать как переменные состояния из этой модели, а компоненты осей ЛА внешних сил и моментов являются входными переменными этих уравнений.

Однако эти уравнения можно переписать в виде нелинейных пространственных состояний системы:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, +F_{tot}(t), M_{tot}(t)); \\ F_{tot} &= g_1(x(t), u(t), v(t), t); \\ M_{tot} &= g_2(x(t), u(t), v(t), t). \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) соответствует нелинейному уравнению состояния

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), v(t), t), \quad (6)$$

где x – вектор состояния, u – входной вектор, v – вектор возмущения и время t .

$$\dot{x} = f(x(t), \dot{x}(t), u(t), v(t), t) \quad (7)$$

В свою очередь, уравнение (7) можно переписать следующим образом:

$$\dot{x} = f_1(x(t), u(t), v(t), t) + f_2(\dot{x}(t), t), \quad (8)$$

что упрощает задачу для его численного решения, особенно при том, что f_2 представляет собой линейную функцию. Вектор состояния x содержит линейные и угловые составляющие скоро-

сти, т. е. компоненты от v и Ω . Помимо этих переменных, информация о пространственной ориентации самолета нужна для нахождения распределения гравитационной силы.

Таким образом, полный вектор состояния $x = [V \alpha \beta p q r \psi \theta \varphi x_e y_e H]^T$ состоит из двенадцати параметров: три линейные скорости, три угловые скорости, три угла Эйлера, определяющие ориентацию самолета относительно земли, две координаты и высоту, которые определяют положение самолета относительно земли.

Отказы вследствие клиннения и колебания ОУ в САУ можно рассмотреть в виде отклонения некоего требуемого параметра управления δ_j , заменяемого неисправным параметром управления $\bar{\delta}_j$, который в свою очередь становится параметром управления, как показано в уравнении (10). В сжатой форме истинное значение этого параметра для исправной САУ выражается как показано в уравнении (9):

$$u_i(t) = \delta_i(t) + \sigma_{Ai} (\bar{\delta}_i(t) - \delta_i(t)). \quad (9)$$

В случае отказа ОУ, вектор (неизвестных) параметров примет следующий вид:

$$\bar{\delta}(t) = [\bar{\delta}_1(t) \bar{\delta}_2(t) \dots \bar{\delta}_m(t)]^T \quad (10)$$

с $\sigma = \text{diag}\{\sigma_{A1} \quad \sigma_{A2} \quad \sigma_{Am}\}$,

$$\sigma_{Aj} = \begin{cases} 1, & \text{отказ } j\text{-ого ОУ} \\ 0, & \text{норма} \end{cases} \quad (11)$$

где каждая модель соответствует определенному сценарию отказа.

Рассмотрим следующее матричное уравнение, описывающее короткопериодическое движение самолета:

$$\dot{x} = Ax + B_j u, \quad (12)$$

$$\text{где } B_j = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1j}\lambda_j & \dots & b_{1N} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{l1} & \dots & b_{lj}\lambda_j & \dots & b_{lN} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{p1} & \dots & b_{pj}\lambda_j & \dots & b_{pN} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_j \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix}.$$

Параметр матрицы B учитывает возможный отказ j -го ОУ, j -й столбец матрицы заменяется этим же столбцом для фактора λ_j , который меняется $0 \leq \lambda_j \leq 1$. Промежуточное значение λ_j указывает на снижение производительности j -го органа управления с изменением динамики самолета по заданным параметрам полета.

Однако данный способ моделирования отказов ОУ ограничен. В случае полного отказа j -ого ОУ, λ_j равна нулю. Следовательно, независимо от исходного параметра контроля, генерируемого контроллером для j -го ОУ, это существенно не повлияет на динамику самолета, и отклонение неисправного ОУ принимается равным нулю. В случае фактического клиннения j -го ОУ в ненулевом положении, сигнал управления, передаваемый на j -й ОУ, также не оказывает влияния на динамику самолета; из этого следует, что при отказе органа управления динамика самолета изменяется.

При моделировании рассматриваются пять органов управления исследуемого самолета, это один левый элерон, один правый элерон, левый руль высоты, правый руль высоты и руль направления, как показано на рис. 3. Все ОУ независимы друг от друга, что означает, что эле-

роны (или рули высоты) могут индивидуально отклониться вверх, вниз или одновременно в одно направление. Данная конфигурация позволяет создавать момент тангажа с элеронами или некоторый момент крена с рулями высоты.

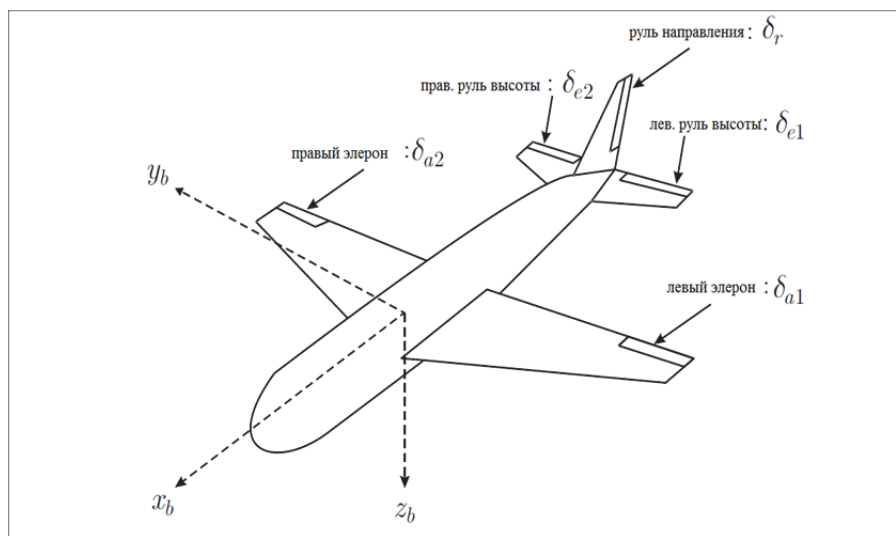


Рис. 3. Конфигурация органа управления самолетом
Fig. 3. Aircraft controls configuration

Вектор состояния ЛА $\mathbf{x} = [p \ q \ r \ \alpha \ \beta]^T$. Вектор управления самолетом $\mathbf{u} = [\delta_{a1} \ \delta_{a2} \ \delta_{e1} \ \delta_{e2} \ \delta_r \ F_T]^T$, $\delta = [\delta_{a1} \ \delta_{a2} \ \delta_{e1} \ \delta_{e2} \ \delta_r]^T$.

Среди нелинейных уравнений, описывающих динамику самолета, большое внимание в данной работе уделяется вычислениям, связанным со скоростью разворота самолета. Они показывают отношения между углами разворота и аэродинамическими моментами, действующими на самолет, т. е. $[L \ M \ N]^T$, выраженными в системе координат самолета как $(x_b y_b z_b)$.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = (I^b)^{-1} \left(\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times I^b \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \right) \quad (13)$$

В контексте данной работы объектом исследования является самолет Боинг 747. Модель динамики полета данного самолета в программе MATLAB вместе с моделью отказов его органов управления используется для анализа поведения (оценки управляемости) самолета при допущении частичного или полного отказа j -го ОУ самолета с учетом особенностей его САУ.

Аэродинамические моменты исследуемого самолета можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} L &= qSbC_L(\delta_{a1}, \delta_{a2}, \delta_{e1}, \delta_{e2}, p, r, \beta), \\ M &= qS\bar{c}C_M(\delta_{a1}, \delta_{a2}, \delta_{e1}, \delta_{e2}, \alpha, q), \\ N &= qSbC_N(\delta_{a1}, \delta_{a2}, \delta_{e1}, \delta_{e2}, \delta_r, r, \beta), \end{aligned} \quad (14)$$

где $q = \frac{\rho V_T^2}{2}$ – скоростной напор, абсолютная скорость V_T , плотность воздуха ρ , площадь ла S , размах самолета b и $\bar{c}$ хорд крыла.

Аэродинамические производные выражаются в виде линейной комбинации элементов состояния и исходных параметров управления самолетом:

$$C_L = C_{La1}\delta_{a1} + C_{La2}\delta_{a2} + C_{Le1}\delta_{e1} + C_{Le2}\delta_{e2} + C_{L\tilde{p}}\tilde{p} + C_{L\tilde{r}}\tilde{r} + C_{L\beta}\beta,$$

$$C_M = C_{Ma1}\delta_{a1} + C_{Ma2}\delta_{a2} + C_{Me1}\delta_{e1} + C_{Me2}\delta_{e2} + C_{M\tilde{q}}\tilde{q} + C_{M\alpha}\alpha, \quad (15)$$

$$C_N = C_{N\delta_r}\delta_r + C_{N\tilde{r}}\tilde{r} + C_{N\beta}\beta,$$

$$\tilde{p} = \frac{bp}{2V_T}, \quad \tilde{q} = \frac{\bar{c}q}{2V_T}, \quad \tilde{r} = \frac{br}{2V_T}. \quad (16)$$

Ниже приведена матрица отказов ($U_{747\text{aero}}$), содержащая 9×5 элементов, представляющих органы управления исследуемого самолета.

$$U_{747\text{aero}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Данная матрица – модель отказов вводится в САУ для оценки ее влияния на изменение динамики самолета в целом. Вводятся отказы как индивидуально для каждого органа управления, так и совместно для некоторых органов управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ ОУ НА ДИНАМИКУ ДВИЖЕНИЯ БОИНГА 747 В ПОЛЕТЕ

На рис. 4 представлено сравнение параметров движения самолета в исправном и отказном состояниях ОУ в балансировочном положении с внешним возмущением при движении по тангажу.

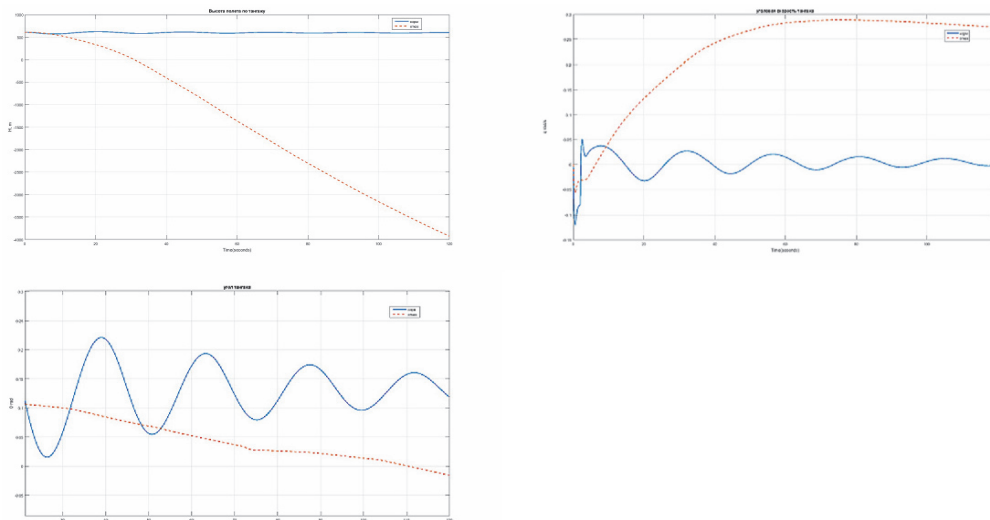


Рис. 4. Записи симуляции полета исследуемого самолета при движении по тангажу
Fig. 4. Investigated aircraft simulation records on pitch

На рис. 5 представлено сравнение параметров движения самолета в исправном и отказном состояниях ОУ в балансировочном положении с внешним возмущением при движении по рысканию.

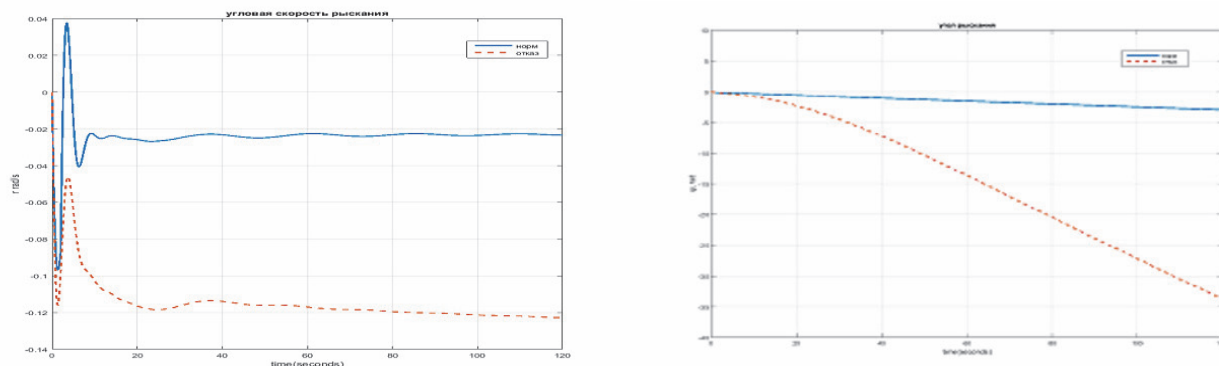


Рис. 5. Записи симуляции полета исследуемого самолета при движении по рысканию
Fig. 5. Investigated aircraft simulation records on yaw

На рис. 6 представлено сравнение параметров движения самолета в исправном и отказном состояниях ОУ в балансировочном положении с внешним возмущением при движении по крену.

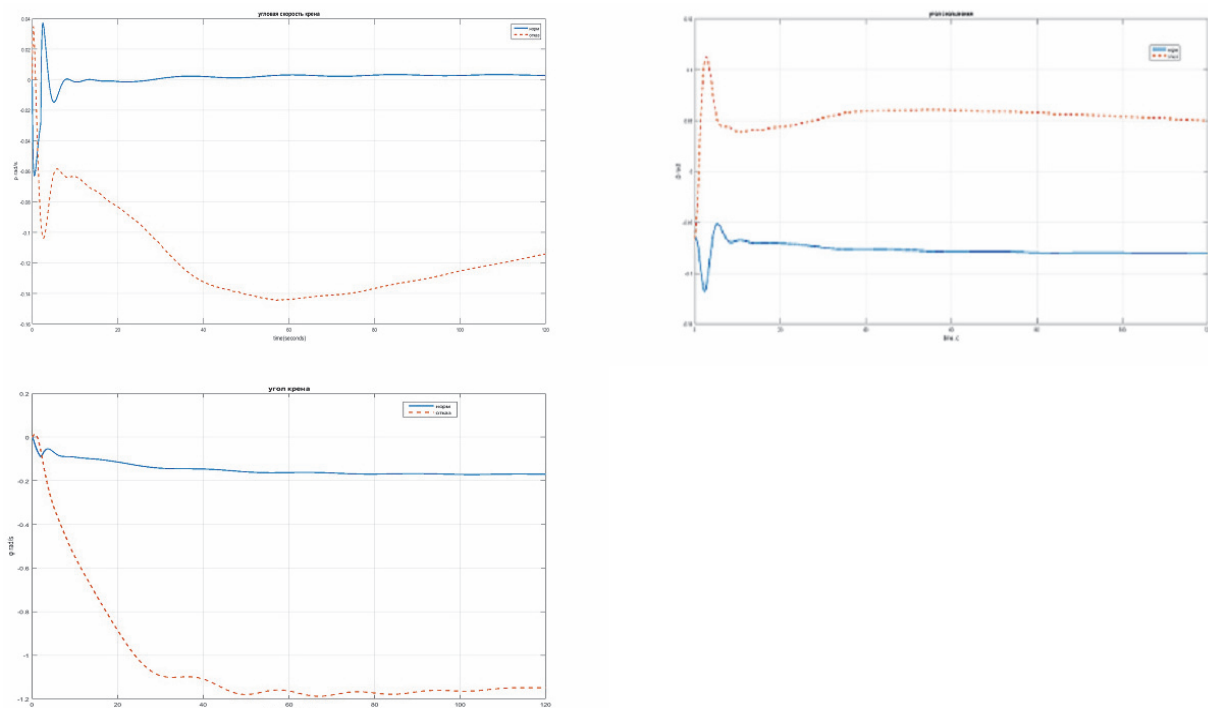


Рис. 6. Записи симуляции полета исследуемого самолета при движении по крену
Fig. 6. Investigated aircraft simulation records on roll

Наблюдаемые изменения параметров движения самолета после ввода матрицы отказов при управлении самолетом от САУ показывает, что наблюдается нерасчетное движение самолета по крену курса и тангажу. При таких заданных параметрах компьютерная визуализация в симуляторе FlightGear привела к полной потере управляемости самолета. Один из примеров – отказ левого элерона на высоте 610 м, что привело к резкому крену ВС вправо, несмотря на противодействующую команду автопилота. Видно, что нет связи между заданным сигналом и

маневром самолета, это ясно показывает нарушение уравнения (15). Однако САУ самолета успешно справилась с парированием/сглаживанием некоторых видов отказов, например, ограничение θ при отказах, связанных с колебанием ОУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования при отказах (колебание, клинение, увод в крайнее положение и снижение производительности) ОУ обоснована целесообразность применения модели отказов ОУ в дальнейшем для оценки управляемости ВС при допущении частичного или полного отказа i -го ОУ. Таким образом, по наглядному примеру моделирования в программе Matlab Simulink и Aerospace Blockset, приведенному в работе, можно сделать вывод о том, что отказы вследствие увода в крайнее положение ОУ, клинения ОУ и снижения производительности ОУ из-за возможного разрушения конструкций при стабилизации углов по тангажу и крену, являются фатальными, что неизбежно приведет к катастрофе. С такими отказами САУ ВС не справляется, и в дальнейшем требуется разработка алгоритмов реконфигурации параметров управления, а также адаптации её к работоспособному функционированию. Реконфигурируемые алгоритмы существенно могут повлиять на повышение живучести, надежности, безопасности выполнения полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акимов А.Н.** Метод идентификации отказов динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1992. № 6.
2. **Акимов А.Н., Воробьев В.В.** Обнаружение и идентификация отказов органов управления с помощью функций чувствительности // Обеспечение безопасности полетов: научно-методические материалы / под ред. С.А. Попыталова. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1989. С. 85–91.
3. **Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М.** Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь, 1985.
4. **Jacobson Steven R.** Aircraft Loss of Control Causal Factors and Mitigation Challenges, NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, California, 93523.
5. **Christopher E., Thomas L., Hafid S.** Fault Tolerant Flight Control URL: [https://books.google.ru/books?id=R9lsCQAAQBAJ&pg=PA205&lpg=PA205&dq=loss+of+control+due+to+Flight+control+surfaces+faults&source=bl&ots=\(дата обращения 29.12.2016\)](https://books.google.ru/books?id=R9lsCQAAQBAJ&pg=PA205&lpg=PA205&dq=loss+of+control+due+to+Flight+control+surfaces+faults&source=bl&ots=(дата обращения 29.12.2016)).
6. Loss of Control [Электронный ресурс]. URL: <https://aviation-safety.net/> (дата обращения 29.12.2016).
7. **Edwards C., Lombaerts T.J.J., and Smaili M.H., Eds.** Fault Tolerant Flight Control: A Benchmark Challenge. Springer, 2010.
8. **Jiang J. and Yu X.** Fault-tolerant flight control system design against control surface impairments. IEEE Aerospace and Electronics Systems, 2012, vol. 20 (4), pp. 871–886.
9. **Ducard G. and Geering H.P.,** Efficient nonlinear actuator fault detection and isolation system for unmanned aerial vehicles. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, vol. 31 (1), pp. 225–237.
10. **Henry D., Zolghadri A., Cieslak J., Efimov D.V.** A lpv approach for early fault detection in aircraft control surfaces servo-loops in Proc. 8th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS 2012, Mexico, 2012, pp. 806–811.
11. **Shafai E.** Einführung in die Adaptive Regelung. Lecture Notes, IMRT, ETH Zurich, 2003.
12. **Tao G., Chen S., Tang X., Joshi S.M.** Adaptive Control of Systems with Actuator Failures. Springer-Verlag, London Berlin Heidelberg, 2004.
13. **Ducard G.J.J.** Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems. Springer Verlag, 2009.

14. Wu N.E. Coverage in fault-tolerant control. *Automatica*, 2004 vol. 40, no. 4, pp. 537–548.

15. Theilliol D., Ponsart J.C., Noura H., Vela Valdes L.G. A Multiple Model Based Approach for Sensor Fault-Tolerant Control of Nonlinear Systems. In *Proceedings of the Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, October 2004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Огунвоул Блессинг Деле, аспирант МГТУ ГА, dams4iboko@mail.ru.

Баланчук Евгения Александровна, аспирантка МГТУ ГА, gedeonburkhard@mail.ru.

Кандыба Константин Сергеевич, аспирант МГТУ ГА, kskandyba@gmail.com.

FAULT DIAGNOSIS OF AN AIRCRAFT CONTROL SURFACES WITH AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM

Blessing D. Ogunvoul¹, Evgeniya A. Balanchuk², Konstantin S. Kandyba³

¹National Space Development and Research Agency, Abuja, Nigeria

²Department of production planning, ZAO "UTG", Moscow, Russia

³Sheremetyevo International Airport, Khimki, Russia

ABSTRACT

This article is devoted to studying of fault diagnosis of an aircraft control surfaces using fault models to identify specific causes. Such failures as jamming, vibration, extreme run out and performance decrease are covered.

It is proved that in case of an actuator failure or flight control structural damage, the aircraft performance decreases significantly. Commercial aircraft frequently appear in the areas of military conflicts and terrorist activity, where the risk of shooting attack is high, for example in Syria, Iraq, South Sudan etc. Accordingly, it is necessary to create and assess the fault model to identify the flight control failures.

The research results demonstrate that the adequate fault model is the first step towards the managing the challenges of loss of aircraft controllability. This model is also an element of adaptive failure-resistant management model.

The research considers the relationship between the parameters of an i^{th} state of a control surface and its angular rate, also parameters classification associated with specific control surfaces in order to avoid conflict/inconsistency in the determination of a faulty control surface and its condition.

The results of the method obtained in this article can be used in the design of an aircraft automated control system for timely identification of fault/failure of a specific control surface, that would contribute to an effective role aimed at increasing the survivability of an aircraft and increasing the acceptable level of safety due to loss of control.

Key words: aircraft, control system, faults model, controllability, fault, control surface.

REFERENCES

1. Akimov A.N. *Metod identifikacii otkazov dinamicheskikh sistem* [Method of identifying failures of dynamic systems]. Automation and Telemetry, 1992, No. 6.

2. Akimov A.N., Vorobyov V.V. *Obnaruzhenie i identifikacija otkazov organov upravleniya s pomoshh'ju funktsij chuvstvitel'nosti* [Detection and identification of control surface failures using sensitivity functions. Safety Management: Research and teaching materials. Ed. S.A. Popytalova]. M., VVIA im. N.E. Zhukovsky, 1989, pp. 85–91.

3. Grishin Y.P., Kazarinov Y.M. *Dinamicheskie sistemy, ustojchivye k otkazam* [Dynamic systems that are resilient to failures]. M., Radio and communication, 1985.

4. Jacobson Steven R. Aircraft Loss of Control Causal Factors and Mitigation Challenges, NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, California, 93523.

5. **Christopher E., Thomas L., Hafid S.** Fault Tolerant Flight Control URL: <https://books.google.ru/books?id=R9lsCQAAQBAJ&pg=PA205&lpg=PA205&dq=loss+of+control+due+to+Flight+control+surfaces+faults&source=bl&ots=> (accessed 29.12.2016).
6. Loss of Control [Электронный ресурс]. URL: <https://aviation-safety.net/> (accessed 29.12.2016).
7. **Edwards C., Lombaerts T.J.J., and Smaili M.H., Eds.** Fault Tolerant Flight Control: A Benchmark Challenge. Springer, 2010.
8. **Jiang J. and Yu X.** Fault-tolerant flight control system design against control surface impairments. IEEE Aerospace and Electronics Systems, 2012, vol. 20 (4), pp. 871–886.
9. **Ducard G. and Geering H.P.,** Efficient nonlinear actuator fault detection and isolation system for unmanned aerial vehicles. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, vol. 31 (1), pp. 225–237.
10. **Henry D., Zolghadri A., Cieslak J., Efimov D.V.** A lpv approach for early fault detection in aircraft control surfaces servo-loops in Proc. 8th IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS 2012, Mexico, 2012, pp. 806–811.
11. **Shafai E.** Einführung in die Adaptive Regelung. Lecture Notes, IMRT, ETH Zurich, 2003.
12. **Tao G., Chen S., Tang X., Joshi S.M.** Adaptive Control of Systems with Actuator Failures. Springer-Verlag, London Berlin Heidelberg, 2004.
13. **Ducard G.J.J.** Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems. Springer Verlag, 2009.
14. **Wu N.E.** Coverage in fault-tolerant control. Automatica, 2004 vol. 40, no. 4, pp. 537–548.
15. **Theilliol D., Ponsart J.C., Noura H., Vela Valdes L.G.** A Multiple Model Based Approach for Sensor Fault-Tolerant Control of Nonlinear Systems. In Proceedings of the Congreso Latinoamericano de Control Automatico, October 2004.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Blessing D. Ogunvoul, PhD student of Moscow State Technical University of Civil Aviation, dams4iboko@mail.ru.

Evgeniya A. Balanchuk, PhD student of Moscow State Technical University of Civil Aviation, gedeonburkhard@mail.ru.

Konstantin S. Kandyba, PhD student of Moscow State Technical University of Civil Aviation, kskandyba@gmail.com.

Поступила в редакцию
Принята в печать

14.02.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

14.02.2017
25.05.2017

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЛЕТНОГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Н.А. АССОРОВ¹

¹*Московский центр автоматизированного управления воздушным движением,
г. Москва, Россия*

Рассматривается проблема упорядочения потока воздушных судов (ВС) как одна из задач обслуживания воздушного движения. Фактически этап полета воздушного судна, на котором к нему должны применяться меры по регулированию и построению потока, сильно зависит от интенсивности воздушного движения и структуры воздушного пространства аэропорта, который данное ВС следует.

Приведен пример воздушной обстановки с двумя прилетными ВС на аэродром Домодедово, при работающей ВПП 32 (правая), в обстановке, не осложненной какими-либо погодными условиями. При расчете была учтена структура воздушного пространства, удаление ее элементов друг от друга, применяющиеся схемы захода на посадку, а также ограничения по скоростям и их изменению, описанные в руководящих документах и сборниках аэронавигационной информации. Для большей достоверности результатов были применены два метода расчета, которые в итоге дали схожие результаты.

Как показал расчет, без должного построения потока воздушных судов до входа в зону на диспетчеров подхода будет падать дополнительная нагрузка по решению задач, которые могли быть решены еще до входа ВС в их зону.

В статье учтен международный опыт решения проблемы, показана возможность и методы упорядочивания потока ВС в секторах районного центра, предложены изменения в технологии работы диспетчеров, а также предложено рассмотреть данную проблему с точки зрения автоматизации ее решения.

Ключевые слова: упорядочивание потока ВС, пропускная способность, структура воздушного пространства, metering, AMAN.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с федеральными авиационными правилами «Организация воздушного движения в РФ» [1] одной из задач обслуживания воздушного движения является ускорение и поддержание упорядоченного потока воздушного движения. Однако точного объяснения, что такое упорядоченный поток воздушного движения и в какой момент его необходимо начинать упорядочивать, нет. На примере аэродрома Домодедово рассмотрим необходимость и методы этой процедуры.

За время существования авиации представление об упорядочивании потока ВС менялось. Применялись схемы типа ипподром, point merge, схемы с использованием зональной навигации (тромбоны) и, разумеется, векторение. Отличительной особенностью всех этих схем является то, что они помогают выстраивать очередность и берут на себя часть задач по регулированию потока воздушных судов, чтобы снизить нагрузку на диспетчера, но при большом одновременном наплыве ВС они теряют свою эффективность, и приходится прибегать к зонам ожидания и векторению. Можно сказать, что для их оптимальной работы необходим упорядоченный поток воздушных судов, а если с разных направлений одновременно выйдут по пять ВС без должного интервала, то даже самая совершенная схема STAR не сможет их выстроить. Более того, на процесс векторения и управления скоростями это тоже оказывает большое влияние, т. к. векторение основано исключительно на умении и человеческих возможностях отдельного диспетчера, а ситуация, при которой диспетчер вынужден решать задачи по созданию интервалов между ВС, которые могли бы войти в его зону уже с необходимым продольным интервалом, лишь повышает нагрузку на него. Именно эшелонирование потока ВС на определенные продольные интервалы до входа этих ВС в зону ТМА (terminal manoeuvring area) и является тем самым необходимым упорядочиванием и выстраиванием потока ВС.

ПРИМЕР УПОРЯДОЧЕНИЯ ПОТОКА ВС

Рассмотрим необходимость упорядочивания потока ВС на примере аэропорта Домодедово для различных ситуаций. При работе ВПП 32 (правая) сравним действия и возможности диспетчера для обеспечения наиболее оптимального и экономичного захода на посадку.

Для прибывающих воздушных судов при входе в Московский узловой диспетчерский район (МУДР) установлены ограничения скорости с момента начала снижения с эшелона [2]:

- $V_{пр} 520 \pm 20$ км/ч (280 узлов) или $M 0,8$ (что из них меньше) с крейсерского эшелона полета до эшелона 7600 м (FL250);

- $V_{пр} 500 \pm 20$ км/ч (270 узлов) ниже эшелона 7600 м (FL250) до эшелона 3050 м (FL100);

- $V_{пр} 460 \pm 20$ км/ч (250 узлов) ниже эшелона 3050 м (FL100) до эшелона перехода;

- от ПДЗ GEKLA, ОПРС Марьино (РВ), Аксиньино (АО), Скурыгино (ДР), Климовск (ЛО) до точки 22 км от торца ВПП – 410 ± 20 км/ч (220 узлов);

- после пролета точки на удалении 22 км от торца ВПП уменьшить приборную скорость до 300 ± 20 км/ч (160 узлов) с закрылками в промежуточном положении, шасси убраны.

Помимо ограничений, описанных в АИП РФ, ФАП «Организация воздушного движения в ВП РФ» устанавливает следующие ограничения при управлении приборной скоростью [1].

1. На начальном этапе снижения с крейсерского эшелона для турбореактивных воздушных судов орган ОВД не может назначать уменьшение скорости до значения менее 460 км/ч (250 узлов) без согласования с экипажем.

2. Орган ОВД не должен давать указание экипажу на одновременное выдерживание увеличенной скорости снижения и уменьшенной скорости полета.

3. Орган ОВД регулирует скорости полета прибывающих воздушных судов таким образом, чтобы выполнение полета с убранными механизацией и шасси происходило в течение максимально возможного времени. Рекомендуются использовать уменьшение скорости ниже высоты 4550 м (эшелон полета 150) для турбореактивных воздушных судов до значений не менее 410 км/ч (220 узлов), что соответствует минимальной скорости с убранными механизацией и шасси.

4. На промежуточном и конечном этапе захода на посадку органу ОВД следует использовать лишь незначительное изменение скорости, не превышающее ± 40 км/ч (20 узлов).

Исходя из вышеуказанного, смоделируем ситуацию. В районе ПОД Октябрьский (FE) выходит 2 ВС на эшелоне 220 и 240 соответственно, без продольного интервала. Заход будет выполняться на полосу 32 правая по транзитному маршруту FE 1D, по кратчайшей схеме Аксиньино 32А (АО 32А, заход с прямой) (рис. 1). Когда два ВС находятся над одной точкой и следуют на один аэродром, уже нет смысла придерживаться скоростей, указанных в АИП, поэтому целесообразно сразу увеличить скорость первому ВС до 300 узлов, а второму уменьшить скорость до 250 узлов, т. к. ФАП ОВД не рекомендует уменьшать скорость менее 250 узлов до эшелона 150. Получаем разницу в 50 узлов между двумя ВС, хотя фактически она будет меньше, т. к. одно из ВС находится на 2 эшелона выше другого, соответственно оно будет лететь как минимум на 12 узлов быстрее [3]. Необходимый интервал на прямой зависит от заходящих типов ВС, условий полета, состояния ВПП и ограничений, которые требует Домодедово-Вышка. Для расчета возьмем среднее значение – 10 км. Для удобства в расчетах будут использоваться узлы (морские мили в час) и морские мили, т. к. абсолютное большинство ВС используют мили и узлы в своей навигации, а авиационное законодательство РФ также разрешает использовать данные единицы при ОВД [4]. Расстояние, которое необходимо преодолеть от FE до точки ОКМЕЛ (точка начального захода на посадку) равно 65 м.м. (121 км). На основании замеров, произведенных на диспетчерском тренажере в штилевых условиях и в реальной воздушной обстановке в условиях, близких к штилевым, при данных скоростях указанный отрезок первое ВС проходит за 11,5 минут, второе ВС проходит за 15 минут.

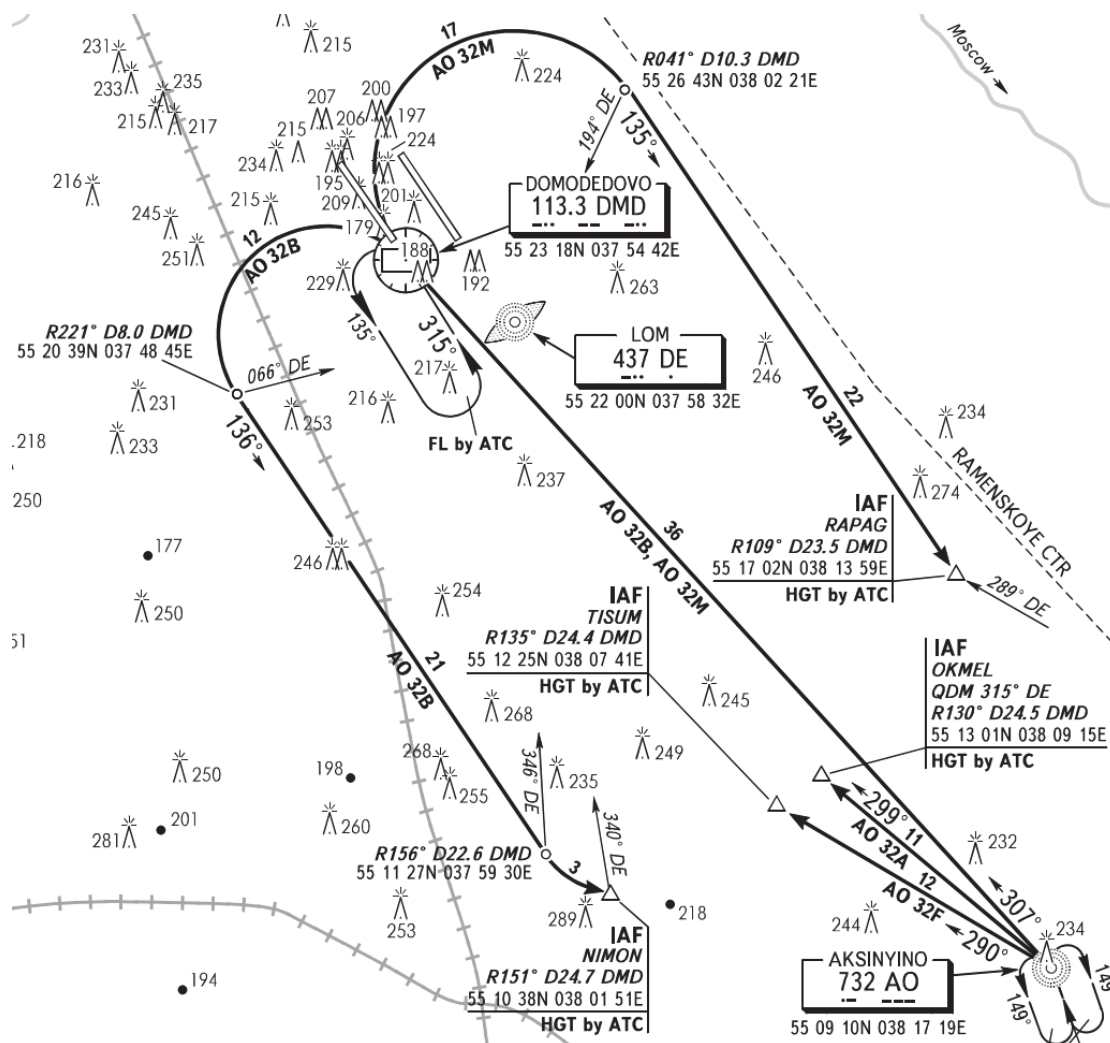


Рис. 1. Стандартный маршрут прибытия по приборам Домодедово
Fig. 1. Standard terminal arrival route Domodedovo

При условии, что на протяжении снижения диспетчер будет уменьшать обоим ВС скорость таким образом, чтобы сохранялась разница в 50 узлов, разница прохода точки ОКМЕЛ составит

$$15_{\text{минут}} - 11,5_{\text{минут}} = 3,5_{\text{минуты}} = 0,058_{\text{часов}}$$

После точки ОКМЕЛ ВС должны будут уменьшать скорость до 160 узлов, поэтому среднюю скорость на участке АО – ТВГ возьмем 200 узлов:

$$0,058_{\text{часа}} \cdot 200_{\text{узлов}} = 11,6_{\text{м.м.}} \approx (21,5_{\text{км}}).$$

Проведем расчет для данной ситуации другим способом. На данном расстоянии оба ВС будут сохранять между собой разницу в приборной скорости 50 узлов.

$$(250 \div 60) \cdot (60 \div 300) = 0,833_{\text{м.м.}}$$

За время, когда первое ВС прошло 1 м.м., второе ВС проходит 0,833 м.м. Таким образом, второе ВС на каждую милю первого проходит на 0,167 м.м. меньше. Выберем необходимый

нам продольный интервал 11 м.м. на прямой и определим, на каком расстоянии этот интервал будет создан:

$$(300 \cdot 11) \div (300 \cdot 0,167) = 65,8_{\text{м.м.}}$$

Данное расстояние соответствует расстоянию от FE до ОКМЕЛ. Оба способа подтверждают, что с двумя ВС в одной точке интервал на прямой составит около 11 м.м. (20 км), при необходимом интервале в 10 км это дает диспетчеру возможность завести еще 1 ВС по схеме между ними, руководя только лишь скоростями. Выходит, что максимум 3 ВС могут выйти к диспетчеру на одинаковом удалении от аэродрома, чтобы задача по упорядочиванию потока и выстраиванию его на посадку была решена лишь управлением скоростями. При заявленной максимальной часовой интенсивности воздушного движения в Домодедово 47–59 ВС/час [5] не требуется лишних подсчетов, чтобы понять, что имеющиеся схемы не справятся с таким потоком, а управление скоростями будет применяться уже при векторении, а не заходе на посадку по схеме.

ПОСТРОЕНИЕ ПОТОКА ВС НА ДАЛЬНИХ РУБЕЖАХ

Каким образом можно разгрузить сектора Подхода от ненужной работы по созданию интервалов между ВС следующих в одном потоке с одного направления? До входа в зону ТМА ВС продолжительное время следуют под управлением секторов Москва-Контроль. В зависимости от времени суток с каждого определенного направления имеется преобладающий поток, например на ПОД FE ВС идут с востока по сектору Пенза-1, либо с юга по секторам Воронеж-3/4, далее Пенза-1.

Таблица 1
Table 1

Пройденное расстояние	5 м.м.	10 м.м.	15 м.м.	20 м.м.	25 м.м.	30 м.м.
Угол отворота						
10°	0,87	1,74	2,61	3,49	4,36	5,23
20°	1,74	3,47	5,21	6,95	8,68	10,42
30°	2,59	5,18	7,76	10,35	12,94	15,53
45°	3,83	7,65	11,48	15,31	19,13	22,96

Соответственно, с восточного направления ВС находятся около 250 км под управлением Москва-Контроль, с южного направления – около 510 км. Чем больше расстояние, тем меньше разница в скоростях нужна между ВС для создания интервалов. Если при входе в зону ответственности Москва-Контроль сектор Воронеж-3 двум ВС будет задана разница в 20 км/ч (разница примерно 0,02 Маха), то на FE будет создан продольный интервал 12 км, тогда сектору Москва-Подход уже надо будет только поддерживать данный интервал и встроить в очередь эти ВС к ВС, следующим с других направлений. Если воздушная обстановка не позволяет в нужный момент произвести регулирование скоростями, то всегда можно прибегнуть к векторению.

Как видно из табл. 1, при одинаковых скоростях отворот на 30 градусов создаст продольный интервал между ВС, равный половине пройденного расстояния. Проще это будет сде-

Fig. 2. Restricted areas after point FE

ВЫВОДЫ

56

технологиях работы диспетчеров, как это сделано во многих загруженных аэропортах мира, где давно и активно применяются такие методы организации потоков. Данная проблема актуальна и продолжает исследоваться, при этом создаются современные средства автоматизации, позволяющие более точно и эффективно упорядочивать потоки ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в РФ». Утв. Минтрансом РФ 25.11.2011, № 293.
2. Сборник Аэронавигационной информации АИП РФ.
3. Организация воздушного движения. Документ ИКАО Doc 4444 ATM/501. 15-е изд. ИКАО, 2007.
4. Федеральные авиационные правила «Порядок осуществления радиосвязи в воздушном пространстве Российской Федерации». Утв. приказом Министерства транспорта РФ от 26 сентября 2012 г. № 362.
5. Сайт Московского центра автоматизированного управления воздушным движением [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atcm.ru/proizvodstvo/organizatsiya-vozdushnogo-dvizheniya> (дата обращения 14.02.2017).
6. Favennec B., Rognin L., Trzmiel A., Vergne F., Zeghal K. Point Merge in Extended Terminal Area [Электронный ресурс]. URL: http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2010/012_Point_Merge_in_extended_TMA.pdf (дата обращения 14.02.2017).
7. Сайт поставщика аэронавигационного обслуживания в УК (NATS) [Электронный ресурс]. URL: http://nats.aero/blog/wp-content/uploads/2013/07/EAMAN_11July.pdf (дата обращения 14.02.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

ON THE ARRIVAL TRAFFIC FLOW ORGANIZATION

Nikita A. Assorov¹

¹*Moscow Air Traffic Control Centre*

ABSTRACT

This article is about air traffic flow organization, ICAO regulations describe the organizing of traffic flow as one of the purposes of air traffic control, but they don't state exactly at what point the flow has to be organized and metered. The flight phase, where air traffic controller interferes with his instructions in order to begin organizing of all aircraft landing at a certain airport depends on the actual traffic volume per hour, airspace capacity and design.

The example of air traffic situation in Moscow Domodedovo airport is described in the article, with runway 32 right in use, no significant weather, real usage of STARs, considering all the ICAO and Russian Federation regulations regarding speed control with the restrictions mentioned in AIP of Moscow Domodedovo. The purpose of the experiment is to prove the need of metering the air traffic flow on the entry points in Moscow TMA, because in case of unorganized air traffic flow approach controllers will have additional unnecessary workload.

The conducted calculations show, that only 3 aircraft entering TMA on the same distance from initial approach point can be handled using only speed control and existing standard arrival procedures, in all other cases vectoring or holding areas should be used.

In order to avoid such situations and increase the number of the aircraft that can be handled by the approach controller with less instructions, all the traffic arriving on the TMA entry point has to be metered by area control centre, because the air traffic control unit has much more space and time for long term speed control modifications, e.g. $\pm 0,02$ Mach.

In conclusion a simple rule comes to mind – the bigger inbound traffic is, the earlier one has to organize it, in order to do it speed control, radar vectors, miles-in-trail can be used. Also new equipment and technology can help air traffic controller with this task, e.g. AMAN (arrival manager), in addition to this, the experience of London Heathrow airport, which increases the AMAN horizon from 150 nm to 600 nm, has to be studied by all concerned air traffic providers.

Key words: air traffic flow organization, bandwidth, capacity metering, AMAN, airspace pattern.

REFERENCES

1. *Federalnyie aviatsionnyie pravila «Organizatsiya vozdušnogo dvizheniya v RF»*. ["Air Traffic Management in the Russian Federation"]. *Utv. Mintransom RF 25.11.2011*, N 293. (in Russian)
2. *Sbornik Aeronavigatsionnoy informatsii AIP RF* [Aeronautical information publication of Russian Federation (AIR Russian)]. (in Russian)
3. *Organizatsiya vozdušnogo dvizheniya* [Air Traffic Management]. Dokument ICAO Doc 4444 ATM/501. 15-e izd. ICAO, 2007. (in Russian)
4. *Federalnyie aviatsionnyie pravila "Poryadok osuschestvleniya radiosvyazi v vozdušnom prostranstve Rossiyskoy Federatsii"* [Radiotelephony regulations in the airspace on Russian Federation]. *Utv. prikazom Ministerstva transporta RF ot 26 sentyabrya 2012 g.* N 362. (in Russian)
5. *Sayt Moskovskogo tsentra avtomatizirovannogo upravleniya vozdušnyim dvizheniem* [Moscow Air Traffic Control Center website]. URL: <http://www.atcm.ru/proizvodstvo/organizatsiya-vozdušnogo-dvizheniya> (accessed: 14.02.2017). (in Russian)
6. Favenec B., Rognin L., Trzmiel A., Vergne F., Zeghal K., Point Merge in Extended Terminal Area. URL: http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2010/012_Point_Merge_in_extended_TMA.pdf (accessed: 14.02.2017).
7. *Sayt postavschika aeronavigatsionnogo obsluzhivaniya v UK (NATS)* [Air navigation service provider in the UK]. URL: http://nats.aero/blog/wp-content/uploads/2013/07/EAMAN_11July.pdf (accessed: 14.02.2017).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikita A. Assorov, Air Traffic Controller in Moscow Air Traffic Control Centre, nikssor@yandex.ru.

Поступила в редакцию 22.02.2017
Принята в печать 27.05.2017

Received 22.02.2017
Accepted for publication 27.05.2017

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ НА АЭРОДРОМАХ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ В ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАНАХ

Е.Е. НЕЧАЕВ¹, П.С. СУРИНТ²

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

²*ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» филиал «МЦ АУВД», г. Москва, Россия*

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

В статье рассматриваются различные варианты организации воздушного движения на аэродромах с низкой интенсивностью полетов, на которых наличие диспетчерского обслуживания не всегда оправдано.

Приведены примеры уже реализованных концепций в зарубежных странах: такие как удаленные командно-диспетчерские пункты (КДП), которые позволяют управлять воздушным движением, находясь на значительном расстоянии от аэродрома. Первый удаленный КДП уже введен в эксплуатацию в аэропорту Örnköldsvik (Швеция). Перспективы развития таких систем рассматриваются и в других странах, например, в Австралии, США и Германии. В ближайшее время на территории США также появится аэропорт с удаленным КДП. В статье проанализированы плюсы и минусы данной системы управления воздушным движением и ее влияние на безопасность полетов.

В статье рассматривается зарубежный опыт использования неконтролируемых аэродромов, на которых полностью отсутствует диспетчерское обслуживание. На примере аэродромов США и Новой Зеландии проведен анализ основных правил полетов в районе неконтролируемых аэродромов и их влияние на безопасность полетов. Приняты во внимание правила полетов при визуальных метеорологических условиях для учебно-тренировочных полетов и при полетах по приборам для регулярных и нерегулярных рейсов авиакомпаний. Приведены критерии оценки необходимости того или иного обслуживания в зависимости от интенсивности полетов.

Дана оценка перспектив внедрения удаленных КДП и неконтролируемых аэродромов в структуре ЕС ОрВД, в которой большая часть аэродромов имеет менее 10 взлетно-посадочных операций в сутки, а диспетчерское обслуживание предоставляется на всех аэродромах.

Ключевые слова: организация воздушного движения, система удаленных КДП, неконтролируемые аэродромы, полетно-информационное обслуживание.

ВВЕДЕНИЕ

Дискуссии на тему организации воздушного движения на аэродромах с малой интенсивностью не оставляют равнодушными всех поставщиков аэронавигационных услуг по всему миру. На территории РФ более 80 % аэродромов имеют интенсивность полетов менее 10 взлетно-посадочных операций в сутки, поэтому эта проблема остро стоит для Госкорпорации по ОрВД. Но идеальное решение данной проблемы, выгодное как для эксплуатантов, так и для поставщика, не найдено. В настоящее время существует как минимум два перспективных варианта организации воздушного движения на таких аэродромах. Первый – это организация удаленного контроля над аэродромом, который позволит объединить в одном аэропорту контроль за несколькими аэродромами, находящимися на значительном удалении от него. Второй – это переход аэродромов с малой интенсивностью полетов с диспетчерского обслуживания на полетно-информационное или же на полный перевод таких аэродромов на неконтролируемую основу. Два этих варианта имеют ряд своих плюсов и минусов, что будет проанализировано в данной статье, и будет сделан вывод о том, какой вариант более перспективен для ЕС ОрВД с точки зрения безопасности полетов и экономичности.

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДРОМОМ

Перспективная система управления воздушным движением, основанная на применении технологии, получившей название RTS (Remote Tower System – Система удаленных КДП), открывает широкие возможности для применения передовых методов и средств контроля над воздушной обстановкой и системами удаленного аэродрома, предлагая альтернативный способ управления небольшими аэродромами через единый центр управления воздушным движением УВД [1].

Основной компанией, предоставлявшей услуги по установке удаленных КДП во всем мире, является SAAB, та самая, что устанавливала систему TERCAS в Московском центре АУВД. Они успешно установили свое оборудование и ввели в эксплуатацию в 2014 году первый удаленно управляемый аэропорт города Örnköldsvik (Швеция). Удаленный КДП расположен в 150 км в городе Сундсваль. Первый полет на данный аэродром был совершен 21 апреля 2015 года, это стало возможным благодаря установке новейшего оборудования компании SAAB.

Для контроля над аэродромом компания SAAB устанавливает следующее оборудование: 14 цифровых камер высокого разрешения, pan-tilt-zoom камеры, которые поддерживают удаленное управление направлением и зумом, система кодирования видеосигнала, микрофоны, метеорологические датчики и другие системы (навигации, светосигнального оборудования и т. д.). Как мы видим, для обеспечения непрерывного контроля над аэродромом Örnköldsvik использован широкий состав оборудования. Но здесь стоит учитывать то, что, в отличие от удаленных аэродромов Севера в РФ, шведский аэропорт расположен на небольшом расстоянии от удаленного КДП, что исключает проблемы с реализацией передачи голосовых сообщений между диспетчером и экипажем.

Состав оборудования удаленного КДП включает в себя: мониторы высокого разрешения для отображения 360-градусной панорамы летного поля, систему стереозвука, систему управления pan-tilt-zoom камерами, интегрированный пульт управления всеми системами аэродрома, а также индикатор воздушной обстановки. Проанализировав состав оборудования, можно прийти к выводу, что основной сложностью является установка систем на самом аэродроме, так как состав рабочего места диспетчера на удаленном КДП достаточно прост.

Аэропорт Örnköldsvik пока является единственным аэродромом с возможностью удаленного контроля, но уже многие страны всерьез задумываются о реализации данного проекта. Концепция развития организации воздушного движения в США предусматривает наличие удаленных КДП. На данный момент полным ходом идет подготовка к испытаниям возможности внедрения удаленного контроля в аэропорту города Leesburg (США). Сейчас этот аэропорт отнесен к разряду неконтролируемых аэродромов, на которых полностью отсутствует диспетчерское обслуживание, а полеты регулируются специальными правилами, которые будут рассмотрены ниже. Из-за большого количества взлетно-посадочных операций, примерно 316 в сутки, аэродром столкнулся с проблемой задержек как на взлет, так и на посадку и частым нарушением правил полетов. Было решено внедрить диспетчерское обслуживание на данном аэродроме, но высокая стоимость строительства диспетчерской вышки привела к поиску альтернативного пути развития, в результате было принято решение об установке оборудования компании SAAB для реализации концепции удаленного КДП.

Очевидно, что система удаленного КДП имеет перспективы не только для удаленных аэродромов с малой интенсивностью полетов, но и для аэропортов со средним и высоким показателем взлетно-посадочных операций в сутки. Строительство новых взлетно-посадочных полос характерно для большинства крупных аэропортов мира, но не всегда новые ВПП хорошо просматриваются с диспетчерской вышки. Для того чтобы сократить расходы на строительство КДП в новом месте, такие аэродромы планируют переводить на частичное удаленное управле-

ние, где часть аэродрома будет контролироваться видеокамерами, а диспетчер получит возможность наблюдать за самыми удаленными местами аэродрома.

Дискуссии о перспективах внедрения системы удаленных КДП на территории РФ ведутся с того момента, когда впервые было упомянуто данное направление развития УВД. Основной площадкой для возможной реализации данного проекта были выбраны регионы Севера, Дальнего Востока, Восточной Сибири, которые во многом, а иногда и полностью зависимы от авиации.

Для начала необходимо определить целесообразность применения данной системы на территории РФ. С одной стороны, это экономия на строительстве командно-диспетчерского пункта или, если он уже имеется, на зарплате диспетчеров по управлению воздушным движением. Наглядный пример – это аэропорт Örnsköldsvik, где годовая зарплата шестерых диспетчеров составляла 175 тысяч долларов США (экономия очевидна). Но не стоит забывать, о том, что все диспетчеры после перехода на удаленное управление получили работу в других центрах ОВД Швеции. Также необходимо упомянуть о цене самой системы, которую предлагает фирма SAAB, во всех официальных источниках о цене умалчивается, говорится лишь о том, что цена ниже стоимости строительства новой диспетчерской вышки. Для примера возьмем вышку в Окленде (США), которая была построена в 2013 году. Ее приблизительная стоимость составила 51 млн долларов США, но это крупный аэропорт с интенсивным движением. Для сравнения можно взять стоимость вышки более мелкого аэропорта со средним движением Fort Lauderdale (США), ее стоимость составила 15 млн долларов США. Такой разрыв в стоимости строительства командно-диспетчерского пункта не позволяет точно сказать, будет ли система компании SAAB дешевле. Также необходимо упомянуть о возможности совмещения управления не более чем тремя аэродромами в едином центре удаленного КДП. Явным плюсом данной системы является повышение безопасности полетов при низкой видимости (туман). При наличии информации, которая выведена на экран монитора, у диспетчера ОВД есть возможность наблюдать местоположение ВС без зрительного контакта с самим ВС. В большинстве крупных аэропортов России данная проблема исчезла после введения в эксплуатацию локатора обзора летного поля, но он зачастую работает некорректно, не отображая объекты либо отображая несуществующие объекты. Возможно, что при использовании специальных камер, станет возможным визуальный контакт с воздушным судном (ВС) при любых значениях видимости.

С другой стороны, при реализации данной системы на удаленных аэродромах Севера возникает проблема передачи голосовых сообщений между диспетчером УВД и экипажем воздушного судна. В том случае если система удаленных КДП развертывается в районах с отсутствием наземных сетей связи, то единственно возможным средством обеспечения информацией являются спутниковые системы связи (ССС) на базе геостационарных и негеостационарных ретрансляторов. С помощью спутниковых каналов связи можно достаточно быстро сформировать глобальную сетевую инфраструктуру, у которой будут самые высокие показатели надежности с низким уровнем ошибок (не более одной на 10 млн переданных бит информации), что позволит органу ОВД располагаться в любой точке земного шара и при этом вести обмен речевой информацией и данными с контролируемым ВС, что особенно важно для самолетовождения в условиях отсутствия радиолокационного контроля [2].

Это, в свою очередь, влечет за собой дополнительные траты на установку дорогостоящего оборудования. Также к минусам можно отнести необходимость визуального контроля над событиями, происходящими на взлетно-посадочной полосе (ВПП) (передвижение ВС, действия наземных служб), что требует установки камер наблюдения. При этом пропускная способность спутникового канала связи не позволит передавать поток данных с высоким качеством со всех камер одновременно [2].

В любом случае на удаленно управляемых аэродромах остается диспетчерское обслуживание, а его целесообразность – это предмет отдельного обсуждения. Дорогостоящее обслуживание зачастую отталкивает эксплуатантов от полетов из-за отсутствия выгоды от пассажиро-перевозок. На территории РФ всего 40 аэродромов обслуживают в среднем 20 или более взлет-

но-посадочных операций в сутки, а на большинстве аэродромов количество взлетно-посадочных операций в сутки едва переваливает за десяток. Согласно ФАП ОрВД одной из главных задач диспетчерского обслуживания является предотвращение столкновений между воздушными судами [3], но в ситуации с низкой интенсивностью полетов, когда в течение суток аэропорт обслуживает менее пяти взлетно-посадочных операций, существует ли опасность столкновения воздушных судов? Какой же вариант организации воздушного движения на аэродромах с малой интенсивностью полетов наиболее приемлем для реализации на территории РФ?

НЕКОНТРОЛИРУЕМЫЕ АЭРОДРОМЫ

Главной особенностью организации воздушного движения на неконтролируемом аэродроме и в его районе является полное отсутствие диспетчерского контроля за полетами ВС. Все правила полетов прописаны в специальных документах, а ответственность за их выполнение возлагается на плечи экипажей ВС. На территории РФ существуют проекты реализации полетно-информационного обслуживания, например, в аэропортах городов Сабетта и Талакан. Но так ли необходимо наличие диспетчера полетно-информационного обслуживания? Использование современного способа передачи данных на борт воздушного судна ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) позволяет экипажам ВС получать всю обновленную информацию, необходимую для выполнения полета. Вещание текущей информации об аэродроме посредством ATIS (Automatic Terminal Information Service) позволяет экипажам принимать решение о посадке или вылете, а наличие бесконфликтных схем вылета и прилета позволит перейти на использование аэродромов без диспетчерского обслуживания в аэропортах с низкой интенсивностью полетов.

Для примера рассмотрим организацию прилета, вылета и полетов в районе неконтролируемого аэродрома на территории США, где количество таких аэропортов превышает 20000 по сравнению с 500, в которых есть диспетчерское обслуживание. Такие аэродромы получили название non-towered airport. С начала использования данного типа обслуживания уже произведено более миллиона взлетно-посадочных операций разными категориями воздушных судов при различных метеорологических условиях. Это стало возможным благодаря тому, что были составлены четкие правила полетов на данных аэродромах, а для экипажей ВС безопасность полетов стала приоритетом.

FAA (Federal Aviation Administration) разработала ряд правил для полетов на аэродромах данного типа. Существующие процедуры не могут описать всех ситуаций, которые могут возникнуть при полетах, поэтому данные правила несут рекомендательный порядок исполнения, а руководство аэродромов само дорабатывает их под местные особенности, такие как наличие препятствий или соседство с крупными аэроузлами. Соблюдение установленных правил способствует исключению вероятности столкновения воздушных судов, упорядоченности движения и снижению уровня шума. Основные рекомендации включают в себя правила маневрирования в зоне аэродрома и порядок радиообмена. Для начала стоит отметить, что отсутствие органа диспетчерского обслуживания не освобождает от ведения радиообмена на выделенной частоте, хотя значительно сокращает его. Передача голосовых данных происходит путем выдачи пилотом в эфир сообщения о своем местоположении, высоты и дальнейшем маневре. В случае если кто-либо из находящихся в эфире игнорирует данное правило, то другие участники полетов в праве составить акт о нарушении безопасности полетов. Выделенная частота для полетов в районе аэродромов без диспетчерского обслуживания называется СТАФ (common traffic advisory frequency), все экипажи должны настроиться на нее до начала руления. Также одним из важных аспектов является то, что частота может быть использована только в двух случаях: передачи данных о своем полете и передачи сообщения в случае возможности столкновения воздушных судов. Запрещается использование частоты для посторонних разговоров, также реко-

мендуется перед началом передачи данных убедиться, что никто больше не передает информацию, так как при использовании симплексной связи оба сообщения будут заблокированы.

В большинстве случаев на территории США non-towered airports используются для тренировочных полетов или полетов в целях удовлетворения собственных потребностей. В связи с этим типичной схемой полетов в районе аэродрома является аэродромный круг полетов (рис. 1).

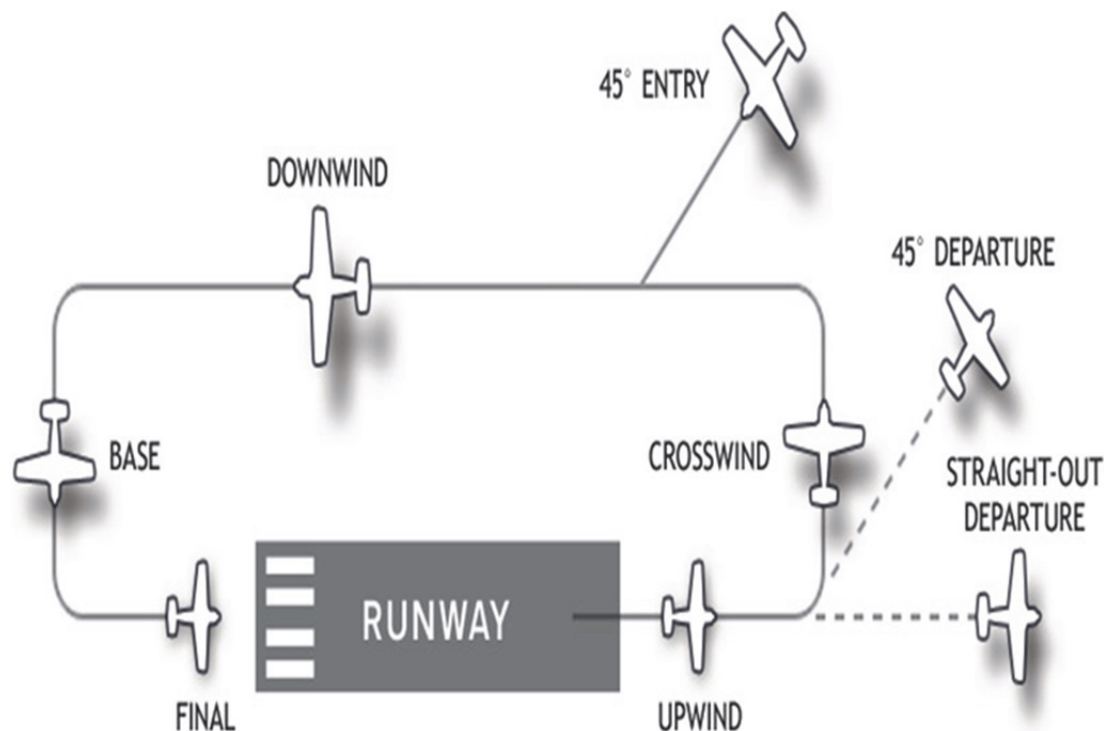


Рис. 1. Схема аэродромного круга полетов на nontowered airport
Fig. 1. Traffic pattern at a non-towered airport

Существует ряд общих правил для полетов в данной зоне. Перед началом полета экипаж обязан ознакомиться с картой полетов вблизи аэродрома, схемами вылета/прилета, а также иметь метеорологическую, навигационную и прочую информацию, необходимую для выполнения полета. Все развороты в районе аэродрома выполняются в левую сторону, при изменении курса взлета/посадки экипажам необходимо убедиться, что все участники полетов перешли на новый круг полетов, дабы избежать подхода к разворотам на встречных курсах. Воздушные суда, заходящие на посадку, имеют преимущество перед находящимися на земле. Одно из основных правил заключается в том, что при визуальных полетах необходимо выдерживать интервал с воздушным судном, сзади которого вы летите, вне зависимости от типа вашего ВС, для предотвращения сокращения интервала на этапе final, кроме этого, необходимо затягивать разворот между downwind и base. Для сокращения риска столкновения и сваливания рекомендуется выполнять развороты с креном менее 30 градусов. Высота полета по кругу зависит от типа ВС. Для одномоторных воздушных судов она составляет 1000 футов, для ВС с двумя и более двигателями 1500 футов.

Рассмотрим основные правила прилета в бесконтрольный аэропорт при визуальных метеорологических условиях. Порядок прилета на аэродром без диспетчерского обслуживания мало отличается от аналогичного захода на аэродром с диспетчерским обслуживанием, но все же имеет ряд отличительных особенностей. Примерно за 15 миль до входа в зону бесконтрольных полетов необходимо настроить вторую станцию радиосвязи на частоту, используемую в районе полетов. За 10 миль необходимо сделать доклад на частоте о расчетном времени входа в зону, точке входа с указанием типа своего воздушного судна. Повторно изучить схему полета в районе аэродрома, а также убедиться, что полет проходит в правильном направлении. Прослу-

шать ATIS аэродрома, если такое имеется. В случае его отсутствия уточнить у других участников движения, какой посадочный курс сейчас используется. В том случае, если экипаж является единственным, кто выполняет полеты в данном районе, то путем анализа направления ветра необходимо выбрать безопасную ВПП для выполнения захода на посадку. Согласно принятым правилам на территории США, вход в аэродромный круг полетов осуществляется на участке downwind с углом примерно 45 градусов, что позволяет иметь хороший обзор всего круга полетов, включая положение других воздушных судов. В исключительных случаях после того, как экипаж убедится, что он единственный, кто выполняет полеты в районе бесконтрольного аэродрома, возможно выполнение захода с прямой; во всех других случаях не рекомендуется выполнять данный заход из-за соображений безопасности полетов. Далее продолжается стандартный полет по аэродромному кругу полетов с докладом в эфир о разворотах. После посадки и освобождения полосы экипаж обязан сделать соответствующий доклад на частоте для информирования других участников полетов.

Далее рассмотрим порядок вылета с аэродрома, на котором отсутствует диспетчерское обслуживание. Первым делом экипаж настраивается на частоту СТАФ. Без доклада в эфир производит запуск ВС и руление до предварительного старта. После этого на общей частоте передает доклад о том, что он готов к взлету. Если на прямой отсутствуют другие ВС, то экипаж занимает исполнительный старт и выполняет взлет. Рекомендуется не задерживаться на исполнительном старте из-за соображений безопасности и сразу выполнять взлет. После взлета продолжать полет по курсу полосы с набором 300 футов, и только после этого начинать разворот с докладом на СТАФ. Далее выполняется полет согласно инструкции по выполнению полетов в данном районе.

Теперь необходимо рассмотреть вариант, когда из-за неблагоприятных погодных условий невозможно выполнять визуальные полеты. В таких случаях крайне редко выполняются учебно-тренировочные полеты. Для регулярных рейсов авиакомпаний, которые имеют возможность выполнять полеты по приборам, существует правило под названием One by one. Его суть заключается в том, что находиться в районе аэродрома может только одно ВС, выполняющее полеты по приборам. Например, при прилете за 20 миль до аэродрома экипаж настраивается на частоту и делает доклад о расчетном времени входа в аэродромный круг полетов. Если в районе аэродрома, кроме него, никого нет, он продолжает процедуру прилета согласно опубликованным схемам. Если же другой экипаж в это время готовится к вылету, то экипаж прилетающего ВС встает в зону ожидания до того момента, как другое ВС не покинет зону неконтролируемого аэродрома.

Также необходимо упомянуть о процедуре светосигнального обеспечения полетов на неконтролируемых аэродромах. Для этого в США была разработана система ARCAL (aircraft radio control of aerodrome lighting), которая позволяет включать необходимые для захода и руления огни посредством передачи информации на частоте аэродрома. В большинстве случаев частота ARCAL совпадает с частотой СТАФ, что облегчает ее использование. Существует два типа данной системы: тип J и тип K. Их отличие заключается в том, что тип J используется для включения огней путем 5-кратного нажатия тангенты в течение 5 секунд, без возможности регулирования интенсивности огней. А режим K в свою очередь позволяет управлять интенсивностью огней в зависимости от количества нажатий в течение 5 секунд. Для отключения огней в обоих случаях используется один и тот же метод путем 3-разового нажатия тангенты.

Опираясь на зарубежный опыт использования неконтролируемых аэродромов, можно сделать вывод, что частичный переход аэродромов РФ на данный вид обслуживания имеет перспективы. Во-первых, это повышает интерес эксплантатов к полетам на такие аэродромы за счет сокращения или полного отсутствия аэронавигационных сборов. Во-вторых, поставщик аэронавигационной информации экономит средства на персонале, обеспечивающем диспетчерское обслуживание. Также основным плюсом является простота перехода на данный тип обслуживания, отсутствие масштабных затрат, за исключением расходов на разработку схем и

правил полетов в районе данного аэродрома. Этот подход к организации полетов требует ряда доработок. Так, например, при переходе на полетно-информационное обслуживание в аэропортах городов Саббета и Талакан многие экипажи сообщали о трудностях, с которыми они столкнулись при выполнении полетов на данные аэродромы. Одной из проблем была сложность с пониманием того, что вся ответственность за выполнение полетов находится на них, так как данный тип обслуживания не характерен для территории РФ. Авиакомпаниям предстоит отредактировать руководящие документы с учетом активного использования нового вида обслуживания, что повлечет за собой дополнительные расходы.

ВЫВОДЫ

Проанализировав положительные и отрицательные стороны обоих вариантов организации воздушного движения на аэродромах с низкой интенсивностью полетов, можно сделать следующие выводы. Система удаленного управления аэродромом имеет хорошие перспективы развития за счет сочетания высокого уровня эргономичности и экономичности в организации воздушного движения. Но соразмерны ли траты на столь дорогостоящие системы с последующими выгодами от перевозки? Если рассматривать аэродромы с низкой интенсивностью полетов, то нет. Более перспективный вариант – это перевод аэродромов на неконтролируемую основу. Опыт использования системы неконтролируемых аэродромов в таких странах, как США, Новая Зеландия и Австралия, говорит о том, что безопасность полетов при отсутствии диспетчерского обслуживания на аэродромах не ухудшается. Масштабное исследование, проведенное в Новой Зеландии, на предмет количества авиационных инцидентов в зависимости от вида предоставляемого обслуживания говорит о 348 инцидентах в районе контролируемых аэродромов против 156 – на неконтролируемых. Отсюда следует, что уровень безопасности полетов остается высоким, и опасаться за отсутствие диспетчерского обслуживания не стоит. Если же рассматривать удаленные аэродромы Севера со средней или высокой интенсивностью полетов, на которых наличие диспетчерского обслуживания необходимо, то внедрение удаленного контроля над аэродромом является лучшим вариантом. При выборе того или иного вида обслуживания воздушного движения на аэродроме возникает проблема, которая заключается в отсутствии нормативной базы в авиационном законодательстве РФ. За основу можно взять критерии, разработанные в Новой Зеландии, с поправкой на местные особенности.

В Новой Зеландии существует три вида аэродромов в зависимости от интенсивности полетов. Первый – это неконтролируемые, или аэродромы без какого-либо обслуживания, где полеты выполняются экипажами по определенным правилам. Второй тип – это комплексные аэродромы, на которых интенсивность полетов значительно выше, чем на аэродромах первого типа, но недостаточна для внедрения диспетчерского обслуживания. На данных аэродромах используется аналог российского полетно-информационного обслуживания. Оно может предоставляться круглосуточно либо по регламенту, ночью, как правило, данные аэродромы также являются бесконтрольными. И третий тип – это аэродромы, на которых предоставляется диспетчерское обслуживание. Рассмотрим, какие критерии используют в Новой Зеландии для определения, какой тип обслуживания необходим на аэродроме. В табл. 1 указано, какой вид обслуживания выбран в соответствии с интенсивностью полетов на аэродроме.

Таблица 1
Table 1

Критерии предоставления различного вида обслуживания
The criteria of different types of service

Вид обслуживания воздушного движения	Критерий обслуживания
Аэродромное пилотно-информационное обслуживание	Неконтролируемые аэродромы. 40000 и более операций или 7500 операций по ППП в течение трех последовательных лет

Продолжение таблицы 1

Аэродромное диспетчерское обслуживание	100000 и более операций в год, или 60000 операций в год, из которых более 9000 по ППП, или 15000 и более операций в год по ППП, или международные пассажирские полеты по ППП, выполняемые по расписанию, в течение трех последовательных лет
Диспетчерское обслуживание подхода	9000 и более операций по ППП в год в течение трех последовательных лет или международные пассажирские полеты по ППП, выполняемые по расписанию
Районное диспетчерское обслуживание	9000 и более операций по ППП в год в течение трех последовательных лет или международные пассажирские полеты по ППП, выполняемые по расписанию

Наличие данных критериев упрощает процедуру определения необходимого вида обслуживания на аэродромах. В соответствии с руководящими документами в области аэронавигационного обслуживания Новой Зеландии любое заинтересованное лицо может подать заявку в уполномоченные органы для оценки эффективности использования того или иного вида обслуживания и возможности его изменения.

Но возможно ли использование данных критериев для аэродромов Российской Федерации, где по статистике за 2015 год только около 15 аэродромов обеспечивают интенсивность полетов в районе 40000 в год? Значит ли это то, что на других аэродромах необходим переход на полетно-информационное обслуживание или переход на неконтролируемые аэродромы? Ответы на эти вопросы можно получить только после более детального анализа результатов исследования по разработке критериев для РФ, который необходимо провести ответственным за организацию воздушного движения органам.

После разработки данных критериев станет понятно, на каких аэродромах внедрение системы удаленного контроля имеет перспективы, а на каких необходимо перейти на неконтролируемое или полетно-информационное обслуживание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beechener J. Remote tower stride ahead. Jane's Airport Review, 2013, № 4, pp. 16–17.
2. Нечаев Е.Е., Лазарев А.И. Диспетчерское обслуживание воздушного движения на дистанционно управляемом аэродроме // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 214. С. 131–136.
3. Приказ Минтранса России от 25.11.2011 № 293 (ред. от 21.07.2016) Об утверждении Федеральных авиационных правил "Организация воздушного движения в Российской Федерации". Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2011 N 22874.
4. Моисеенко И.Н. Приоритетные направления создания и развития систем удаленного наблюдения для КДП аэродрома // Аэрокосмическое обозрение. 2014. № 3. С. 16–19.

5. The Provision of Air Traffic Services at Aerodromes. CAA Policy Government Relations Group. August 2005.

6. **Нечаев Е.Е., Лазарев А.И.** Спутниковая связь в дистанционной системе управления воздушным движением. Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 25–29.

7. **АОРА.** Operations at nontowered airports URL: <https://www.aopa.org/media/files/aopa/home/pilot-resources/asi/safety-advisors/sa08.pdf?la=en> (дата обращения: 17.01.2017).

8. **Зезюля В.В.** Еще раз о полетно-информационном обслуживании. 26 июня 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ato.ru/content/eshche-raz-o-poletno-informacionnom-obsluzhivanii> (дата обращения 19.01.2017).

9. **Vadaszffy K.** From a distance. Air Traffic Technology International Showcase 2015, 2015, № 1, pp. 14–18.

10. Remote tower it is a new era in air traffic control. [Электронный ресурс] URL: <http://saab.com/fi/security/air-traffic-management/air-traffic-management/remote-tower> (дата обращения 23.01.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

ANALYSIS OF AIR TRAFFIC CONTROL MANAGEMENT AT AIRPORTS WITH LOW FLIGHT INTENSITY IN FOREIGN COUNTRIES

Evgenii E. Nechaev¹, Pavel S. Surint²

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

²*Federal State Unitary Enterprise "State ATM Corporation"*

ABSTRACT

This article discusses various options for air traffic management at low flight intensity airports and airports located remotely in the North, where air traffic control service is not necessary.

There are some examples of already implemented concepts in foreign countries: such as remote control tower, which allows to control air traffic, being at a considerable distance from the airport. Such a remote control tower is already put into operation at the Örnköldsvik airport (Sweden). The prospects of this system development in other countries are observed in this article. A remote control tower will also appear in the United States in the nearest future. Also the paper considers the pros and cons of this system and its effect on flight safety.

Moreover, there are given the examples of using non-towered and uncontrolled airports, where air traffic control service is not provided. This kind of airports is partly used in the USA and in New Zealand. The article describes flight procedures in the area of uncontrolled airports, including visual flight rules and instrument flight rules.

We also analyze the possibilities of remote control towers and uncontrolled airports adaptation in the Russian Federation. It is a very important problem for Russia because most airports do not provide more than 10 movements per day. But air traffic control service exists in all airports.

Key words: air traffic control management, non-towered airports, remote control tower.

REFERENCES

1. **Beechener J.** Remote tower stride ahead. *Jane's Airport Review*, 2013, № 4, pp. 16–17.
2. **Nechayev E.E., Lazarev A.I.** *Dispetcherskoe obsluzhivanie vozdushnogo dvizheniya na distansionno upravlyaemom aerodrome* [Air traffic control service at remotely controlled aerodrome]. *The Scientific Bulletin of MSTUCA*, 2015, № 214, pp. 25–29. (in Russian)
3. **Prikaz Mintransa Rossii** [The Order of the Transport Ministry of Russia]. From 25.11.2011 N 293 (ed. from 21.07.2016) *Ob utverzhdenii Federalnykh aviatsionnykh pravil "Organizatsiya vozdushnogo dvizheniya v Rossiyskoy Federatsii"* [On the Approval of Federal Aviation Regulations Air Traffic Organization in the Russian Federation] (Registered in the Ministry of Justice of RF from 30.12.2011 N 22874). (in Russian)
4. **Moiseenko I.N.** *Prioritetnyye napravleniya sozdaniya i razvitiya sistem udalennogo nabljudeniya dlya KDP aerodroma. Aerokosmicheskoe obozrenie*, 2014, № 3, pp. 16–19. (in Russian)
5. The Provision of Air Traffic Services at Aerodromes. CAA Policy Government Relations Group. August 2005.
6. **Nechayev E.E., Lazarev A.I.** *Sputnikovaya svyaz` v distansionnoy sheme upravleniya* [Satellite radio in a remote air traffic control system]. *The Scientific Bulletin of MSTUCA*, 2014, no. 209, pp. 25–29. (in Russian)
7. AOPA. Operations at non-towered airports. Available at: <https://www.aopa.org/-/media/files/aopa/home/pilot-resources/asi/safety-advisors/sa08.pdf?la=en> (accessed: 17.01.2017).
8. **Zezyulya V.V.** *Esche raz o poletno-informatsionnom obsluzhivanii* [Once again about flight-informational service], 2015. Available at <http://www.ato.ru/content/eshche-raz-o-poletno-informatsionnom-obsluzhivanii> (accessed: 19.01.2017). (in Russian)
9. **Vadaszffy K.** From a distance. *Air Traffic Technology International Showcase 2015*, 2015, № 1, pp. 14–18.
10. Remote tower it is a new era in air traffic control. Available at: <http://saab.com/fi/security/air-traffic-management/air-traffic-management/remote-tower> (accessed: 23.01.2017).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenii E. Nechaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Air Traffic Control Department of Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA), eenetchaev@mail.ru.

Pavel S. Surint, PhD student of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Air Traffic Controller, pavelsurint@gmail.com.

Поступила в редакцию 22.02.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 22.02.2017
Accepted for publication 25.05.2017

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРИАДНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.С. МАРЮХНЕНКО¹, В.В. ЕРОХИН²

¹*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия*

²*Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации, г. Иркутск, Россия*

В связи с возрастающей сложностью навигационного обеспечения воздушных судов (ВС), с ростом требований, предъявляемых к ним, всё более необходимой является разработка систем комплексной обработки навигационной информации путем решения задач синтеза на основе методов оптимальной фильтрации. Одним из перспективных направлений совершенствования навигационного обеспечения ВС является создание интегрированных систем навигации (ИСН). В работе предложена триадная структура перспективной интегрированной системы навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий. Объединение навигационных измерителей в рамках реализации триадной концепции позволяет гибко использовать различные алгоритмы обработки навигационной информации и оптимизации траекторий движения на различных этапах полета. Синтезирован на основе методов теории оптимальной фильтрации алгоритм комплексной обработки навигационной информации, представляющий собой расширенный фильтр Калмана. Отличительная особенность алгоритма заключается в том, что переменными вектора состояния, подлежащими оценке, являются ошибки определения соответствующих навигационно-временных параметров. Априорная информация о динамике погрешностей известна более достоверно, чем информация о параметрах движения ВС. Показано, что применение предлагаемой системы навигации в качестве навигационного средства для решения задач высокоточного определения местоположения ВС удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности навигационно-временных определений. Выполнено имитационное статистическое моделирование алгоритма оптимальной фильтрации триадной интегрированной системы, приведены точностные характеристики подсистем для различных конфигураций рабочего созвездия. Анализ результатов исследования точностных характеристик ИСН в различных условиях функционирования показал, что точность определения координат в навигационном вычислителе находится на уровне современных приемников спутниковой навигации.

Ключевые слова: синтез, триада, интегрированная система навигации, оптимальное оценивание, фильтр Калмана.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное исследование вопросов навигационно-временного обеспечения показало, что одним из перспективных подходов к решению проблемы повышения точности навигационных определений является разработка интегрированных систем навигации (ИСН) на основе инерциальных и спутниковых технологий. При объединении навигационных измерителей предлагается использовать триадный принцип организации ИСН воздушного судна (ВС) [1]. Объединение навигационных измерителей в рамках реализации этой концепции позволяет гибко использовать различные алгоритмы обработки навигационной информации и оптимизации траекторий движения [2, 3].

Цель статьи: решение актуальной научной задачи повышения точности навигационных определений путем комплексной обработки навигационной информации в триадной интегрированной системе навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий.

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ИСН НА ОСНОВЕ ТРИАДНОГО ПРИНЦИПА

Перспективным направлением реализации триадного принципа комплексирования навигационных измерителей является объединение в составе ИСН (рис. 1) бортового оборудования (БО) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), транспондера системы автоматического

зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В) и бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), вертикальный канал которой демпфирован баровысотомером (БВ).

Изложенная в [2, 4, 5] постановка задачи синтеза комплексной обработки информации (КОИ) с использованием всей совокупности доступных наблюдений предполагает использование стандартного аппарата теории оптимальной фильтрации. Методы Калмановской фильтрации, активно используемые при построении современных интегрированных навигационных систем различных типов, основанных на использовании инерциальных и спутниковых технологий и их комбинаций, показывают высокую эффективность [2–7].

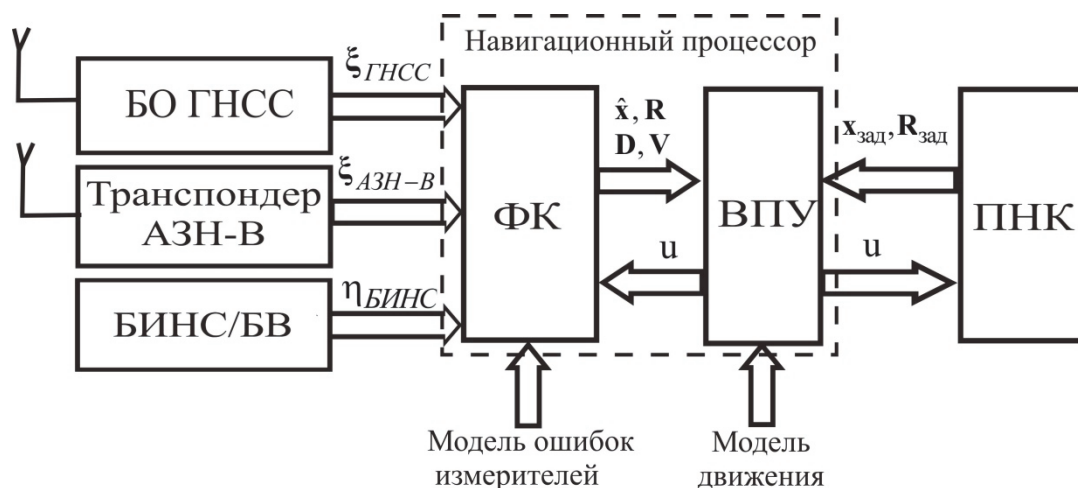


Рис. 1. Архитектура перспективной ИСН:

ФК – фильтр Калмана, реализующий алгоритм КОИ;

ВПУ – вычислитель параметров управления; ПНК – пилотажно-навигационный комплекс

Fig. 1. Perspective ISN architecture: FK – Kalman filter, implementing the CIP algorithm;

CCP – computer control parameters; FCNS – flight control and navigation system

На практике широкое распространение получили линейные методы обработки навигационной информации, которые требуют соответствующей линеаризации как навигационных измерений, так и моделей погрешностей измерителей, входящих в состав ИСН. Измерения, формируемые в ИСН, имеют вид [2–6]

$$\mathbf{z}(t) = \Delta \mathbf{D}(t) = \mathbf{D}_u(t) - \mathbf{D}_p(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{z}(t)$ – вектор разностных измерений; $\mathbf{D}_u(t), \mathbf{D}_p(t)$ – измеренное и расчетное значения вектора первичных навигационных параметров (псевдодальности и радиальной псевдоскорости в ГНСС и АЗН-В), которые могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_u(t) &= F(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{n}(t), \\ \mathbf{D}_p(t) &= F(\tilde{\mathbf{x}}(t), t) = F(\mathbf{x}(t) + \Delta \mathbf{x}(t), t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – вектор навигационных параметров (координаты местоположения и составляющие скорости), приборное значение $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ которого вырабатывается в БИНС с погрешностью $\Delta \mathbf{x}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)$; $F(\mathbf{x}(t), t)$ – известная и в общем случае нелинейная функция навигационных параметров объекта и времени; $\mathbf{n}(t)$ – вектор погрешностей измерения на этапе первичной обработки навигационной информации (погрешностей ГНСС и АЗН-В).

Введем функцию $\mathbf{H}[\Delta\mathbf{x}(t), t] = F(\tilde{\mathbf{x}}(t) - \Delta\mathbf{x}(t), t) - F(\tilde{\mathbf{x}}(t), t)$, которая также является в общем случае нелинейной функцией навигационных параметров. Тогда измерения (1) можно представить в виде

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}[\Delta\mathbf{x}(t), t] + \mathbf{n}(t). \quad (3)$$

В предположении, что погрешности $\Delta\mathbf{x}(t)$ малы, возможна линеаризация функции $\mathbf{H}[\Delta\mathbf{x}(t), t]$ в окрестности точки $\mathbf{x}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t)$, т. е.

$$\mathbf{H}[\Delta\mathbf{x}(t), t] \cong F(\mathbf{x}(t), t) \Big|_{\mathbf{x}=\tilde{\mathbf{x}}} - \frac{\partial F(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\tilde{\mathbf{x}}} \Delta\mathbf{x}(t) - F(\tilde{\mathbf{x}}(t), t) \cong - \frac{\partial F(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\tilde{\mathbf{x}}} \Delta\mathbf{x}(t). \quad (4)$$

В этом случае измерения (3) могут быть представлены в виде [2, 5, 7]

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (5)$$

$$\text{где } \mathbf{H}(t) = - \frac{\partial F(\mathbf{x}(t), t)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\tilde{\mathbf{x}}=\tilde{\mathbf{x}}} = \frac{\partial \mathbf{H}(\Delta\mathbf{x}(t), t)}{\partial (\Delta\mathbf{x})} \Big|_{\Delta\mathbf{x}=0}.$$

Для обработки линеаризованных измерений (5) в навигационном процессоре ИСН необходимо знание математической модели, описывающей поведение вектора $\Delta\mathbf{x}(t)$ погрешностей навигационных измерителей. Как правило, такую модель получают из так называемых алгоритмов «идеальной работы» [2]. В настоящее время для комплексной обработки информации в навигационных системах широко применяются различные модификации фильтров Калмана (ФК). Вектор состояния системы может включать как погрешности выработки выходных данных навигационных измерителей, так и оцениваемые составляющие инструментальных погрешностей измерителей [2, 5, 7]. При использовании ФК модели погрешностей системы и измерений можно представить в виде системы разностных уравнений.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k, \end{aligned}$$

где $\mathbf{x}_k$ – вектор состояния; $\Phi_k(\mathbf{x}_{k-1})$ – функция динамики системы; $\mathbf{B}_k$ – матрица управляющих воздействий; $\mathbf{G}_k$ – матрица ограничений на шумы системы; $\mathbf{u}_{k-1}$ – вектор управления; $\mathbf{w}_k$ – вектор гауссовских шумов; $\mathbf{z}_k$ – вектор измерений (наблюдений) системы; $\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_k)$ – функция измерений (наблюдений) системы; $\mathbf{n}_k$ – вектор гауссовских шумов измерений (наблюдений).

В настоящее время в задачах навигации при гауссовском характере шумов $\mathbf{w}_k$ системы и $\mathbf{n}_k$ измерений широкое распространение получили алгоритмы расширенного (обобщенного) фильтра Калмана, основанные на гауссовской аппроксимации апостериорной плотности при разложении в ряд Тейлора функций динамики $\Phi_k(\mathbf{x}_{k-1})$ и измерений $\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_k)$ [2, 5, 7].

В алгоритмах используется линеаризованное представление функций $\Phi_k(\mathbf{x}_{k-1})$ и $\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_k)$, которое может быть записано в виде [2, 6, 7]

$$\Phi_k(\mathbf{x}_{k-1}) \cong \Phi_k(\mathbf{x}_{л1}) + \frac{\partial \Phi_k(\mathbf{x}_{л1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T} (\mathbf{x}_{k-1} - \mathbf{x}_{л1}),$$

$$\mathbf{H}_k(\mathbf{x}_k) \cong \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_{л2}) + \frac{\partial \mathbf{H}_k(\mathbf{x}_{л2})}{\partial \mathbf{x}_k^T} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{л2}),$$

где $\mathbf{x}_{л1}$, $\mathbf{x}_{л2}$ – точки линеаризации.

В навигационных приложениях и задачах траекторного слежения нелинейности связаны с нелинейностью функции в модели измерений. В частности, модель наблюдений в ИСН представляет собой измерение псевдодальностей до навигационных опорных точек (НОТ)

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{s}(t_k, \mathbf{x}_{НОТ,k}, \mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k = \mathbf{D}_k + c\mathbf{T}_k + \mathbf{n}_{\xi k}, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}_{НОТj} = [x_j, y_j, z_j]^T$, $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ – вектора координат j -й НОТ и ВС;
 $D_v = [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2]^{1/2}$ – дальность; $c\mathbf{T}_k$ – смещение шкалы времени ВС относительно системного; $\mathbf{n}_{\xi}$ – m -мерный вектор шума наблюдения, принимаемый дискретным БГШ (ДБГШ) с нулевыми математическими ожиданиями матрицей дисперсий $\mathbf{V}$.

Для ИСН модель сигнала на выходе определяется выражением

$$\boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x}_k,$$

где $\mathbf{x} = [\mathbf{X}^T, \mathbf{V}^T, \mathbf{a}^T]^T$ – вектор навигационно-временных параметров (НВП),

$\mathbf{X} = [X, Y, Z, \tau]^T$ – координаты и значение смещения шкалы времени (ШВ),

$\mathbf{V} = [X, Y, Z, \tau]^T$ – вектор скоростей и скорость смещения ШВ, $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ – вектор ускорений; $\Delta \mathbf{x}$ – вектор погрешностей определения соответствующих НВП.

При синтезе алгоритма считаем, что используется единая ШВ, при этом необходимо, чтобы объекты АЗН-В производили синхронизацию своих часов по сигналам навигационных спутников (НС) ГНСС [8–11].

Если в качестве точек линеаризации используются оценки $\Delta \mathbf{x}_{л1} = \Delta \hat{\mathbf{x}}_{k-1}$, $\Delta \mathbf{x}_{л2} = \Delta \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$, то такой алгоритм нелинейной фильтрации принято называть расширенным (обобщенным) ФК. Алгоритм оценивания вектора состояния в этом случае имеет вид [2, 5, 7]

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \Phi_k(\Delta \mathbf{x}_{л1}) + \frac{\partial \Phi_k(\Delta \mathbf{x}_{л1})}{\partial \Delta \mathbf{x}_{k-1}^T} (\Delta \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - \Delta \mathbf{x}_{л1}),$$

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_k = \Delta \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k(\Delta \mathbf{x}_{л1}, \Delta \mathbf{x}_{л2}) [\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k(\Delta \mathbf{x}_{л2}) - \frac{\partial \mathbf{H}_k(\Delta \mathbf{x}_{л2})}{\partial \Delta \mathbf{x}_k^T} (\Delta \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} - \Delta \mathbf{x}_{л2})],$$

где матрицы ковариаций $\mathbf{P}_{k/k-1}(\Delta \mathbf{x}_{л1})$, $\mathbf{P}_k(\Delta \mathbf{x}_{л1}, \Delta \mathbf{x}_{л2})$ и матричный коэффициент усиления $\mathbf{K}_k(\Delta \mathbf{x}_{л1}, \Delta \mathbf{x}_{л2})$ будут определяться согласно выражениям ФК для линейного оценивания [2, 5, 7], т. е.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k/k-1} &= \Phi_k \mathbf{P}_{k-1} \Phi_k^T + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_k^T, \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{V}_k]^{-1}, \\ \mathbf{P}_k &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k/k-1}. \end{aligned}$$

в которых $\Phi_k = \frac{\partial \Phi_k(\Delta \mathbf{x}_{л1})}{\partial \Delta \mathbf{x}_{k-1}^T}$, а $\mathbf{H}_k = \frac{\partial \mathbf{H}_k(\Delta \mathbf{x}_{л2})}{\partial \Delta \mathbf{x}_k^T}$.

Отличительная особенность предлагаемого алгоритма заключается в том, что переменными вектора состояния, подлежащими оценке, являются ошибки определения соответствующих навигационно-временных параметров. Априорная информация о динамике погрешностей известна более достоверно, чем информация о параметрах движения ВС.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНТЕЗИРОВАННОГО АЛГОРИТМА

Подсистема БИНС/ГНСС. Методами имитационного статистического моделирования были получены точностные характеристики синтезированного алгоритма навигационно-временных определений (НВО) в подсистеме БИНС/ГНСС и проведен их анализ. Известно, что в штатных условиях функционирования ГНСС качество определения НВП ВС позволяет удовлетворить предъявляемые к точности НВО. Однако в реальных условиях функционирования ГНСС в зоне видимости потребителя не всегда будет находиться количество НС, достаточное для решения навигационных задач, что значительно снижает качество навигационных определений, либо ввиду воздействия помех мощность сигнала будет ниже порогового уровня, необходимого для уверенного приема и обработки навигационной информации. Поэтому актуальной является задача исследований точностных характеристик алгоритма в условиях, когда в зоне видимости находится менее четырех НС. Результаты исследования точностных характеристик подсистемы БИНС/ГНСС при различных конфигурациях рабочего созвездия НС показаны на рис. 2–3.

Проведенные исследования показали, что при работе по полному рабочему созвездию из четырех НС погрешность определения местоположения (МП) (2σ) подсистемой БИНС/ГНСС 7–8 м (рис. 2). В случае когда в зоне видимости находятся три НС, погрешность возрастает и составляет 30–60 м (рис. 3), при этом инерциальная поддержка позволяет экстраполировать значения НВП при отсутствии сигналов НС. При наличии на входе комплексного алгоритма сигналов от двух НС погрешность МП увеличивается и на длительных интервалах времени определяется точностью БИНС и величиной смещения ШВ бортового эталона времени и частоты (БЭВЧ).

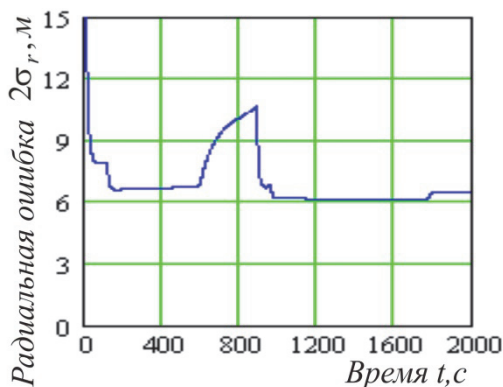


Рис. 2. Ошибка оценки координаты X в подсистеме БИНС/ГНСС при 3 НС
Fig. 2. Error of estimating the coordinate X in the subsystem of BINS / GNSS at 3 NS

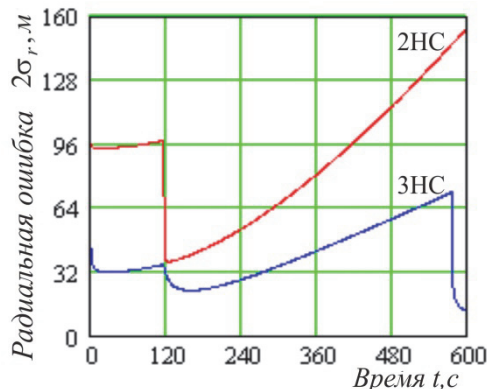


Рис. 3. Радиальная ошибка в подсистеме БИНС/ГНСС при 3 и 2 НС
Fig. 3. Radial error in the subsystem of BINS / GNSS at 3 and 2 NS

Таким образом, из полученных для подсистемы БИНС/ГНСС результатов исследований следует, что потеря сигналов двух или трех спутников приводит к значительному снижению точности определения НВП подсистемой БИНС/ГНСС и определяется характеристиками БИНС и БЭВЧ. Для поддержания достаточно высокой точности НВО подсистемы БИНС/ГНСС целесообразно ее объединение с системами, НОТ которых позволят частично компенсировать потерю сигналов спутников рабочего созвездия. Одной из таких систем является система АЗН-В, предназначенная для обмена данными и измерения взаимных дальностей между ВС и наземными станциями.

Подсистема БИНС/АЗН-В. Для исследования характеристик подсистемы БИНС/АЗН-В моделировалась ситуация, при которой производится вторичная комплексная обработка информации (КОИ) на основе данных БИНС и четырех НОТ. При этом оценка МП объекта основывается на измерениях псевдодальностей и обмене данными об их геодезических координатах [8–11]. Полученные для данной ситуации точностные характеристики определения НВП представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показывает, что при реализации оптимальной КОИ на основе данных БИНС и АЗН-В возможно повышение точности определения МП. Для удовлетворения требований по точности определения НВП необходимо использовать в навигационном вычислителе всю совокупность информации от геодезических, достаточно точно привязанных НОТ. Результаты исследований точностных характеристик показали, что комплексирование АЗН-В, ГНСС и БИНС в составе ИСН, а также обработка всей доступной информации от данных подсистем позволит, компенсируя недостатки одной системы достоинствами другой, повысить точность определения НВП. В частности, на рис. 5 представлены характеристики точности оценки МП по данным ИСН для конфигурации и состава рабочего созвездия НС и НОТ АЗН-В. В процессе исследований полагалось, что объект производит измерения дальностей до двух НС ГНСС и двух НОТ АЗН-В с точно известными координатами.

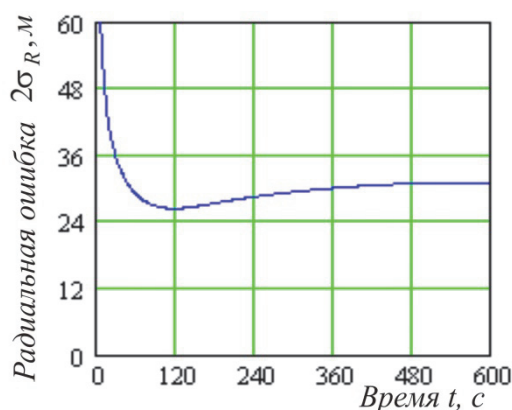


Рис. 4. Ошибка оценки координаты X в ИСН
Fig. 4. Error of estimating the X coordinate in the ISN

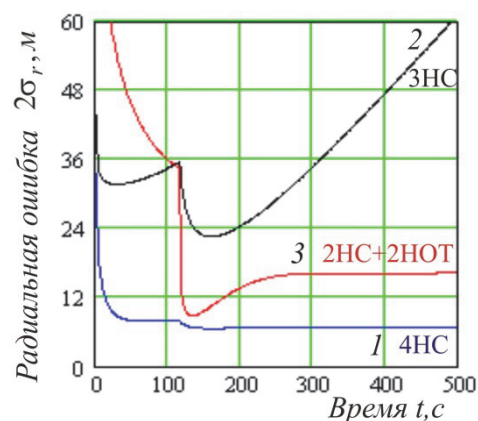


Рис. 5. Радиальная ошибка в ИСН
Fig. 5. Radial error in ISN

На графиках видно, что при использовании псевдодальностей до двух НОТ АЗН-В в алгоритме погрешность определения МП снижается с 36 до 16 м. Анализ результатов исследований показывает, что использование измерений псевдодальностей до спутников и наземных станций АЗН-В позволяет повысить точность НВО. Потеря сигналов одного или нескольких спутников может существенно ухудшить точность функционирования аппаратуры ГНСС, в то время как объекты АЗН-В создают избыточность псевдодальномерных наблюдений. В моделируемой ситуации при наличии сигналов только двух спутников применение двух псевдодальномерных измерений АЗН-В позволило снизить радиальную ошибку практически в 2 раза.

Таким образом, результаты исследований показывают, что совместное применение ГНСС и системы АЗН-В позволяет значительно повысить точность определения МП по сравнению с точностью систем счисления. Анализ приведенных зависимостей и характеристик, полученных методом имитационного статистического моделирования, позволяет сделать вывод о возможности использования интеграции ГНСС и АЗН-В с инерциальной поддержкой в качестве средства для решения задач высокоточного определения МП ВС (радиальная ошибка составляет 16–18 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов имитационного статистического моделирования ИСН в различных условиях функционирования показал, что, благодаря оптимальной комплексной обработке навигационной информации, точность определения координат ВС достигается не хуже точности современных приемников спутниковой навигации в благоприятных условиях и составляет (16–18) м. Тем самым подтверждена целесообразность триадной структуры ИСН на основе инерциальных и спутниковых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марюхненко В.С.** Информационный анализ и структурный синтез навигационного обеспечения управляемых транспортных средств: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01: защищена 24.06.2010 г. [Место защиты: Иркут. гос. ун-т путей сообщения]. Иркутск, 2010. 348 с.
2. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Г.И. Емельянцева, А.П. Степанов; под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
3. **Алёшечкин А.М., Ерохин В.В.** Оптимизация траекторий динамических управляемых объектов в интегрированной системе навигации на основе инерциальных и спутниковых технологий // Гирроскопия и навигация. 2016. № 2 (93). С. 3–19.
4. **Нагин И.А.** Комплексный инерциально-спутниковый алгоритм вторичной обработки на основе метода «unscented» фильтрации // Радиотехника. 2013. № 5. С. 17–22.
5. **Capua R., Bottaro A.** Implementation of the Unscented Kalman Filter and a Simple Augmentation System for GNSS SDR Receivers, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, September 2012, pp. 2398–2407.
6. **ГЛОНАСС.** Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
7. **Grewall M., Weill L.R., Andrews A.P.** (2013) Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. N.Y.: John Wiley & Sons. Third Edition, 608 pp.
8. **Chen Y-H., Lo S., Akos D.M., Wong G., Enge P.A.** (2013) Testbed for Studying Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Based Range and Positioning Performance to Support Alternative Position Navigation and Timing (APNT). Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN: 09-2013, pp. 263–273.
9. **Cho T., Lee C., Choi S.** (2013) Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy. Sensors 2013, 13, 4122–4137; doi:10.3390/s130404122.
10. **Doukas D., Berends J., Rees M., Kerkhofs G.** (2009): CNS/ATM Ground Station and Service Status Reports; SUR.ET1.ST05.2000-STD-16-01; European Air Traffic Management: Brussels, Belgium.
11. **Шестаков И.Н., Крыжановский Г.А.** Расширение поля СРНС с помощью наземных станций АЗН-В // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210. С. 114–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Марюхненко Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи Иркутского государственного университета путей сообщения, Viktor.maryukhnenko@yandex.ru.

Ерохин Вячеслав Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования ИФ МГТУ ГА, Ww_erohin@mail.ru.

STRUCTURAL SYNTHESIS OF NAVIGATION SUPPORT OF TRIAD INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM ON THE BASIS OF INERTIAL AND SATELLITE TECHNOLOGIES

Viktor S. Maryukhnenko¹, Vyacheslav V. Erokhin²

¹ *Irkutsk State University of Railway Transport (IrGUPS), Irkutsk, Russia*

² *Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation (IB MSTU CA), Irkutsk, Russia*

ABSTRACT

In connection with the increasing complexity of aircraft navigation support, with growing demands placed on them, it is increasingly necessary to develop integrated navigation data processing system by solving synthesis problems based on optimal filtering methods. One of the promising ways to improve aircraft navigation support is to create an integrated navigation system (INS). In this work the triadic structure of a promising integrated navigation system based on inertial and satellite technologies is proposed. Combining nautical meters as part of the triad concept allows the flexible use of various navigation data processing algorithms and trajectory optimization ones at different stages of flight. Based on optimal filtering theory methods the integrated navigation data processing algorithm, which is an extended Kalman filter, is synthesized. A distinctive feature of the algorithm is that the variables of the state vector which are to be measured, are the errors in the determination of appropriate navigation and timing parameters. Prior information about the dynamics of errors is more reliably known than the one about aircraft motion variables. It is shown that the use of the proposed navigation system as a navigation aid for problem solving of highly accurate aircraft position indication satisfies the requirements for navigation and timing data accuracy. The imitating statistical modeling of optimal filtering algorithm of the triad integrated system is carried out. The accuracy characteristics of subsystems for different operating configurations of the constellation are given. Analysis of the results of the accuracy characteristics study of INS in various operating conditions has showed that the positioning accuracy in the navigation computer is up to date satellite navigation receivers.

Key words: synthesis, triad, integrated navigation system, optimal estimation, Kalman filter.

REFERENCES

1. **Maryukhnenko V.S.** *Informatsionnyy analiz i strukturnyy sintez navigatsionnogo obespecheniya upravlyayemykh transportnykh sredstv* [Information Analysis and Structural Synthesis of Navigation Provision of Managed Vehicles]. Dis. Doct. Tech. Sciences: 05.13.01: defensively on 24.06.2010 [Place of protection: Irkut. State. Un-t ways of communication]. Irkutsk, 2010, 348 p. (in Russian)
2. **Emelyantsev G.I., Stepanov A.P.** *Integrirrovannyye inertialno-sputnikovyye sistemy orientatsii i navigatsii* [Integrated inertial-satellite systems of orientation and navigation]. Under the general ed. Academician of the Russian Academy of Sciences V.G. Peshekhonov. SPb., SSC RF JSC Concern CSRI Elektropribor, 2016, 394 p. (in Russian)
3. **Alyoshechkin A.M., Erokhin V.V.** *Optimizatsiya trayektoriy dinamicheskikh upravlyayemykh obyekтов v integrirrovannoy sisteme navigatsii na osnove inertial'nykh i sputnikovykh tekhnologiy* [Optimization of trajectories of dynamic controlled objects in the integrated navigation

system based on inertial and satellite technologies]. Gyroscopy and Navigation, 2016, N 2 (93), pp. 3–19. (in Russian)

4. **Nagin I.A.** *Kompleksnyiy inertialno-sputnikovyy algoritm vtorichnoy obrabotki na osnove metoda «unscented» fil'tratsii* [Integrated inertial-satellite algorithm for secondary processing based on the "unscented" filtering method]. Radiotekhnika, 2013, no. 5, pp. 17–22. (in Russian)

5. **Capua R., Bottaro A.** Implementation of the Unscented Kalman Filter and a Simple Augmentation System for GNSS SDR Receivers, Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, September 2012, pp. 2398–2407.

6. **Perov A.I., Harisov V.N.** *GLONASS. Printsipyi postroyeniya i funktsionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. ed. 4th, revised. and additional. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 800 p. (in Russian)

7. **Grewall M., Weill L.R., Andrews A.P.** (2013) Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. N.Y.: John Wiley & Sons. Third Edition, 608 p.

8. **Chen Y-H., Lo S., Akos D.M., Wong G., Enge P.A.** (2013) Testbed for Studying Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Based Range and Positioning Performance to Support Alternative Position Navigation and Timing (APNT). Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN: 09-2013, pp. 263–273.

9. **Cho T., Lee C., Choi S.** (2013) Multi-Sensor Fusion with Interacting Multiple Model Filter for Improved Aircraft Position Accuracy. Sensors 2013, 13, 4122–4137; doi:10.3390/s130404122.

10. **Doukas D., Berends J., Rees M., Kerkhofs G.** (2009): CNS/ATM Ground Station and Service Status Reports; SUR.ET1.ST05.2000-STD-16-01; European Air Traffic Management: Brussels, Belgium.

11. **Shestakov I.N., Kryzhanovskiy G.A.** *Rasshireniye polya SRNS s pomoshchyu nazemnykh stantsiy AZN-V* [Expansion of the SRNS field by means of ground stations ADS-B]. Scientific Bulletin of MSTU CA, 2014, no. 210, pp. 114–117. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor S. Maryukhnenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Automation, Telemechanics and Communication Chair of Irkutsk State University of Communications, Viktor.maryukhnenko@yandex.ru.

Vyacheslav V. Erokhin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Avionics Chair of IB MSTU CA, ww_erohin@mail.ru.

Поступила в редакцию 22.03.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 22.03.2017
Accepted for publication 25.05.2017

СОВМЕСТНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ПОТОКАХ ПРИЛЕТА И ВЫЛЕТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.В. ЛУГОВАЯ¹, А.Е. КОНОВАЛОВ²

¹АО «Международный аэропорт Шереметьево», г. Москва, Россия

²МАДЦ филиала «МЦ АУВД» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», г. Москва, Россия

Эффективность работы аэродрома зависит от способности органов ОВД организовать подход, прибытие и вылет воздушных судов для обеспечения требуемой пропускной способности воздушного пространства в районе аэродрома. В настоящее время на большинстве аэродромов авиадиспетчер организует вылет или прилет воздушных судов. Кроме этого существуют проблемы планирования прилета/вылета.

В статье описывается общее решение регулирования потоков прилета и вылета воздушных судов путем внедрения новых технологий автоматизации процессов текущего планирования и совместного принятия решений (AMAN, DMAN, CDM, A-CDM).

Предложено конкретное решение, которое способно объединять интересы партнеров (операторов аэропорта, эксплуатантов воздушных судов, агентов по наземному обслуживанию и службы организации воздушного движения (ОВД)) в совместной работе, создать основы эффективного принятия решений, благодаря более точной и своевременной информации, дающей всем партнерам в аэропорту единую оперативную картину воздушного движения.

Менеджер прибытия (AMAN) предназначен для автоматизированной поддержки авиадиспетчеров по обработке трафика прибывающих в аэропорт воздушных судов, непрерывного расчета времени и последовательности прибытия. Информация AMAN может быть составной частью информационной среды процесса совместного принятия решений в аэропорту (A-CDM) для всех заинтересованных сторон.

Ключевые слова: AMAN – менеджер прибытия, DMAN – менеджер отправления, CDM – совместное принятие решений, A-CDM – совместное принятие решений в аэропорту, ОПВД – организация потоков воздушного движения.

ВВЕДЕНИЕ

Пропускная способность взлетно-посадочной полосы (ВПП) загруженных аэродромов в значительной степени зависит от способности органов ОВД на этих аэродромах, предоставляющих обслуживание подхода, прилета и вылета, обеспечить требуемую пропускную способность воздушного пространства аэроузла или района аэродрома.

Диспетчер воздушного движения на основе местных схем и своего опыта упорядочивает вылеты или прилеты в реальном режиме времени. Это, как правило, ведет к принятию недостаточно оптимальных решений в достигнутой очередности и эффективности полетов, в частности в плане продолжительности руления и нахождения на земле в ожидании вылета или в воздухе в ожидании разрешения на посадку.

Как показывает опыт ОВД на загруженных аэродромах Европы, решение этой задачи успешно осуществляется внедрением новых технологий автоматизации процессов текущего планирования и совместного принятия решений (AMAN, DMAN, CDM, A-CDM) [1–5, 7–10].

МЕНЕДЖЕР ПРИБЫТИЯ (AMAN)

Управление прибытием (Arrival Management) – общий термин, который означает процесс эффективного упорядочивания прибывающих воздушных судов и формирования сглаженного потока для посадки в аэропорту назначения. Наиболее эффективно управление прибытием может выполняться с применением автоматизированных средств или систем, называемых Менеджер прибытия (Arrival Manager – AMAN) [4–6].

AMAN – система, предназначенная в помощь диспетчерам УВД, для обеспечения автоматизированной последовательности прибывающего движения в определенном воздушном пространстве, непрерывного последовательного расчета времени прибытия, принимая во внимание необходимый интервал для рейсов, прибывающих на ВПП.

Задача системы AMAN – планирование бесконфликтного движения сливающихся потоков воздушных судов (ВС) в районе аэродрома и дальнейшей помощи диспетчеру в управлении движением.

Система AMAN предназначена для того, чтобы помочь в регулировании потока движения при входе в зону подхода или в воздушное пространство. В тех случаях, когда рекомендации AMAN представляются и реализуются в секторах районного диспетчерского центра (РДЦ), результатом можно ожидать упорядоченный и отрегулированный поток прибытия в зону подхода аэродрома.

Главная цель состоит в том, чтобы оптимизировать пропускную способность ВПП на прилет (установив очередность, упорядочив поток) и регулировать/управлять движением (установив интервалы) потока воздушных судов, входящих в воздушное пространство района аэродрома.

Система осуществляет поддержку принятия решений в регулировании очередности. При вхождении в данный сектор менеджер прибытия сразу делает перерасчет по ВС, следующим в одну точку слияния (кто первый, второй, третий и далее с учетом аэропорта прибытия). В зависимости от этого программа работает так, чтобы для каждой точки каждого аэропорта могли задаваться диапазоны эшелонов, что будет являться результатом для расчета рекомендаций (оптимальные эшелоны, условная бесконфликтность профилей полета).

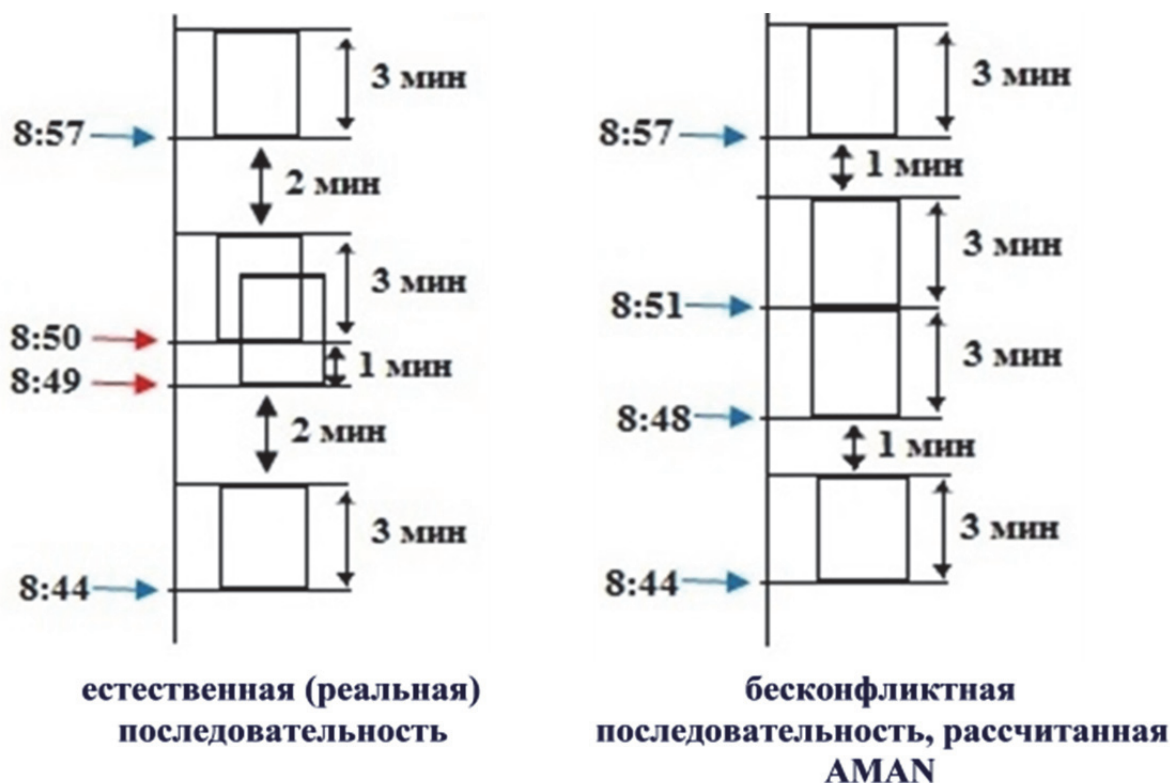


Рис. 1. Пример реальной последовательности и последовательности, рассчитанной AMAN
Fig. 1. The example of a real sequence and the sequence designed with AMAN

Порядок установления очередности прибытия. При входе прибывающего полета в зону обслуживания система AMAN должна осуществить планирование его расположения в очередности прибытий (секция обычной очередности) (рис. 1).

Очередность автоматически пересчитывается в следующих случаях.

- Изменились правила или частота прибытий на ВПП или вылета (пропускная способность).
- Полет вручную поставлен (введен) в очередность (ввод на рабочем месте диспетчера).
- Полет удален из очередности (ввод на рабочем месте диспетчера).
- В очередности вручную изменено расположение полета (ввод на рабочем месте диспетчера).
- Вручную был создан и вставлен слот.
- Из мониторинга определено, что часть общего пути внесена слишком рано или слишком поздно или из рассчитанных траекторий (диапазон режимов полета), что ВС не может выполнить запланированное ему время посадки.
- Введен или модифицирован слот.
- Отменен слот.
- ВС изменило свой маршрут или ВПП.
- Изменился приоритет полета.
- Истекло расчетное время вылета (СТОТ) для полета с «коротким» маршрутом.
- Фактическое время вылета (АТОТ) полета с «коротким» маршрутом значительно отличается от его расчетного времени вылета СТОТ.

Разрешение автоматического изменения очередности может быть настроено (разрешено/запрещено в зависимости от приоритета полета и секции очередности) для отдельных случаев.

Обмен информацией AMAN в процессе ОВД. Как показал анализ международной практики, системы управления прибытием могут применяться совместно с некоторыми другими методами и процедурами ОВД, вовлеченными в процессы обслуживания прибывающих ВС в аэропорту.

При решении задач управления прибытием следует обеспечить обмен данными ОВД, выработанными AMAN, между системами ее пользователей. Сгенерированные AMAN рекомендации и консультативная информация могут быть переданы не только диспетчерам комплекса средств автоматизации (КСА) управления воздушным движением (УВД) аэропорта прилета, но и другим пользователям этой информации, расположенным в секторах органов ОВД выше и ниже по потоку прибытия.

Это можно обеспечить:

- путем отображения экрана диспетчера-координатора AMAN (в виде шкалы времени) на других рабочих местах диспетчеров; изображение можно вынести на ситуационный дисплей (ИВО) диспетчера или на отдельный экран AMAN или дисплей;
- путем отображения рекомендаций в формуляре сопровождения воздушного судна для отдельного полета;
- через текстовое сообщение, суммирующее консультативную информацию для сектора.

Один из методов автоматизированной передачи «информации управления прибытием» от системы к системе может быть осуществлен посредством сообщения о координации AMAN в соседние сектора (сообщение OLDI). В зависимости от условий двухсторонних соглашений между РДЦ эти сообщения AMAN могут содержать следующие поля данных AMAN:

- контрольную точку регулирования потока (MF) и время пролета этой точки;
- общее время TTL для погашения задержки или TTG для компенсации отставания;
- время прибытия в точку координации (COP);
- заданную скорость;
- маршрут.

МЕНЕДЖЕР ОТПРАВЛЕНИЯ (DMAN)

Менеджер отправления является наземным инструментом планирования. Он помогает диспетчерам в аэропорту в управлении вылетающими ВС, обеспечивая взлет по расписанию, а также оптимизированные и бесконфликтные траектории набора высоты для оптимального использования потенциала взлетно-посадочной полосы и аэродромного диспетчерского района.

Как только план полета поступает в систему, для каждого отправления Менеджер отправления выделяет взлетно-посадочную полосу и вычисляет время запланированного взлета. Очередь вылетающих ВС регулярно обновляется.

Для создания оптимизированной последовательности вылетающих ВС Менеджер отправления учитывает множество факторов, например, такие как:

- ограничения наземного движения;
- ограничения использования взлетно-посадочных полос;
- ограничения организации дорожного движения в аэродромном диспетчерском районе.

Менеджер отправления был разработан, чтобы быть адаптированным к любой конфигурации аэропорта, то есть к взлетно-посадочным полосам, используемым в одном или смешанном режимах. Он способен поддерживать безопасное и оптимальное использование взлетно-посадочной полосы для входящих и исходящих потоков ВС совместно с Менеджером прибытия.

Применение перспективных средств поддержки принятия решения Менеджер прилета (AMAN) и Менеджер вылета (DMAN) должно помочь диспетчерам УВД сформировать очередь использования взлетно-посадочной полосы, оптимизировать потоки прибывающих и убывающих воздушных судов, а также предоставить рекомендации диспетчерам УВД для поддержания очередности использования взлетно-посадочной полосы.

Системы AMAN/DMAN открывают возможности для динамичного составления расписаний, позволяющие более эффективно осуществлять схемы прилета/вылета. Такая организация прилетов и вылетов обеспечит гармонизацию соответствующих потоков, управление конфликтными ситуациями, более эффективное использование ВПП. Органы ОрВД в настоящее время могут координировать операции прилета и вылета и устанавливать последовательность прилетов и вылетов, которая позволяет избегать возникновения между ними конфликтов.

Крупные аэропорты – это комплексные организации, работающие с участием многочисленных заинтересованных сторон/партнеров. У каждого из них есть собственные принципы и процедуры работы, и они в основном действуют самостоятельно, независимо от других. Оптимизация, основанная на этих индивидуальных процессах, очень часто приводит к неэффективной работе аэропорта в целом. Нескоординированные операции в аэропортах часто ведут к дополнительным задержкам, ожиданию на земле и в воздухе и удорожанию полетов, а также к отрицательному воздействию на окружающую среду. Это не только сказывается на эффективности аэропорта и его общих эксплуатационных показателях, но также влияет на эффективность всей сети организации воздушного движения (ОрВД). Отсутствие своевременного доступа к информации относительно этапов полета (например, прибытия, разворота на вылет и очередности наземного движения) увеличивает время движения и снижает эффективность использования аэропортовых ресурсов, таких как стоянки для воздушных судов, наземное оборудование служб аэропорта. Например, задержки и время ожидания (в воздухе и на земле) ведут к повышению расхода топлива с отрицательным воздействием на окружающую среду.

В настоящее время информация об аэропортовых операциях, например, план наличия ресурсов (ВПП, рулежных дорожек) и готовность воздушного судна не в полной мере принимаются во внимание при планировании потока движения в рамках всей системы ОрВД.

Совершенствование планирования и организации аэропортовых операций и их полная и беспроблемная интеграция во всю систему ОрВД через обмен информацией между заинтересованными сторонами имеют важнейшее значение для достижения показателей эффективности

деятельности, установленных для большинства используемых аэропортов. Решением всего этого служат процессы совместного принятия решения (CDM) и совместного принятия решения в аэропорту (A-CDM).

СОВМЕСТНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ (CDM)

Совместное принятие решений (CDM) – это процесс, определяющий согласованный порядок принятия решения двумя и несколькими членами сообщества. В рамках данного процесса члены сообщества ОрВД обмениваются информацией, касающейся этого решения, договариваются о подходе и принципах принятия решений и применяют их на практике. Основная задача данного процесса – повысить эффективность системы ОрВД в целом, соблюдая при этом равенство интересов отдельных членов сообщества [1–3].

Внедрение принципов совместной работы, которые позволяют различным эксплуатационным подразделениям в аэропортах обмениваться сведениями о наземных операциях, оптимизирует организацию наземного движения благодаря сокращению задержек в зонах движения и повысит показатели безопасности, эффективности и ситуационной осведомленности.

CDM в аэропорту представляет собой набор усовершенствованных процессов, обеспечиваемых взаимосвязью различных информационных систем эксплуатационных подразделений в аэропортах. CDM в аэропорту может быть относительно простой и малозатратной программой (рис. 2).



Рис. 2. Общее принятие решения
Fig. 2. Shared decision-making

СОВМЕСТНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В АЭРОПОРТУ (A-CDM)

Совместное принятие решений в аэропорту (A-CDM) – это современная, широко внедряемая в европейских аэропортах концепция, включающая соответствующие процедуры и технические средства поддержки, планирования, обслуживания полетов на основе коллективного сотрудничества всех служб, участвующих в этом процессе. A-CDM призвана повысить эксплуатационную эффективность процессов обслуживания воздушных судов в аэропорту [3].

Цель A-CDM – улучшить обмен сведениями между партнерами по A-CDM, а также заранее определить процедуры и правила их взаимодействия. Она позволяет управлять потоком воздушного движения и пропускной способностью аэропортов, что приводит к сокращению задержек, повышению предсказуемости событий и оптимизации использования ресурсов.

Внедрение A-CDM позволяет ее участникам оптимизировать свои операции и решения благодаря сотрудничеству друг с другом на основе знания своих предпочтений, ограничений, реальной и прогнозируемой ситуации. Принятию решений участниками A-CDM способствуют обмен своевременно представляемыми и точными данными, а также адаптированные процедуры, механизмы и инструменты. Важной особенностью всех процессов CDM является заблаговременное согласование участниками процедур и правил взаимодействия до начала эксплуатационной деятельности. Эти процедуры и правила описывают порядок взаимодействия партнеров по CDM и порядок принятия решений для обеспечения эффективной работы и равного соблюдения интересов всех партнеров.

В больших аэропортах сложная конфигурация ВПП и стоянок воздушных судов может приводить к большим различиям во времени руления. Вместо использования стандартного среднего значения такого времени по умолчанию можно получить более реалистичное индивидуально рассчитанное время руления для различных комбинаций, в которых учитываются прошлые данные, эксплуатационный опыт и/или издержки. Индивидуализированный расчет времени руления обеспечит высокую точность заданного времени для прибывающего или убывающего воздушного судна.

Совместное планирование очередности вылетов воздушных судов с помощью A-CDM положительно влияет на процедуры запуска двигателей и буксировки. Основой расчета очередности вылетов служит заданное время, например, заданное время начала руления (TOBT) и заданное время разрешения запуска (TSAT). При расчете TSAT учитывается также TOBT, расчетное время взлета (CTOT), пропускная способность и возможные местные ограничения. В зависимости от движения воздушного судна, исходя из расчета TOBT, а также текущей загрузки перронов, рулежных дорожек и близлежащих ВПП, служба УВД может установить TSAT, согласно которому будет эффективно определяться очередность вылета каждого воздушного судна с момента начала руления. Благодаря этому обеспечивается упорядоченное и стабильное движение воздушных судов к ВПП и уменьшается очередь на месте ожидания у ВПП.

Задачи A-CDM:

- повысить прогнозируемость;
- улучшить текущие рабочие характеристики;
- снизить затраты на наземное передвижение;
- оптимизировать/расширить использование ресурсов для наземного обслуживания;
- оптимизировать/расширить использование мест для стоянки, выходов на посадку и терминалов;
- оптимизировать использование инфраструктуры аэропорта и снизить перегруженность аэропорта;
- снизить уровень неэффективного использования слотов при ОПВД;
- гибкая система планирования операций перед отправлением.

КОНКРЕТНОЕ РЕШЕНИЕ

Главная задача – это объединить партнеров (операторов аэропорта, эксплуатантов воздушных судов, агентов по наземному обслуживанию и службы ОПВД) в совместной работе по планированию полета, создать основы эффективного принятия решений благодаря более точной и своевременной информации, дающей всем партнерам в аэропорту единую оперативную картину воздушного движения с общим замыслом. Информация AMAN может быть составной частью информационной среды процесса A-CDM для заинтересованных партнеров (рис. 3).

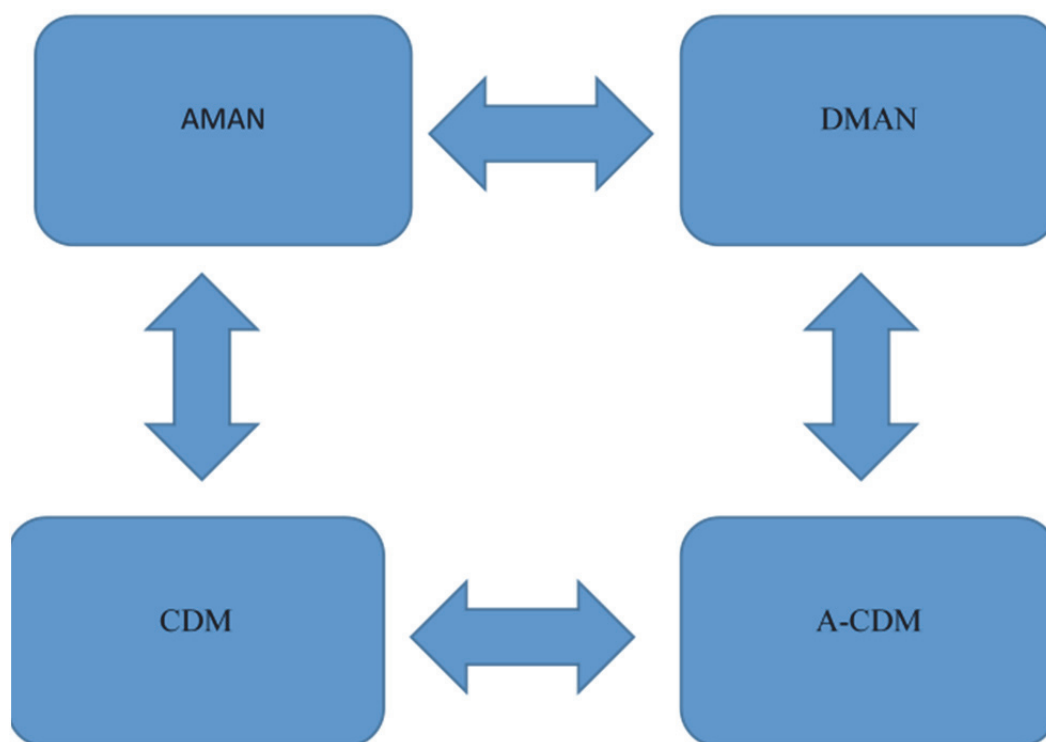


Рис. 3. Процесс взаимодействия наземных и воздушных служб
Fig. 3. The process of interaction between air and ground services

В первую очередь информация о слотах, которая заранее согласовывается со службой координации расписания (СКР), должна направляться в МЦ АУВД для регулирования прилета. А-MAN эту информацию будет считывать и формировать время прибытия в своей базе данных.

В результате планирования система представляет диспетчерам следующую информацию:

- очередность прибытий ВС на каждую ВПП, время руления, время стоянки ВС;
- различную окраску рамки с позывным ВС и выделенные цветом типы ВС в зависимости от запланированной ВПП и/или маршрута прибытия;
- времена прибытия ВС;
- категорию турбулентности ВС (WTC);
- дополнительные рекомендации – TTL и TTG в виде индикатора тренда;
- параметры потока, направление ВПП, время планируемого изменения ВПП (рабочего курса);
- дополнительную информацию о трансферных рейсах.

Система используется постоянно, даже при низкой интенсивности, как активное средство упорядочения прибытий. А-MAN эффективна при постоянном потоке, но иногда диспетчеры испытывают трудности при обслуживании потока в особых или часто изменяющихся ситуациях, например, неблагоприятных метеоусловиях (гроза) или быстром закрытии ВПП.

Преимущества системы состоят в следующем:

- улучшены процедуры текущего планирования;
- сокращены объемы согласований (координации);
- позднее ожидание или его исключение;
- точный расчет времен EAT;
- улучшенные возможности анализа обстановки (на прилет) в целом;

- форма представления задержки – в виде рекомендаций по скорости полета ВС, которые дают большую помощь диспетчерам, нежели только информация о требуемом времени пролета точки прибытия, система рассчитывает оптимальную очередность с учетом интенсивности воздушного движения, типов ВС, категории WTC, ветра, стратегии эксплуатации ВПП и приоритетов на посадку.

Далее данные будут направляться в Главный центр (ГЦ), рассматриваться и отправляться в СКР, где служба уже на базе готовой информации с ГЦ (CDM) и A-CDM формирует приемлемый вариант и уведомляет об этом авиакомпанию. Делается это для того, чтобы авиакомпания не теряла свои слоты и таким образом смогли оптимально сформировать на сезон навигации свое расписание.

С помощью AMAN планируется бесконфликтное движение сливающихся потоков ВС в районе аэродрома. CDM дает точную информацию о времени посадки от УВД аэропорту Шереметьево. A-CDM дает точную информацию о времени взлета для УВД.

Делается это для того, чтобы полет был оптимально скоординирован по прибытию и соответственно по вылету.

При поступлении обновленных данных в IT-платформу ЦАБД «Синхрон» аэропорта Шереметьево система проводит идентификацию обновленных данных и запускает процесс интеллектуальной проверки на соответствие поступивших данных установленным допускам. При выявлении несоответствия и/или отсутствия временного показателя для определенного события система генерирует аварийное сообщение (CDM01-14) и направляет его уполномоченному пользователю ЦАБД «Синхрон» всплывающим окном модуля «Диктор». Для ответа на телеграфное сообщение система позволяет копировать аварийное сообщение в модуль «Почтовый клиент» для оповещения абонента о выявленных несоответствиях (отсутствии информации) и принятия корректирующих действий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Российской Федерации в настоящий момент концепция совместного принятия решений аэропортовых операторов и авиакомпаний не получила распространения. Впервые в России, на базе собственных разработок и IT-решений, внедряется A-CDM в аэропорту Шереметьево. Задачи системы A-CDM для аэропорта Шереметьево заключаются в повышении эффективности планирования и использования ресурсов, обеспечении бесперебойной работы аэропорта при тесном взаимодействии всех партнеров и операторов, участвующих в обслуживании пассажиров, багажа, грузов и перевозящих их ВС.

Архитектурное IT-решение системы «Синхрон», разработанные алгоритмы и модули обеспечивают моделирование пропускной способности при вводе ограничений, прогнозирование интенсивности воздушного движения ВС, формирование вылетающего и прилетающего потока ВС на этапах стратегического, предтактического и тактического планирования полетов. Процесс обмена информацией о ходе выполнения полета и готовности ВС к вылету позволяет всем партнерам участвовать в принятии решений. Алгоритмы формирования последовательности отправления и взлета ВС, с учетом ограничений и приоритетов авиакомпаний, позволяют повысить прогнозируемость событий, обеспечить пунктуальность выполнения операций.

Взаимодействие с партнерами и автоматизация процессов, IT-решений и процедур, разработанных и внедренных специалистами Шереметьево, обеспечили работу всех партнеров в едином информационном поле, сокращение времени руления ВС от отправления до взлета, экономию ресурса работы двигателей ВС, экономию расхода авиационного топлива, снижение затрат на авиационное топливо, снижение негативного воздействия работающих двигателей на окружающую среду, сбалансированность вылетающего потока ВС с учетом турбулентности спутного следа, прогнозируемость событий, своевременный обмен информацией между всеми участниками процесса A-CDM на базе единой IT-платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safety Assessment of Airport Collaborative Decision Making (ACDM), V1.2 December 2006, EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION.
2. The Manual Airport CDM Implementation, April 2012, e-version /Airport CDM adverse conditions, EUROCONTROL.
3. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management DOC 9971 AN/485, ICAO, 2014.
4. Status Que and Functions. Presentation for AMAN Team of ANS CR, P.Boveleth, 2012.
5. Arrival Manager (AMAN). Available at: [http://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_\(AMAN\)](http://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_(AMAN)) (accessed: 3.02.2017).
6. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский, др.; под ред. Г.А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003. 414 с.
7. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации (SARPS). т. 1 (Радионавигационные средства). 6-е изд. Монреаль: ИКАО, 2006.
8. ИКАО Док. 9613. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). 4-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013.
9. ИКАО Док. 9750-AN/963 Глобальный аэронавигационный план 2013–2028. 4-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013.
10. План внедрения навигации, основанной на характеристиках (PBN), в воздушном пространстве РФ. М.: Росавиация, 2014.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Луговая Анна Викторовна, специалист сектора оперативного планирования Службы координации расписания АО «Международный аэропорт Шереметьево», gold-ann@mail.ru.

Коновалов Александр Евгеньевич, старший диспетчер МАДЦ филиала «МЦ АУВД» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», konoval70@outlook.com.

COLLABORATIVE DECISION-MAKING ON THE INBOUND AND OUTBOUND AIR TRAFFIC FLOW IN AIR TRAFFIC MANAGEMENT

Anna V. Lugovaya¹, Alexandr E. Konovalov²

¹*Sheremetyevo Airport, Moscow, Russia*

²*Branch "Moscow ATC Centre" of the FSUE "State ATM Corporation", Russia*

ABSTRACT

The article introduces the general solution – to regulate air traffic flow through the implementation of a set of operational procedures and automated processes for tactical airspace planning and collaborative decision-making (AMAN, DMAN, CDM, A-CDM).

The specific solution – to unite all airport operators in gross productivity is suggested. It gives them a single image of the air and ground space and the decision-making effectiveness.

The acceptance rate of loaded aerodromes depends on the ability of ATS units at these aerodromes providing approach, arrival and departure for the required airspace capacity of the aerodrome area.

The basis of module is a manual procedure, in which the air traffic controller arranges departures or arrivals in real time. Furthermore, there are problems that lead to sub-optimal control decisions especially in taxi procedures planning for departure and holding arrival/departure.

According to the experience of airports workload in Europe, the optimal decision-making is successful implementation of new operational procedures and automated processes for tactical airspace planning and collaborative decision-making (AMAN, DMAN, CDM, A-CDM).

Arrival Manager (AMANs) systems are primarily designed to provide automated sequencing support for the ATCOs handling traffic arriving at an airport, continuously calculating arrival sequences and times for flights, taking into account the locally defined landing rate, the required spacing for flights arriving to the runway. AMAN system can be an integral part of the A-CDM process for interested operators. Departure Manager (DMAN) is a planning system to improve departure flows at airports.

Nowadays, the information on airport operations and aircraft readiness is used partly when ATMF is planning the traffic flow throughout the entire ATM system. The most important decision is the information exchange between the interested operators who are criticized for achieving performance indicators for the busiest airports.

Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) and Collaborative Decision Making (CDM) both contribute to solve all these problems.

Key words: AMAN – arrival manager; DMAN – departure manager; CDM – Collaborative Decision-Making; A-CDM – Airport Collaborative Decision-Making; ATMF – Air Traffic Flow Management.

REFERENCES

1. Safety Assessment of Airport Collaborative Decision Making (ACDM), V1.2 December 2006, EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION.
2. The Manual Airport CDM Implementation, April 2012, e-version /Airport CDM adverse conditions, EUROCONTROL.
3. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management DOC 9971 AN/485, ICAO, 2014.
4. Status Que and Functions. Presentation for AMAN Team of ANS CR, P. Boveleth, 2012.
5. Arrival Manager (AMAN). Available at: [http://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_\(AMAN\)](http://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_(AMAN)) (accessed: 3.02.2017).
6. **Bochkarev V.V., Kravcov V.F., Kryzhanovskij G.A.** *Koncepcija i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoj aviacii. Pod red. G.A. Kryzhanovskogo.* [The concept and the CNS/ATM systems in civil aviation]. Moscow, Akademkniga, 2003, 414 p. (in Russian)
7. Annex 10. Aeronautical Telecommunications. Vol. I. Radio Navigation Aids. 6th edition. Montreal, ICAO, 2006.
8. ICAO Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual. 4th Edition. Montreal, ICAO, 2013.
9. ICAO Doc 9750-AN/963 Global Air Navigation Plan 2013–2028. 4th Edition. Montreal, ICAO, 2013.
10. *Plan vnedrenija navigacii, osnovannoj na harakteristikah (PBN), v vozdushnom prostranstve RF* [The plan of introduction of the performance based navigation (PBN) in air space of the Russian Federation]. Moscow, Rosaviacija, 2014 (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna V. Lugovaya, Specialist of the Tactical Airspace Planning of Airport Slot Consistency Service at Sheremetyevo Airport, gold-ann@mail.ru.

Alexandr E. Konovalov, Senior ATC at the Branch “Moscow ATC Centre” of the FSUE “State ATM Corporation”, konoval70@outlook.com.

Поступила в редакцию
Принята в печать

20.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

20.01.2017
25.05.2017

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АЭРОНАВИГАЦИИ

О.Н. СКРЫПНИК¹

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

В статье рассмотрены основные типы систем координат, используемых для решения задач воздушной навигации, связанных с аэронавигационным обеспечением процессов самолетовождения и посадки. Приводятся основные требования, предъявляемые к выбору системы координат. Указаны противоречия, возникающие при выборе системы координат.

Рассмотрены локальные системы координат: прямоугольная, цилиндрическая и сферическая. Указаны достоинства и недостатки данных систем координат, процессы навигации, при которых их применение целесообразно. Приведены прямые и обратные координатные преобразования между локальными системами координат.

Показаны основные особенности применения глобальных систем координат, связанные с выбором модели фигуры Земли и проблемами ее математического описания. Даны основные сведения об общеземных эллипсоидах и их параметрах. Раскрыты понятия геоида, волны геоида, референц-эллипсоида. Показана необходимость перехода к общеземному эллипсоиду и глобальным системам отсчета и этапы такого перехода. Приведены общие сведения о Международной системе отсчета ITRS и Международной земной отсчетной основе ITRF. Выделены отличия в определении пространственных координат объектов в этих системах отсчета. Указаны отличия в областях применения систем ПЗ-90 и СК-2011 и их аналогов WGS-84 и NAD-83.

Рассмотрены особенности глобальных геодезической и геосферической (ортодромической) систем координат, их достоинства и недостатки. Приведены прямые и обратные координатные преобразования для глобальных систем координат, а также выражения, устанавливающие связь между геоцентрическими и топоцентрическими системами координат.

Ключевые слова: система координат, геоид, общеземной эллипсоид, координатные преобразования, локальная система координат, геодезическая система координат, аэронавигация.

ВВЕДЕНИЕ

Используемые в задачах аэронавигационного обеспечения системы координат предназначены для определения местоположения и параметров движения воздушных судов (ВС), а также математического описания процессов навигации. При этом система координат должна удовлетворить ряду требований [1]:

- решение навигационных задач с требуемой точностью;
- охват необходимой по площади территории земной поверхности или объема воздушного пространства, в пределах которых решаются навигационные задачи;
- наглядность и простота отображения и восприятия информации о местоположении объекта в системе координат;
- простота математических соотношений, описывающих процесс перемещения ВС.

Перечисленные требования противоречивы. Так, выбор системы координат, единой для всей земной поверхности, неизбежно приводит к сложным математическим соотношениям, а системы координат, позволяющие решать навигационные задачи по сравнительно простым математическим зависимостям, обеспечивают приемлемую точность лишь в ограниченной области пространства. Поэтому на практике используются различные системы координат, в каждой из которых обеспечивается наиболее эффективное решение частных навигационных задач.

Для решения задач навигации ВС относительно земной поверхности в настоящее время используются связанные с земной поверхностью локальные и глобальные системы координат.

Настоящая статья посвящена рассмотрению особенностей локальных и глобальных систем координат, применяемых в воздушной навигации, взаимосвязи между системами координат, а также эволюции представлений глобальных систем координат.

ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Локальные системы координат охватывают ограниченную часть земной поверхности и используются при перемещениях ВС на расстояния до 400–450 км, когда кривизной земной поверхности можно пренебречь без ущерба для точности решения навигационной задачи. В таких системах координат работают, например, системы посадки ILS, системы ближней навигации VOR/DME, TACAN, российская система РСБН.

К локальным относятся цилиндрическая, сферическая и прямоугольная системы координат (рис. 1) [2], начало которых находится в точке на поверхности Земли. Поэтому данные системы также являются топоцентрическими.

Координатами т. M в указанных системах координат являются: в прямоугольной системе (рис. 1, a) – координаты x , y , z ; в цилиндрической (рис. 1, b) – проекция r на горизонтальную плоскость радиус-вектора ρ , проведенного из начала системы координат в т. M , азимут Θ , высота z ; в сферической (рис. 1, c) – расстояние ρ (радиус-вектор) до т. M из начала системы координат, азимут Θ , угол места β .

Азимут отсчитывается в горизонтальной плоскости от направления оси OX , которая, как правило, ориентирована в направлении истинного севера, до проекции r радиус-вектора ρ на горизонтальную плоскость. Ось OZ ориентирована по нормали к земной поверхности в точке O .

Локальные системы координат находят широкое применение при полетах на небольшие (до 500 км) расстояния, управлении ВС на этапах взлета и посадки, определении местоположения ВС относительно ориентиров.

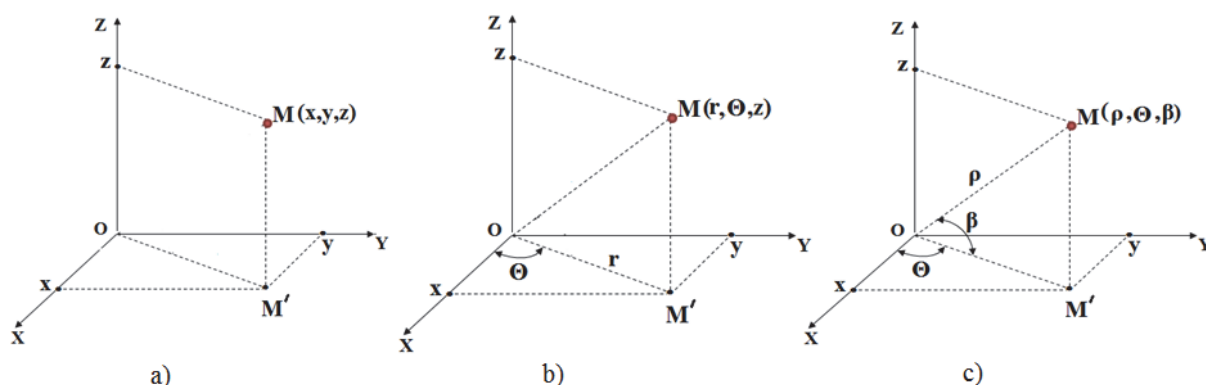


Рис. 1. Локальные системы координат
Fig. 1. The local coordinate system

При решении задач навигации часто возникает необходимость пересчета координат ВС или других объектов (например, радиомаяков) из одной системы координат в другую. Это связано с тем, что различные технические средства навигации могут работать и выдавать информацию в разных системах отсчета, а бортовая система отображения информации или алгоритмы комплексной обработки навигационной информации, реализуемые в бортовой системе самолето-вождения современных ВС, предполагают использование общей системы координат [3].

Преобразования из цилиндрической в прямоугольную систему координат имеют вид [2]

$$x = r \cos \Theta; \quad y = r \sin \Theta; \quad z = z.$$

Обратные преобразования удовлетворяют следующим выражениям:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \Theta = \arctg \frac{y}{x}; \quad z = z.$$

Преобразования координат из сферической в прямоугольную систему координат имеют вид [2]

$$x = \rho \cos\beta \cos\Theta; \quad y = \rho \cos\beta \sin\Theta; \quad z = \rho \sin\beta.$$

Обратные преобразования удовлетворяют следующим выражениям:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \Theta = \arctg \frac{y}{x}; \quad \beta = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Достоинствами локальных систем координат являются достаточно простые математические соотношения, описывающие процессы перемещения ВС, наглядность отображения и восприятия информации о местоположении ВС относительно начала системы координат, простые и точные координатные преобразования из одной системы в другую. Основной недостаток систем – охват незначительной части земной поверхности. Поэтому данные системы координат используются для решения задач ближней навигации, при заходе на посадку и посадке.

ГЛОБАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

Глобальные системы координат охватывают всю поверхность земли. Фигура Земли, а значит, и земная поверхность, имеет сложную форму. К сожалению, не существует системы координат, абсолютно точно учитывающей фигуру Земли при описании процессов навигации относительно земной поверхности в любом ее районе. Поэтому используют различные аппроксимации фигуры Земли для удовлетворения требований по точности при решении геодезических, картографических или навигационных задач [4].

Использование современных технологий измерения параметров Земли, развитие спутниковой навигации, а также требования к интероперабельности воздушного пространства, вызвали значительные изменения в подходах к описанию фигуры Земли и точности такого описания. В результате в настоящее время применяются системы координат как для решения задач геодезии и картографии, так и для решения задач воздушной и космической навигации.

Системы первого типа, использующиеся уже давно, ориентированы на раздельное определение положения объектов на поверхности земли (горизонтальное двумерное пространство) и по вертикали (ортометрическая высота, отсчитываемая от среднего уровня Мирового океана, а системы второго типа – на определение положения объектов в трехмерном пространстве [5]. В обоих случаях нужна наиболее точная аппроксимация фигуры Земли и ее поверхности.

Наиболее близким по форме к земной поверхности (рис. 2, а) является *геоид* (рис. 2, б) – поверхность, всюду нормальная силе тяжести (поверхность, на которой атмосферное давление постоянно и равно 760 мм рт. ст.) и совпадающая с уровнем Мирового океана в его спокойном состоянии. Вследствие таких эффектов, как изменение атмосферного давления, температуры, господствующих ветров и течений, вариаций плотности (солености) водных масс, средний уровень Мирового океана может отличаться от поверхности геоида на метр и более.

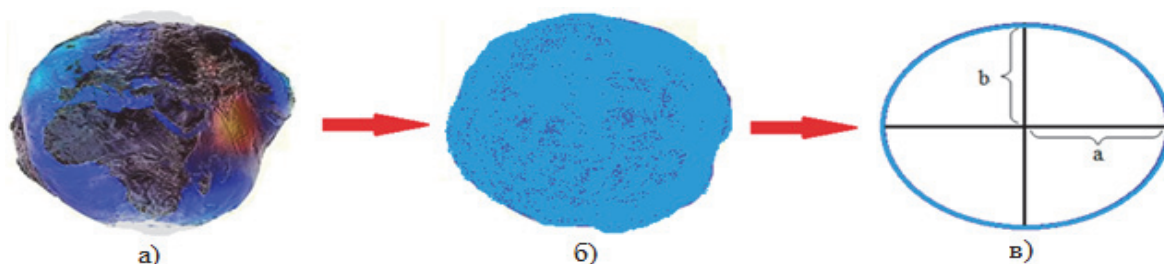


Рис. 2. Аппроксимации фигуры Земли
Fig. 2. Approximation of the Earth's shape

Поверхность геоида хотя и является гладкой по сравнению с физической поверхностью земли, но все же имеет неправильную форму. Это вызвано неравномерным расположением гравитационных масс в теле Земли, вследствие чего происходит отклонение отвесных линий.

Для создания глобального геоида была разработана модель гравитации Земли (*Earth Gravitational Model*) 1996 года – *EGM96* и принят геоид *WGS-84 (EGM96)*, обеспечивающий точность не хуже 1 м в пунктах, где измерялась гравитация. Действующей, более точной и полной, является модель 2008 года *EGM2008* [6].

Геоид не удастся описать математически, поэтому для решения практических задач на поверхности земли она представляется математически описанной геометрической фигурой – эллипсоидом (рис. 2, в). Подбирая параметры эллипсоида, можно в большей или меньшей степени приблизить его к геоиду в разных его частях. Однако невозможно подобрать эллипсоид, точно совпадающий с геоидом в пределах всей земной поверхности. Разность между поверхностями геоида и эллипсоида (называемая волной геоида) (рис. 3, а) может достигать порядка 100 м и более [7]. Информация о волне геоида необходима для определения превышений аэродромов, зон приземления и отрыва на взлетно-посадочной полосе или зон конечного этапа захода на посадку и взлета на вертодромах.

До 1964 года каждая страна подбирала параметры эллипсоида, приближенного к геоиду на территории этой страны. Такой эллипсоид получил название *референц-эллипсоида* (рис. 3, б).

Референц-эллипсоиды принимались для обработки геодезических измерений законодательно. Исторически сложилось так, что в разные времена и в разных странах были приняты и законодательно закреплены различные эллипсоиды, и их параметры не совпадали между собой.

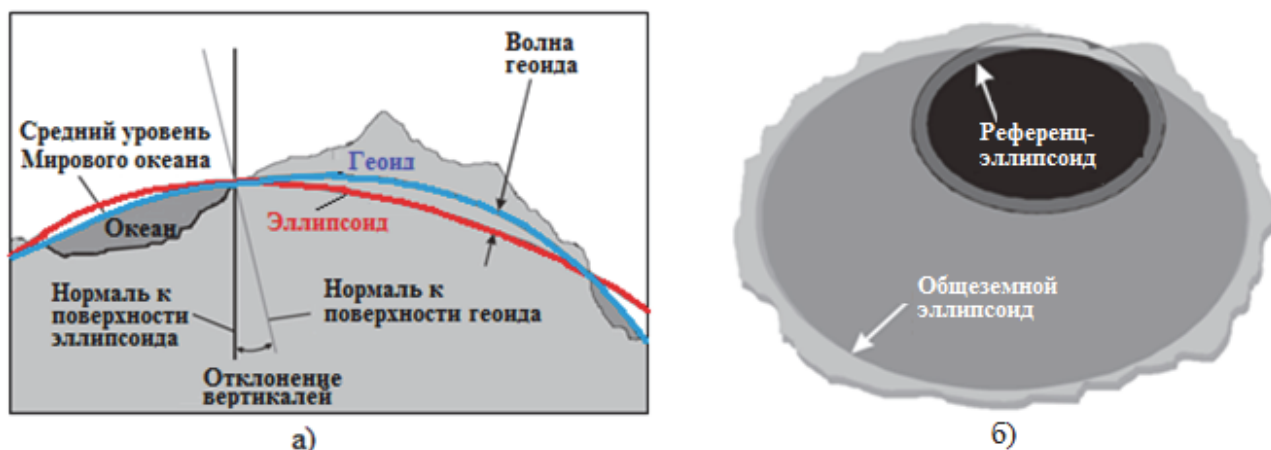


Рис. 3. Геоид и референц-эллипсоид
Fig. 3. Geoid and Local Ellipsoid

В России/СССР использовался *эллипсоид Красовского* с параметрами: большая полуось $a = 6378245$ м, малая полуось $b = 6356863$ м, сжатие 1:298,3. В США и Канаде использовали

эллипсоид Кларка (*Clarke 1880*) с параметрами: большая полуось $a = 6378249$ м, сжатие $1:295,0$. Во многих странах Западной Европы и некоторых государствах Азии был принят эллипсоид Хейфорда, а в Индии и странах Южной Азии использовали эллипсоид Эвереста [6].

Увеличение дальности полетов ВС, появление спутниковых систем навигации и развитие систем управления полетом (типа *Flight Management System, FMS*) выявило ряд острых проблем при использовании референц-эллипсоидов, например, скачки в измеряемых координатах при переходах ВС между воздушными пространствами соседних государств. Поэтому были проведены работы по установлению общеземного эллипсоида, подходящего для использования всеми государствами. В результате был принят общеземной эллипсоид *Geodetic Reference System 1980 (GRS-80)*.

Геодетическое положение объекта относительно земной поверхности определяется в связанной с Землей системе отсчета (*Terrestrial Reference System, TRS*). Эта система характеризуется определенными физическими константами (гравитационная постоянная, большая полуось эллипса, скорость вращения Земли, скорость света и др.), моделями (например, вращения Земли) и системой координат, в которой однозначно определяются координаты точек [8].

Такой системой координат может быть, например, прямоугольная система координат *OXYZ*, начало которой т. *O* находится в центре масс Земли, координатные оси *OX* и *OY* лежат в плоскости экватора, ось *OZ* совпадает с осью вращения Земли (рис. 4).

Эта система координат вращается со скоростью вращения Земли и *3D*-координаты точки в ней – это положение точки относительно центра масс Земли.

3D-координаты точки можно также определять на поверхности эллипсоида в виде угловых параметров – широты и долготы, и высоты над поверхностью эллипсоида.

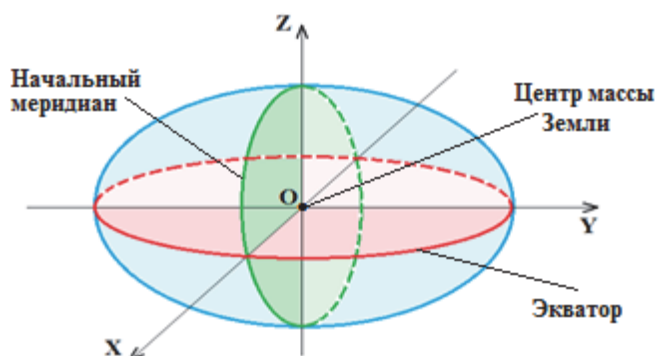


Рис. 4. Связанная с общеземным эллипсоидом *3D*-система координат (*OXYZ*)

Fig. 4. Associated with the global ellipsoid *3D*-Cartesian (*OXYZ*) system

В 1991 году в качестве единой принята Международная земная система отсчета *ITRS* (*International Terrestrial Reference System*). В США в качестве земной системы отсчета используется *WGS-84* (*World Geodetic System*). *WGS-84* рекомендована ИКАО для использования в качестве международной системы отсчета.

Связь Международной земной системы отсчета *ITRS* с земной поверхностью реализована через Международную земную отсчетную основу *ITRF* (*International Terrestrial Reference Frame*).

ITRF представляет собой набор физических точек (более 4000 по всей земной поверхности) с точно определенными с помо-

щью спутниковых технологий (система GPS) *3D*-координатами. Поэтому основой для *ITRF* также является общеземной эллипсоид *WGS-84*. Текущая версия – *ITRF2008* [8].

В России в качестве земной системы отсчета используется система «Параметры земли 1990 года» (*ПЗ-90*) с параметрами полуосей $a = 6\,378\,136$ м, $b = 6\,356\,777$ м, сжатие $1:298,25784$ [9]. Ее текущая версия – *ПЗ-90.11*, установленная в 2012 году. За отсчетную поверхность в этой системе отсчета принята поверхность эллипсоида *ПЗ-90.11*. До 1.01.2017 г. вместе с *ПЗ-90.11* в СССР/России использовался эллипсоид Красовского.

В России в качестве геодезической системы отсчета с 2012 году введена система координат *СК-2011*. Ее предыдущими версиями были *СК-42* и *СК-95*, в которых в качестве отсчетной поверхности использовался эллипсоид Красовского.

В США в качестве геодезической системы отсчета используется *NAD-83* (*North American Datum 1983*) [10]. В качестве отсчетной выбрана поверхность эллипсоида *GRS-80* (практически идентичного *WGS-84*) с параметрами $a = 6\,378\,137$ м, $b = 6\,356\,777$ м, сжатие $1:298,257$.

Системы координат *NAD-83* и *СК-2011* предназначены для выполнения геодезических и картографических работ. Эти системы удобны для навигации ВС относительно наземных станций и ориентиров, координаты которых привязаны к земной поверхности.

Общеземные геоцентрические системы координат *ПЗ-90.11* и *WGS-84* предназначены для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач, прежде всего по данным спутниковых систем навигации ГЛОНАСС и GPS.

В современных бортовых *FMS* обработка информации и ее выдача на многофункциональные индикаторные приборы (типа *ND* или *PFD*) осуществляется в глобальной геодезической системе координат *ПЗ-90.11* (Россия) или *WGS-84* (рис. 5, а). В ней координатами ВС являются геодезическая широта B и геодезическая долгота L , а также высота над поверхностью эллипсоида (абсолютная высота по принятой в России терминологии, или *QNH* – по международной терминологии). При этом геодезическая широта представляет собой угол между нормалью, проведенной через точку M к земной поверхности, и плоскостью экватора.

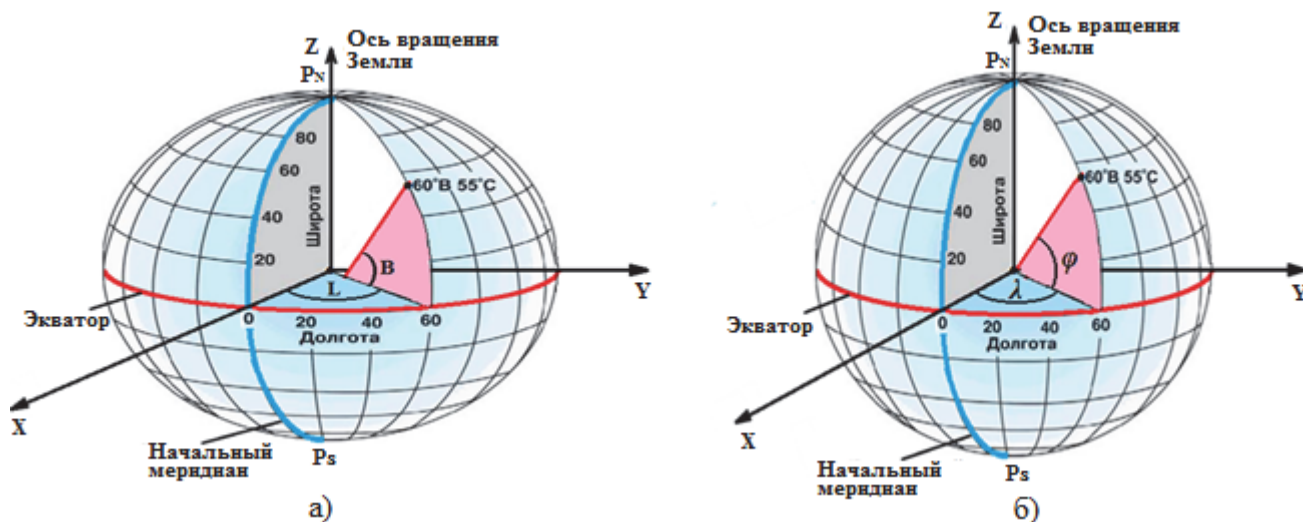


Рис. 5. Глобальные геоцентрические системы координат
Fig. 5. The global geocentric coordinate system

Использование данной системы координат позволяет решать задачи аэронавигации с высокой точностью независимо от расстояний, на которые перемещается ВС. Однако процессы навигации в этой системе координат описываются достаточно сложными выражениями, которые реализованы в компьютерах систем самолетовождения только современных ВС.

До недавнего времени основной для решения задач воздушной навигации была ортодромическая система координат, в которой фигура Земли аппроксимируется сферой. По принятой аппроксимации фигуры Земли ортодромическая система координат аналогична геосферической (рис. 5, б), но отличается произвольно устанавливаемыми условными полюсами и условным экватором (главной ортодромией).

Местоположение ВС в геосферической системе координат определяется геосферическими широтой φ и долготой λ . При этом геосферическая широта φ т. M отличается от геодезической широты B тем, что она представляет собой угол между радиус-вектором, проведенным из центра сферы в т. M , и плоскостью экватора. Понятия и способ отсчета геосферической λ и геодезической долготы L совпадают.

При решении навигационных задач в геоцентрической системе координат возникают методические погрешности определения местоположения ВС, вызванные аппроксимацией фигуры Земли сферой. Максимальная разность между геодезической и геоцентрической широтой наиболее значительна в средних широтах и составляет $(B - \varphi)_{max} = 11,6$ угл. мин, убывая по мере приближения к полюсам или экватору. При этом геоцентрическая широта всегда меньше геодезической (кроме полюсов и экватора), а геодезическая и геоцентрическая долгота точки совпадают.

КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ГЛОБАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Связь между координатами ВС в прямоугольной системе координат $OXYZ$, начало которой находится в центре масс Земли, и геодезическими (пространственными эллипсоидальными) координатами определяется выражениями

$$x = (N+H)\cos B\cos L, \quad y = (N+H)\cos B\sin L, \quad z = (N+H-e^2N)\sin B,$$

где H – высота над поверхностью эллипсоида; $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ – эксцентриситет земного эллипсоида; $N = a \cdot (1 - e^2 \sin^2 B)^{-1/2}$ – радиус кривизны первого вертикала.

Преобразование координат из системы координат $OXYZ$ в геодезические (пространственные эллипсоидальные) осуществляется с помощью выражений

$$B = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N+H} \right)^{-1}, \quad L = \text{Arctg} \frac{y}{x}, [-\pi, \pi], \quad H = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos B} - N,$$

где $\text{Arctg}(\ast)$ – круговое значение арктангенса с учетом квадрантов.

Следует отметить, что данное преобразование выполняется итерационным методом, но сходимость достигается достаточно быстро.

Для пересчета координат объектов в локальную топоцентрическую систему координат ($Ox_Ly_Lz_L$), геодезически привязанную к заданной точке Земли (B_0, L_0, H_0) (рис. 6), из геодезических координат (B, L, h) сначала производится пересчет в геоцентрические прямоугольные координаты (x, y, z), связанные с центром Земли, а затем выполняется преобразование

$$\begin{vmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{vmatrix} = \bar{M} \cdot \begin{vmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{vmatrix}$$

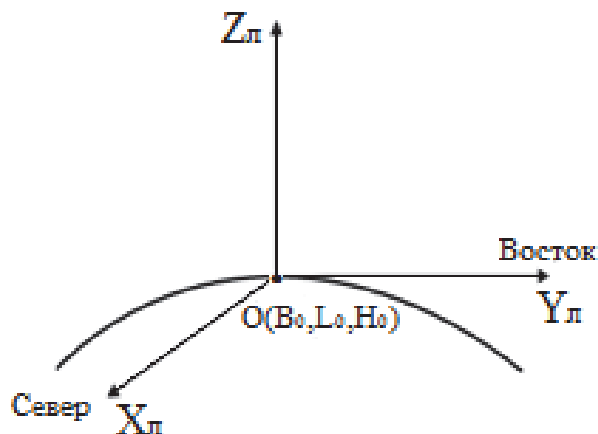


Рис. 6. Топоцентрическая локальная
прямоугольная система координат
Fig. 6. The local topocentric Cartesian system

где x_0, y_0, z_0 – геоцентрические прямоугольные координаты начала локальной системы координат,

$$\bar{M} = \begin{vmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\cos L_0 \sin B_0 & -\sin L_0 \sin B_0 & \cos B_0 \\ \cos L_0 \cos B_0 & \sin L_0 \cos B_0 & \sin B_0 \end{vmatrix} - \text{матрица преобразования.}$$

Обратный пересчет координат из локальной $OX_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$ в геоцентрическую систему координат $OXYZ$ осуществляется в соответствии с выражением

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \bar{M}^T \begin{vmatrix} x_\lambda \\ y_\lambda \\ z_\lambda \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix}, \text{ где } \bar{M}^T - \text{транспонированная матрица.}$$

Для точки, находящейся на поверхности земной сферы, координатные преобразования из геоцентрической системы координат в прямоугольную $OXYZ$ имеют вид

$$x = R \cos \varphi \cos \lambda; \quad y = R \cos \varphi \sin \lambda; \quad z = R \sin \varphi$$

и обратное преобразование

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad \lambda = \arctg \frac{y}{x}.$$

Пересчет геодезической широты в геоцентрическую может быть выполнен и по приближенной формуле $\varphi = B - 8'39'' \sin 2B$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор системы координат, единой для всей земной поверхности, неизбежно приводит к сложным математическим соотношениям, а системы координат, позволяющие решать навигационные задачи по сравнительно простым математическим зависимостям, обеспечивают приемлемую точность лишь в ограниченной области пространства. Поэтому на практике используются различные системы координат, в каждой из которых обеспечивается наиболее эффективное решение частных навигационных задач.

Для решения задач навигации ВС относительно земной поверхности в настоящее время используются связанные с земной поверхностью локальные и глобальные системы координат. Между рассмотренными системами координат имеется однозначная связь, что позволяет приводить информацию от различных средств навигации в общую систему для реализации алгоритмов комплексной обработки.

Проведенный анализ локальных и глобальных систем координат, используемых в воздушной навигации, позволил установить их основные особенности и области применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрышник О.Н.** Радионавигационные системы воздушных судов: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 248 с.
2. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.

3. **Скрыпник О.Н.** Межсамолетная навигация при управлении воздушным движением. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский государственный технический университет гражданской авиации. М., 2010.
4. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 28 июня 2015 г. № 2123. 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/4560343228> (дата обращения 03.02.2017).
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 № 1463. О единых государственных системах координат [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-lab.info/docs/law/statecoord-2012.doc> (дата обращения 3.02.2017).
6. Doc 9674 AN/946. World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. International Civil Aviation Organization, Second Edition, 2002, p. 134.
7. Moritz. H. Geodetic Reference System 1980 [Электронный ресурс]. URL: <http://geodeticscience.org/course/refpapers/00740128.pdf> (дата обращения 3.02.2017).
8. ITRF 2008. URL: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ (дата обращения 26.02.2017).
9. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, М., 2014. 52 с.
10. 2014 Federal Radionavigation Plan. [Электронный ресурс]. National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161 DOT-VNTSC-OST-R-15-0 URL: <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/FederalRadionavigationPlan2014.pdf> (дата обращения 3.02.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Скрыпник Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Иркутского филиала МГТУ ГА о учебно-научной работе, skripnikon@yandex.ru.

COORDINATE SYSTEMS AND TRANSFORMATIONS FOR AIR NAVIGATION TASKS

Oleg N. Skrypnik¹

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

ABSTRACT

The main types of coordinate systems, used for air navigation tasks solving that are connected with aeronautical flight control and landing provisioning are examined in the article. The basic requirements for the coordinate system choice as well as the conflicts that appear while choosing are stated.

Local coordinate systems have been studied: orthogonal, cylindrical and spherical. Advantages and disadvantages of these coordinate systems, the navigation processes at which their application is rational are mentioned. Direct and backward coordinate transformations between local coordinate systems have been shown.

Essential distinctive features of global coordinate systems' appliance connected with the Earth's model figure choosing and its mathematical description problems are shown. Basic information about the global ellipsoids and its parameters is presented. The concepts of geoid, geoid wave and reference-ellipsoid have been studied. The necessity of transitioning to the global ellipsoid and global reference systems as well as the stages of such transitioning are shown. Information about the ITRS and ITRF is given. Differences in determining the objects space coordinates in these reference systems are described. Differences in ПЗ-90 and СК-2011 application areas and their prototypes WGS-84 and NAD-83 ones are specified.

The peculiarities of global geodesic and geospheric (orthodromic) coordinate systems are examined as well as their advantages and disadvantages. Direct and backward coordinate transitions for global coordinate systems and the expressions which set the connection between geocentric and topocentric coordinate systems are illustrated.

Key words: coordinate system, geoid, global terrestrial ellipsoid, coordinate transformations, local coordinate system, geodetic coordinate system, aeronavigation.

REFERENCES

1. **Skrypnik O.N.** *Radionavigatsionnye sistemyi vozdukhnykh sudov* [Radionavigation systems of aircrafts]. Moscow, INFRA-M, 2014, 248 p. (in Russian)
2. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics] (*dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*). Moscow, Nauka, 1974, 832 p. (in Russian)
3. **Skrypnik O.N.** *Mezhsamoletnaya navigatsiya pri upravlenii vozdukhnyim dvizheniem* [Interaircraft navigation for air traffic control]. PhD work. *Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet grazhdanskoy aviatsii*. Moscow, 2010. (in Russian)
4. *Radionavigatsionnyy plan Rossiyskoy Federatsii* [Radionavigational plan of Russian Federation]. Approved by the order of the Ministry of Industry and Trade of RF from 28.06. 2015. no. 2123, 142 p. URL: <http://docs.cntd.ru/document/4560343228> (accessed: 03.02. 2017). (in Russian)
5. *Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 28.12.2012 № 1463. O edinykh gosudarstvennykh sistemah koordinat*. Available at: <http://gis-lab.info/docs/law/statecoord-2012.doc> (accessed: 3.02.2017). (in Russian)
6. Doc 9674 AN/946. World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. International Civil Aviation Organization, Second Edition, 2002, 134 p.
7. Moritz H. Geodetic Reference System 1980. Available at: <http://geodeticscience.org/course/refpapers/00740128.pdf> (accessed 3.02.2017).
8. ITRF 2008. Available at: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ (accessed 26.02.2017).
9. *Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90.11)* [The Earth's parameters (PZ-90.11)]. *Spravochnyy dokument. Voennno-topograficheskoe upravlenie Generalnogo shtaba Vooruzhennykh sil Rossiyskoy Federatsii*. Moscow, 2014, 52 p. (in Russian).
10. 2014 Federal Radionavigation Plan. National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161 DOT-VNTSC-OST-R-15-0. Available at: <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/FederalRadionavigationPlan2014.pdf> (accessed 3.02.2017).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg N. Skrypnik, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Deputy Director of Educational and Scientific Work of Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, skripnikon@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

20.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

20.01.2017
25.05.2017

ПУТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ В РАМКАХ ВНЕДРЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ CNS/ATM

И.А. ЧЕХОВ¹

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

В статье изложены общие принципы развития аэронавигационных систем гражданской авиации (ГА) на ближайшие годы согласно концепции Международной организации гражданской авиации ИКАО CNS/ATM. Это нашло свое отражение в Глобальном аэронавигационном плане ИКАО, принятом в 2013 году. Рассмотрена структура блочной модернизации авиационной системы, направленная на оптимизацию по четырем основным характеристикам, таким как операции в аэропортах; интероперабельные в глобальном масштабе системы и данные; оптимальная пропускная способность и гибкие маршруты полетов, а также эффективные траектории полета. При этом основное внимание в плане уделяется вопросам навигации, основанной на характеристиках (PBN), основные положения которой опираются на четыре основных блока, составляющих понятие PBN. В работе рассматриваются возможные пути реализации указанных блоков с учетом особенностей использования воздушного пространства Российской Федерации. На основании проведенного анализа сделаны выводы о постепенном переходе от навигационных спецификаций RNAV к спецификациям RNP, о повышении точности навигации ВС путем модернизации наземных радионавигационных средств, как на маршруте полета, так и в воздушном пространстве района аэродрома, о необходимости продолжения разработки схем неточных заходов с использованием GNSS с последующим переходом к схемам точных заходов на посадку при помощи функциональных дополнений к ГЛОНАСС – GBAS и SBAS, также о необходимости исследования возможностей отечественной системы СДКМ (SDKM) для повышения точности навигации на различных этапах полета. Вместе с тем стандартные маршруты прибытия и вылета (SID/STAR) должны выполняться в режиме постоянного набора высоты или постоянного снижения.

Ключевые слова: концепция CNS/ATM, навигация, основанная на характеристиках, Глобальный аэронавигационный план, навигационные спецификации.

Разработка концепции CNS/ATM началась еще в 80-х годах прошлого столетия и была принята ИКАО как рабочий документ уже в 10-е годы нашего столетия. Основными разделами принятого документа были следующие:

- 1) телекоммуникации;
- 2) навигация;
- 3) наблюдение;
- 4) организация воздушного движения [1, 2].

В данной работе рассматриваются вопросы развития навигационных систем в РФ, следуя основным положениям Концепции [3].

В первичных вариантах формулировки Концепции предусматривалось развитие следующих направлений навигации:

- всемерного использования глобальных спутниковых навигационных систем (GNSS) с применением функциональных дополнений [7–9];
- реализации методов зональной навигации (RNAV) с применением требуемых навигационных характеристик (RNP) [10].

Естественно, что первое и второе направления весьма взаимосвязаны между собой и дополняют друг друга. В настоящее время в Российской Федерации идет постепенное внедрение RNAV в рамках использования GNSS, что дает возможность обеспечивать навигацию на маршруте движения ВС и выполнять процедуры, связанные с неточным заходом на посадку.

При дальнейшем внедрении соответствующих систем функционального дополнения и связанных с ними процедур можно ожидать постепенного решения вопросов, связанных с точным заходом на посадку. Не снимается и проблема обеспечения навигации с требуемыми навигационными характеристиками, которая достаточно актуальна для РФ, так как воздушное про-

странство нашей страны расположено над морскими, океаническими и материковыми территориями, включающими в себя местности с различным рельефом, а также малообжитые и малонаселенные территории.

В то же время в последние годы ИКАО приняло концепцию навигации, основанной на характеристиках (PBN) [4]. Суть данной концепции заключается в том, что для осуществления навигации ВС в определенном конкретном воздушном пространстве необходимо учитывать инфраструктуру навигационных средств, технические требования, предъявляемые к ВС, осуществлять реорганизацию самого воздушного пространства. Заметим, что двумя основными аспектами применения PBN в РФ являются требования, предъявляемые к соответствующей навигационной спецификации и к инфраструктуре навигационных средств (как наземных, так и спутниковых), которые в целом обеспечивают работу систем аэронавигации.

Глобальный аэронавигационный план предусматривает как наиболее приоритетное направление внедрение блочной модернизации всей авиационной системы [5]. Как указано в документе ИКАО, целью блочной модернизации является поддержание и повышение уровня безопасности полетов, эффективным согласованием программ совершенствование организации воздушного движения, устранение препятствий на пути дальнейшего повышения эффективности деятельности авиации и уменьшение воздействия на окружающую среду. Основу этого подхода составляют четыре конкретные и взаимосвязанные авиационные области совершенствования характеристик [5].

1. Операции в аэропортах.
2. Интероперабельные в глобальном масштабе системы и данные.
3. Оптимальная пропускная способность и гибкие маршруты полетов.
4. Эффективные траектории полета.

По каждой из приведенных характеристик в соответствующих документах ИКАО даны рекомендации и предложения по их совершенствованию на основе различных блоков. Особо следует отметить, что в документах ИКАО специально оговаривается возможность для заинтересованных сторон, ответственных за определенное воздушное пространство, самостоятельно выбирать первоочередность реализации того или иного блока для различной характеристики, а также глубину реализации соответствующего блока для своей зоны ответственности. В то же время указывается, что в ближайшем будущем по отдельным позициям внедряемых блоков для успешного выполнения Глобального аэронавигационного плана будут приняты необходимые требования, которые станут обязательными для всех стран – членов ИКАО. В силу сказанного, для Российской Федерации задача реализации указанных выше блоков является весьма актуальной и требующей постоянного внимания.

Каждый блок может состоять из набора отдельных модулей, каждый из которых состоит из группы элементов, которые определяют необходимые компоненты модернизации связи, навигации и наблюдения, предназначенные для ВС, систем связи, наземных компонентов систем УВД, вспомогательных средств принятия решений диспетчерами УВД и т. п.

Кратко остановимся на основных направлениях совершенствования каждой характеристики.

Для совершенствования первой характеристики – операции в аэропортах, по первому блоку предусматривается следующее.

1. Оптимизация схем захода на посадку, включая наведение в вертикальной плоскости, что является первым шагом в направлении повсеместного внедрения заходов на посадку по GNSS.

2. Повышение пропускной способности ВПП за счет оптимизированного эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе, путем пересмотра действующих минимумов и процедур эшелонирования ИКАО.

3. Оптимизация потоков движения на ВПП на основе установления очередности (AMAN/DMAN), синхронизированное по времени установление очередности движения вылетающих и прибывающих воздушных судов.

4. Безопасность и эффективность наземных операций с использованием систем управления наземным движением и контроля над ним A-SMGCS.

5. Оптимизация операций в аэропортах на основе применения принципов совместного решения (CDM) и совместной работы эксплуатационных подразделений в аэропортах.

По второму блоку предусматривается следующее.

1. Оптимизация доступа в аэропортах, т. е. дальнейшее развитие модуля 1 в блоке 1, это является следующим шагом в процессе повсеместного внедрения заходов на посадку по GNSS.

2. Повышение пропускной способности ВПП при вылете и прилете путем динамичного управления минимумами эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе на основе идентификации опасности попадания в спутный след в реальном масштабе времени. Эта позиция совпадает с модулем 2 в блоке 1, но понятие оптимизированного эшелонирования заменяется на динамическое эшелонирование, т. е. процесс должен идти в реальном масштабе времени.

3. Оптимизация операций в аэропортах на основе организации вылетов, наземного движения и прилетов. Активное регулирование движения прибывающих воздушных судов, интеграция организации наземного движения и установление очередности вылетов обеспечивают надежность организации движения на ВПП, повышение эффективности работы аэропортов и производства полетов. Это дальнейший шаг по отношению к позиции 3 в блоке 1.

4. Повышение безопасности и эффективности наземного движения с расширенными возможностями визуализации. Наблюдение за наземным движением в аэропортах в интересах ПАНО и летных экипажей с применением логических схем обеспечения безопасности полетов, дисплеев движущихся карт в кабине экипажа и визуальных систем обеспечения руления.

5. Оптимизация аэропортовых операций на основе принципов совместной работы эксплуатационных подразделений в аэропортах. Позиция совпадает с позицией 5 для блока 1, но расширяется сфера действия.

6. Дистанционно управляемые аэродромные диспетчерские пункты. Дистанционно управляемые аэродромные диспетчерские пункты предоставляют ОВД в случае непредвиденных обстоятельств и дистанционное ОВД на аэродромах за счет использования систем и средств визуализации.

По третьему блоку предусматривается следующее.

1. Совершенствование процесса эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе (основанного на времени): применение основанных на времени минимумов эшелонирования и изменение существующих процедур для применения минимумов.

2. Сопряжение систем AMAN/DMAN. Здесь предусматривается синхронизировать работу систем AMAN и DMAN для повышения степени динамичности операций на маршруте и в районе аэродромов.

3. Оптимизация маршрутизации наземного движения и обеспечиваемые ей преимущества для безопасности полетов. Здесь имеется в виду маршрутизация руления и наведение с переходом к операциям, основанным на траектории; мониторинг на земле/в кабине экипажа и использование линий передачи данных для передачи диспетчерских разрешений и информации. Системы искусственной визуализации в кабине экипажа.

По четвертому блоку предусматриваются интегрированные системы AMAN/DMAN/SMAN. Предполагается реализация полностью синхронизированной организации сети в рамках аэропортов вылета и аэропортов прилета для всех ВС, находящихся в конкретный момент времени в любой заданной точке.

Совершенствование второй характеристики – интероперабельные в глобальном масштабе системы и данные, по первому блоку предусматривает:

1) повышение степени интероперабельности, эффективности и пропускной способности за счет интеграции систем связи «земля – земля». Обеспечение координации передачи данных по линии связи «земля – земля» между ATSU за счет использования систем передачи данных между службами УВД (AIDC);

2) повышение уровня обслуживания за счет управления цифровой аэронавигационной информацией. Первоначальное введение цифровой обработки и управления информацией посредством внедрения САИ/УАИ, переход к электронным АИР и повышение качества и степени доступности данных;

3) метеорологическая информация, способствующая повышению уровня эксплуатационной эффективности и безопасности полетов.

По второму блоку:

1) повышение степени интероперабельности, эффективности и пропускной способности за счет реализации обмена информацией по линии связи «земля – земля» с использованием перед вылетом общей стандартной модели полетной информации, FIXM, XML и концепции объекта полета;

2) повышение уровня обслуживания за счет интеграции всей цифровой информации ОрВД. Внедрение стандартной информационной модели ОрВД, объединяющей всю информацию ОрВД с использованием UML и позволяющей предоставлять данные XML и осуществлять обмен данными на основе протоколов Интерната с WXXM для передачи метеорологической информации;

3) совершенствование характеристик на основе общесистемного управления информацией (SWIM);

4) принятие оптимальных эксплуатационных решений на основе использования комплексной метеорологической информации (планирование и обслуживание в краткосрочной перспективе). Метеорологическая информация, обеспечивающая возможность использования автоматизированного процесса принятия решений или средств: метеорологическая информация, результаты интерпретаций метеорологических условий, учет их влияния на ОрВД и поддержка принятия решений в рамках ОрВД.

По третьему блоку:

1) повышение степени координации на основе интеграции многопунктовой системы связи «земля – земля»;

2) создание возможностей для задействования бортового оборудования в процессе совместного обеспечения ОрВД на базе SWIM. Подключение воздушного судна к информационному узлу в SWIM позволяет участвовать в коллективном процессе ОрВД с доступом к разнообразным, обширным и динамичным данным, включая метеорологические данные.

По четвертому блоку:

1) улучшение эксплуатационных характеристик за счет внедрения полномасштабной системы в целях обеспечения функционирования коллективной ОрВД. Все данные, касающиеся всех соответствующих рейсов, систематически совместно используются бортовыми и наземными системами;

2) принятие оптимальных эксплуатационных решений на основе использования комплексной метеорологической информации (планирование на краткосрочный и ближайший период). Метеорологическая информация, обеспечивающая возможность использования вспомогательных бортовых и наземных автоматизированных средств принятия решений для реализации стратегии смягчения последствий воздействия неблагоприятных метеорологических условий.

Для совершенствования третьей характеристики – оптимальная пропускная способность и гибкие маршруты полетов, по первому блоку предусматривается:

1) оптимизация производства полетов за счет использования улучшенных траекторий полета на маршруте;

2) улучшение характеристик потоков воздушного движения за счет планирования на основе общесетевого анализа. Совместные меры в области АТФМ для регулирования пиковых потоков воздушного движения с применением «окон» при вылете; управление интенсивностью входа воздушных судов в заданный район воздушного пространства по определенной оси воздушной трассы, определение заданного времени выхода на точку пути или РПИ/границу секто-

ра на маршруте полета, учет расстояния в милях при полете в следе для упорядочения потоков по некоторым осям воздушных трасс и изменение потоков воздушного движения с целью избежать загруженных районов воздушного пространства;

3) первоначальные функциональные возможности для наземного наблюдения. Наземное наблюдение с использованием ADS-B OUT и/или системы мультilaterации широкой зоны действия повысит уровень безопасности полетов, в частности, эффективность поисково-спасательных операций и пропускную способность за счет сокращения минимумов эшелонирования;

4) ситуационная осведомленность о воздушном движении (ATSA);

5) улучшение доступа к оптимальным эшелонам полета за счет использования процедур набора высоты/снижения на базе ADS-B;

6) модернизация в краткосрочной перспективе существующих бортовых систем предупреждения столкновений (БСПС) в целях снижения числа отвлекающих внимание сигналов предупреждений при сохранении существующих уровней безопасности полетов;

7) повышение эффективности комплексов наземных средств обеспечения безопасности полетов.

По второму блоку:

1) совершенствование производства полетов за счет оптимизации маршрутов ОВД. Внедрение свободной маршрутизации в выделенном воздушном пространстве, когда план полета не определяется участками опубликованной сети маршрутов или системы треков, что упрощает соблюдение предпочитаемых пользователем профилей;

2) улучшение характеристик потоков воздушного движения за счет сетевого эксплуатационного планирования. Использование систем ATFM, объединяющих в себе организацию воздушного пространства и потоков воздушного движения, включая начатые первичным пользователем процессы приоритизации для совместной выработки решений ATFM на основе коммерческих/эксплуатационных приоритетов;

3) повышение пропускной способности и эффективности на основе управления интервалами;

4) комплексы наземных средств обеспечения безопасности полетов при заходе на посадку.

По третьему блоку:

1) расширение участия пользователей в процессе динамического использования сети;

2) эшелонирование с использованием бортового оборудования (ASEP). Эксплуатационные преимущества, обусловленные временной передачей летному экипажу ответственности за обеспечение эшелонирования между должным образом оборудованными назначенными воздушными судами уменьшат необходимость выдачи разрешений по устранению конфликтных ситуаций при одновременном сокращении рабочей нагрузки на органы УВД, и обеспечат возможность использования более эффективных профилей полета;

3) внедрение БСПС, адаптированной для учета операций, основанных на траектории полета с усовершенствованной функцией наблюдения, поддерживаемой ADS-B, в целях снижения числа отвлекающих внимание сигналов предупреждения и отклонений. Новая система позволит повысить эффективность полетов и процедур, обеспечивая при этом соблюдение правил безопасности полетов.

По четвертому блоку: внедрение мер по упрощению воздушного движения для учета событий и явлений, которые влияют на потоки движения.

Совершенствование четвертой характеристики – эффективные траектории полета, по первому блоку предусматривает:

1) повышение степени гибкости и эффективности при выполнении профилей снижения (CDO). Внедрение основанных на характеристиках процедур использования воздушного пространства и прибытия, которые позволяют воздушным судам выполнять полет по оптимальным

профилям в режиме непрерывного снижения (CDO) с учетом сложности воздушного пространства и воздушного движения;

2) повышение уровня безопасности и эффективности полетов за счет начального этапа применения линий передачи данных на маршруте за счет внедрения линий передачи данных для ведения наблюдения и связи в целях УВД;

3) повышение степени гибкости и эффективности при выполнении профилей вылета. Производство полетов в режиме непрерывного набора высоты (CCO). Внедрение процедур вылета, позволяющих воздушным судам выполнять полет по оптимальным профилям в режиме непрерывного набора высоты (CCO) с учетом сложности воздушного пространства и воздушного движения.

По второму блоку:

1) повышение степени гибкости и эффективности при выполнении профилей снижения (CDO) с использованием вертикальной навигации (VNAV);

2) улучшение синхронизации воздушного движения и начальный этап внедрений операций, основанных на траектории полета;

3) Внедрение базовых процедур эксплуатации дистанционно пилотируемых воздушных судов (ДПВС) в несегрегированном воздушном пространстве охватывает функции обнаружения и уклонения.

По третьему блоку:

1) повышение степени гибкости и эффективности при выполнении профилей снижения (CDO) с использованием VNAV, заданной скорости и времени прибытия;

2) интеграция ДПВС в воздушное движение. Внедрение более совершенных эксплуатационных процедур на случай потери связи (включая индивидуальный код ответчика на случай потери связи), а также усовершенствованных технологий обнаружения и уклонения.

По четвертому блоку:

1) операции, полностью основанные на четырехмерных траекториях полета. При выполнении операций, основанных на траектории полета, обеспечивается точная четырехмерная траектория, которая совместно используется всеми пользователями авиационной системы в ее основе. Это позволяет получать в масштабах всей системы самую последнюю информацию, которая интегрирована в средства поддержки принятия решений, что обеспечивает процесс принятия решений в рамках глобальной ОрВД;

2) транспарентность в управлении ДПВС, которые эксплуатируются на поверхности аэродрома и в несегрегированном воздушном пространстве совершенно так же, как и любое другое воздушное судно.

Еще раз обратим внимание, что в соответствии с Глобальным аэронавигационным планом блочная структура реализуется последовательно во времени, т. е. сначала предусматривается полное выполнение операций по первому блоку, потом по второму и т. д. Естественно, это не исключает работ одновременно по нескольким блокам. Вернемся к первому блоку реализации процедур PBN с точки зрения задач Российской Федерации.

Реализация первого блока в РФ также предусматривает ряд этапов [6]. На первом этапе предполагается обеспечение навигационной спецификации RNAV10 для полетов ВС над открытым морем, а также для полетов по маршрутам ОБД, расположенных на удаленных континентальных районах на основе применения автономной бортовой системы навигации и GNSS.

Внедрение навигационной спецификации RNAV5 осуществляется на основе применения автономной бортовой системы навигации, систем VOR/DME, DME/DME и GNSS в континентальных районах. Все маршруты ОБД со спецификацией RNAV5 должны поддерживаться эксплуатационными возможностями комплексов средств автоматизации (КСА) УВД, обеспечивающими заданную готовность, точность, целостность, непрерывность и т. д.

Продолжается внедрение полетов в аэропортах стандартных маршрутов прибытия и вылета (SID/STAR) с использованием навигационных спецификаций RNAV1 для ВС, оборудованных DME/DME и GNSS. При этом, где это представляется целесообразным, маршруты прибы-

тия и вылета RNAV1 разрабатываются с совмещением их с уже существующими традиционными стандартными маршрутами вылета и прилета, основанными на использовании традиционных навигационных средств (VOR, DME, NDB, LOC и т. п.).

Для неточных заходов на посадку (LNAV) используется навигационная спецификация RNP APCH, основанная на использовании GNSS, а также продолжается внедрение неточных заходов на посадку с вертикальным наведением на основе BaroVNAV (LNAV/VNAV) с использованием навигационной спецификации (RNP APCH/BaroVNAV).

Внедрение заходов на посадку с вертикальным наведением с использованием навигационной спецификации RNP APCH/LPV будет начато при вводе в эксплуатацию функционального дополнения СНС ГЛОНАСС – СДКМ.

Заметим, что на отдельных аэродромах может быть внедрена процедура RNP AR APCH для обеспечения полётов в условиях сложного рельефа местности и решения вопросов соблюдения ограничений на использование воздушного пространства.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. При выполнении полетов по маршруту необходимо обеспечить постепенный переход от навигационных спецификаций RNAV к спецификациям RNP по мере увеличения количества воздушных судов, оборудованных системами RNP.

2. Повысить точность навигации ВС путем постепенной замены систем VOR/DME и DVOR/DME на DME/DME как на маршруте полета, так и в воздушном пространстве района аэродрома.

3. При заходе на посадку продолжить разработку схем неточных заходов с использованием GNSS с последующим переходом к схемам точных заходов на посадку при помощи функциональных дополнений к ГЛОНАСС – GBAS и SBAS (СДКМ).

4. Необходимо исследовать возможности отечественной системы СДКМ (SDKM) для повышения точности навигации на различных этапах полета.

5. Привести стандартные маршруты прибытия и вылета (SID/STAR) к навигационным спецификациям RNAV1 (RNP1) с последующим их переходом в режим постоянного набора высоты или постоянного снижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / В.В. Бочкарев, В.Ф. Кравцов, Г.А. Крыжановский и др.; под ред. Г.А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003. 414 с.
2. Затучный Д.А., Логвин А.И., Нечаев Е.Е. Проблемы реализации режима автоматического зависимого наблюдения в России. М.: МГТУ ГА, 2012. 116 с.
3. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации (SARPS). Т. 1. Радионавигационные средства. 6-е изд. Монреаль: ИКАО, 2006.
4. ИКАО Док.9613. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). 4-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013.
5. ИКАО Док.9750-AN/963. Глобальный аэронавигационный план 2013–2028. 4-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013.
6. План внедрения навигации, основанной на характеристиках (PBN), в воздушном пространстве РФ. М.: Росавиация, 2014.
7. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. 270 с.
8. Логвин А.И., Орлов О.Е. Спутниковые системы навигации и связи для УВД. М.: МГТУ ГА, 2002. 64 с.
9. Логвин А.И., Соломенцев В.В. Спутниковые системы навигации и связи для УВД. М.: МГТУ ГА, 2005. 84 с.
10. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. М.: Радиотехника, 2011. 110 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Чехов Игорь Анатольевич, кандидат военных наук, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, электронный адрес: i.chehov@mstuca.aero.

WAYS OF NAVIGATION SYSTEMS DEVELOPMENT WITHIN THE IMPLEMENTATION OF THE CNS/ATM CONCEPT

Igor A. Chekhov¹

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

ABSTRACT

The general development principles of the civil aviation air navigation systems for the next years according to the concept of International Civil Aviation Organization (ICAO) CNS/ATM are stated in the article. It was reflected in the Global air navigation plan of ICAO accepted in 2013. The author considered the structure of block modernization of aviation system directed to optimization according to four main characteristics, such as: operations at the airports; systems and data interoperable on a global scale; optimum capacity and flexible flight routes, and also effective trajectories of flight. At the same time the main attention in the plan is paid to questions of the performance based navigation (PBN), the basic theses of which lean on four main units that make the concept of PBN. The possible ways of the specified blocks implementation taking into account features of the Russian Federation airspace use are considered in this paper. On the basis of the carried-out analysis conclusions are drawn on gradual transition from the RNAV navigation specifications to the RNP specifications, on increase in accuracy of navigation by modernization of ground radio navigational aids, both on a flight route and airspace of airfield area, on need of continuing the development of inexact calling schemes, using GNSS, with the subsequent transition to schemes of exact landing approaches by means of functional additions to GLONASS – GBAS and SBAS, also on the need of opportunities research in the domestic system SBAS (SDKM) for the increase in accuracy of navigation at various stages of flight. At the same time, standard instrument routes of arrival and departure (SID/STAR) have to be carried out in the mode of constant climb or continuous descent.

Key words: CNS/ATM concept, performance-based navigation, navigation specifications, Global Air Navigation Plan.

REFERENCES

1. **Bochkarev V.V., Kravcov V.F., Kryzhanovskij G.A.** *Koncepcija i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoj aviacii. Pod red. G.A. Kryzhanovskogo* [The concept and the CNS/ATM systems in civil aviation]. Moscow, Akademkniga, 2003, 414 p. (in Russian)
2. **Zatuchnyj D.A., Logvin A.I., Nechaev E.E.** *Problemy realizacii rezhima avtomaticheskogo zavisimogo nabljudenija v Rossii* [Problems of realization of the mode of automatic dependent surveillance in Russia]. Moscow, MGTU GA, 2012, 116 p. (in Russian)
3. Annex 10. Aeronautical Telecommunications. Vol.I Radio Navigation Aids. 6th edition. Montreal. ICAO, 2006.
4. ICAO Doc 9613 Performance-based Navigation (PBN) Manual. 4th Edition, Montreal. ICAO, 2013.
5. ICAO Doc 9750-AN/963 Global Air Navigation Plan 2013–2028. 4th Edition, Montreal. ICAO, 2013.
6. *Plan vnedrenija navigacii, osnovannoj na harakteristikah (PBN), v vozdushnom prostranstve RF* [The plan of introduction of the performance based navigation (PBN) in air space of the Russian Federation]. Moscow, Rosaviacija, 2014. (in Russian)
7. **Solov'ev Ju.A.** *Sistemy sputnikovoj navigacii* [Systems of satellite navigation]. Moscow, JeKO-TRENDZ, 2000, 270 p. (in Russian)
8. **Logvin A.I., Orlov O.E.** *Sputnikovyje sistemy navigacii i svjazi dlja UVD* [Satellite systems of navigation and communication for ATC]. Moscow, MGTU GA, 2002, 64 p. (in Russian)

9. Logvin A.I., Solomencev V.V. *Sputnikovye sistemy navigacii i svyazi dlja UVD* [Satellite systems of navigation and communication for ATC]. Moscow, MGTU GA, 2005, 84 p. (in Russian)

10. Bakulev P.A., Sosnovskij A.A. *Radionavigacionnye sistemy* [Radionavigation systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2011, 110 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor A. Chekhov, Candidate of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, i.chehov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию
Принята в печать

21.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

21.01.2017
25.05.2017

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-107-113

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

О.Н. ТЕЛЬПУХОВСКАЯ¹

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

На основании опыта подготовки специалистов в области управления воздушным движением в МГТУ ГА выявлена целесообразность использования в процессе обучения демонстрации полетов самолетов в различной воздушной обстановке. При этом достаточно визуализации траекторий воздушных судов на экране компьютера.

Рассматриваются вопросы моделирования воздушной обстановки на ЭВМ. Автор не ставил целью оптимизацию среды программирования. Важна была простота разработки интерфейса программы и получение результатов моделирования воздушной обстановки с учетом динамики изменения места самолета и возможности управления параметрами полета.

Предполагалось получить качественные результаты в среде программирования с оболочкой визуального построения программ. Требуемые для вычислительного эксперимента маршруты воздушных судов задаются пользователем с указанием курса и протяженности отрезков линейно-ломаных кривых. Изображение самолета – условная фигура самолета, положение продольной оси которого соответствует его курсу.

Пользователь, одновременно являясь диспетчером, может осуществлять векторизацию – управление с заданием нового курса для изменения траектории полета. В программе реализованы как автоматический, так и ручной режимы изменения траектории полета. Математическое моделирование динамики полета при переходе на новый курс не связано с характеристиками конкретного типа летательного аппарата.

На примерах с одним или несколькими самолетами показывается эффективность объектно-ориентированного программирования воздушной обстановки для целей обучения. Разработанная программа отвечает требованиям приложений среды Windows. Рекомендуется среда программирования Delphi, в которой после компиляции создается *.exe-файл, не требующий никаких дополнительных файлов. Такую прикладную программу легко распространять и поддерживать.

Ключевые слова: управление воздушным движением, воздушная обстановка, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование воздушной обстановки на ЭВМ целесообразно использовать на различных этапах процесса обучения для дисциплин, требующих визуализации траекторий воздушных судов (ВС). Опыт подготовки специалистов в области управления воздушным движением в МГТУ ГА показывает, что кроме специальных технических средств, дающих возможность диспетчеру на индикаторе наблюдать воздушную обстановку и связываться с экипажами, необходимы простые обучающие системы. Экран персонального компьютера и соответствующая программа – достаточные средства для визуализации воздушной обстановки.

Важна простота разработки интерфейса программы и получение результатов моделирования воздушной обстановки с учетом динамики изменения места самолета и возможности управления параметрами полета. Представляется целесообразным поручать разработку таких программ не специалистам в области программирования, а руководителям (преподавателям) практических занятий по дисциплинам, связанным с управлением воздушным движением. Оптимизация среды программирования и самой программы, например, по скорости ее работы не является главной целью моделирования воздушной обстановки.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для моделирования процессов и систем, имеющих сложный характер поведения, используются технологии имитационного моделирования. Имитационная модель [1–6] – это фор-

мальное (т. е. выполненное на некотором языке) описание логики функционирования исследуемой системы и взаимодействия ее отдельных элементов во времени, учитывающее наиболее существенные причинно-следственные связи, присущие системе. При этом обеспечивается проведение вычислительных многофакторных экспериментов.

Выбираемая среда программирования должна позволять реализовать модульное проектирование, что сокращает число возможных ошибок и повышает надежность кода. На базе языка Object Pascal, который соединен с оболочкой визуального построения программ – приложений среды Windows, основана система Delphi [7–10]. Delphi является системой программирования, получившей название объектно-ориентированной. Ее относят к среде скоростной разработки прикладных программ – RAD (Rapid Application Development). Новый стиль взаимодействия с компьютером позволяет разработчику программы наглядно конструировать пользовательский интерфейс с помощью мыши, а не обычным путем: написанием кодов, их трансляцией и запуском программы, чтобы посмотреть, как это выглядит на экране. Скоростная разработка прикладных программ («быстрое построение прототипа») – метод создания модели пользовательского интерфейса приложения на ранних стадиях разработки. Можно ознакомить своих будущих пользователей с построенным прототипом и получить от них «обратную связь» относительно интерфейса, расположения компонентов, функциональных возможностей приложения. Delphi после компиляции создает *.exe-файл, который не требует никаких дополнительных файлов. Такую прикладную программу легко распространять и поддерживать.

Прикладная программа, построенная по принципам объектной ориентации, – это не последовательность каких-то операторов, не некий жесткий алгоритм. Объектно-ориентированная программа – это совокупность объектов и способов их взаимодействия. Отдельным (и главным) объектом при таком подходе во многих случаях можно считать пользователя программы. Обмен между объектами происходит путем сообщений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель воздушной обстановки должна быть адекватной примерам реальных зон управления воздушным движением. Вид маршрутов, их количество, а также число ВС на экране по мере накопления опыта проектирования предполагается расширять без принципиального изменения программы.

С этой целью следует отказаться от использования ограниченной библиотеки карт с заранее нанесенными маршрутами. Маршруты должны после запуска программы прокладываться пользователем путем указания на экране мышью точек пунктов маршрута – исходный, промежуточные, конечный.

Самолеты для начальной установки на маршруты перемещаются мышью. Возможна их установка как на разные, так и на одинаковые маршруты. Изменение места ВС в полете выполняется по программе с использованием таймера компьютера. Для каждого самолета вводится свое значение скорости.

При полете ВС по маршруту пользователь может прервать программу автоматического следования по нему. Возможен режим полета с переходом по программе на новый заданный курс, задаваемый пользователем. Пользователь может также в процессе полета изменять курс в «ручном» режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среда программирования Delphi создает одно или несколько окон формы. Понятие формы – основа программирования в Delphi. Формы используются для вывода информации или обмена данными с пользователем. Программа создается в результате помещения на форму кно-

пок, вкладок и других компонентов, а также добавления кода, призванного реагировать на события, происходящие при взаимодействии пользователя с программой.

На рис. 1 показан фрагмент экрана компьютера при полете одного ВС. На экран компьютера выведен линейно-ломаный маршрут с двумя участками (широкие линии). Стрелкой показано направление полета. Для каждого участка указан курс в градусах и протяженность в километрах. Самолет (условно «борт 001») на втором участке сходит с маршрута, осуществляя полет по указаниям диспетчера (узкие линии). Текущие параметры полета указаны в автоматически выводимом формуляре. Число маршрутов в программе – до 10 маршрутов. Количество пунктов маршрута (исходный, промежуточные, конечный) – до 20 пунктов. Маршруты имеют номер, который им при создании присваивается автоматически: 1, 2, 3, Точки рабочей области экрана имеют координаты X, Y. Начало координат – левый верхний угол. Ось X направлена направо, ось Y – вниз.

Программа автоматически записывает на диск координаты X, Y пунктов маршрутов, создаваемых пользователем. Задаваемое имя файла Маршрут N_XY.txt, где N – номер маршрута. Возможен вывод записи на диске. Вывод используется для восстановления ранее созданного, но отсутствующего на экране маршрута. Маршрут может быть стерт в текущей сессии работы с программой, или – программа включена, но маршруты не создавались. Необходимо вывести один, несколько или все маршруты, которые были в предыдущей сессии работы с программой.

Имеется форма данных для установленных маршрутов (рис. 2).

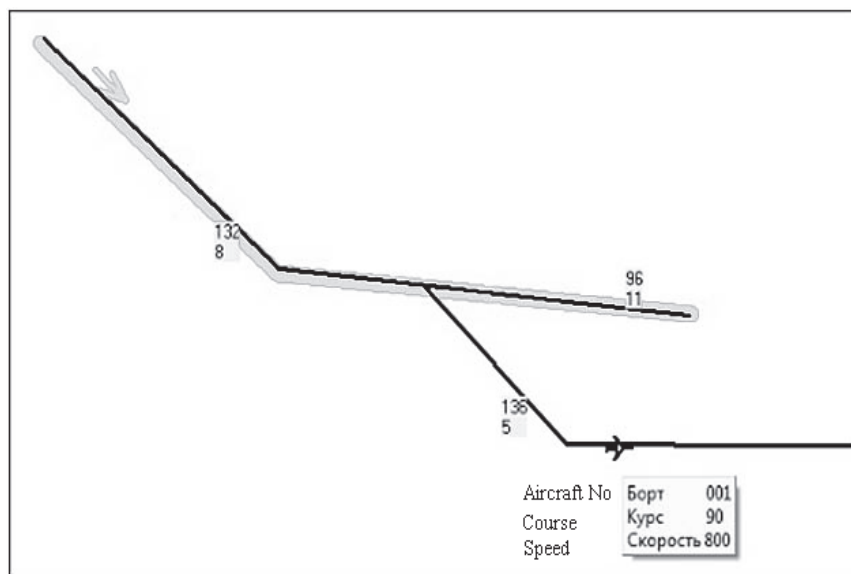


Рис. 1. Моделирование воздушной обстановки при полете одного ВС (фрагмент экрана)

Fig. 1. Simulation of the airspace situation during one aircraft flight (a fragment of the screen)

1	2	3	4	5	6
X [pixel]	Y [pixel]	Курс Course	Длина Length		
198	542	61	236		
405	429	86	140		
545	419	96	136		
680	433	118	90		
760	475	165	43		
771	517				

Рис. 2. Форма «Маршрут»
Fig. 2. Form "Route"

На форме для каждого маршрута отображаются столбцы координат X, Y пунктов маршрутов, курс и длина участков. Для пересчета пикселей (точек экрана) в километры и обратно используется управляющий элемент *Пересчет пиксель/км*. Пересчет пикселей в километры связан с масштабом окна, в котором отображается моделируемая воздушная обстановка – карты (канвы).

Экран имеет разрешение, устанавливаемое в среде Windows. Установка разрешения в Windows 7: щелчок правой кнопкой мыши на рабочем столе, выбор пункта меню *Разрешение экрана*. Если при работе программы наблюдается низкая скорость перерисовки экрана, необходимо понизить разрешение экрана, установив, например, значение 1280 x 720 пикс.

Установка ВС на маршрутах выполняется мышью до включения их автоматического перемещения. Возможна установка ряда ВС на одном маршруте (рис. 3).

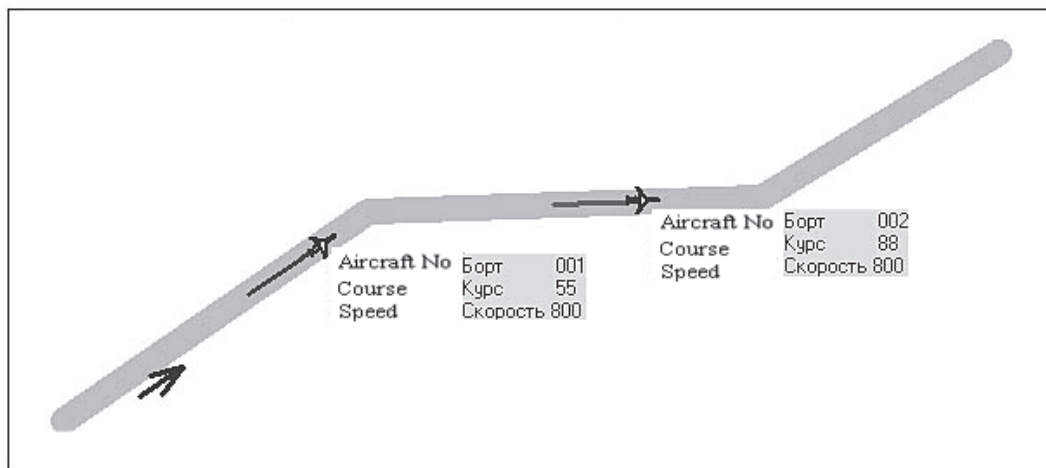


Рис. 3. Моделирование воздушной обстановки при полете двух ВС по одному маршруту (фрагмент рабочего экрана)

Fig. 3. Simulation of the airspace situation during the flight of two aircraft on the same route (a fragment of an operation screen)

Автоматическое перемещение ВС выполняется по командам таймера компьютера с заданным интервалом анимации. Учитываются масштаб карты (канвы) и скорость ВС.

ВС устанавливаются на произвольных участках маршрута. Программа определяет для каждого ВС место его начальной установки и рассчитывает текущее расстояние до следующего промежуточного пункта маршрута (ППМ). Значение интервала подлета к ППМ определяет момент автоматического изменения курса на значение, соответствующее курсу нового (следующего) участка маршрута:

$\text{AirCraft.Kurs} := \text{PointPath.Kurs}[\text{MN}, \text{PtCounts}[\text{MN}, \text{MPAir}]]$,

где

AirCraft.Kurs – курс ВС;

$\text{PointPath.Kurs}[\]$ – таблица курсов участков маршрута;

MN – номер маршрута;

MPAir – номер участка маршрута.

Форма «Установки» с параметрами модели показана на рис. 4.

Координаты ВС X , Y рассчитываются с учетом скорости и курса ВС:

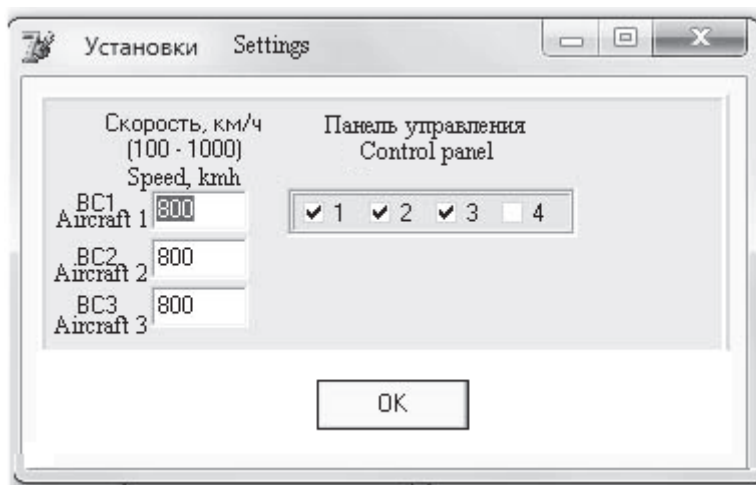


Рис. 4. Форма «Установки»
Fig. 4. Form "Settings"

$\text{XSpeed} := \text{DeltaWdth} * \sin(\text{Pi}/180 * \text{AirCraft.Kurs})$;

$\text{YSpeed} := \text{DeltaWdth} * \cos(\text{Pi}/180 * \text{AirCraft.Kurs})$;

$\text{AirCraft.X} := \text{AirCraft.X} + \text{XSpeed}$;

$\text{AirCraft.Y} := \text{AirCraft.Y} + \text{YSpeed}$,

где

XSpeed , YSpeed – приращения координат ВС X , Y за шаг анимации;

DeltaWdth – полное линейное приращение для заданной скорости за шаг анимации;

AirCraft.Kurs – курс ВС;

AirCraft.X , AirCraft.Y – идентификаторы координат ВС X , Y .

Кроме режима полета ВС по маршруту имеется режим полета с заданным курсом. Пользователь может в процессе полета изменять курс. В программе возможно:

- задание нового курса и включение режима автоматического изменения курса ВС для перехода на заданный курс;
- режим ручного разворота ВС по часовой стрелке или против с оперативно переключаемой пользователем скоростью изменения курса.

Рассмотрим режим автоматического изменения курса ВС (рис. 5).

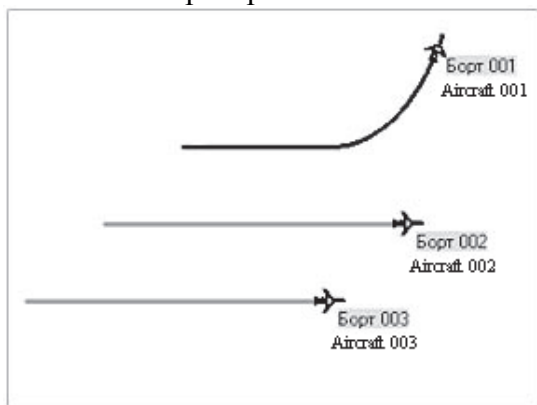


Рис. 5. Режим автоматического изменения курса
Fig. 5. The automatic mode of a heading change

ВС 1 («борт 001») переходит в выбранный пользователем момент с курса 90° на курс 0°. Если в режиме полета ВС по маршруту изменение курса при переходе на новый участок маршрута происходит сразу при подлете к ППМ, то в режиме полета с новым заданным курсом учитывается динамика автоматической смены курса.

Переход с курса 90° на курс 0° производится вводом нужного значения в окне Курс заданный с одновременным включением режима Переход на курс (автоматический) (рис. 6).

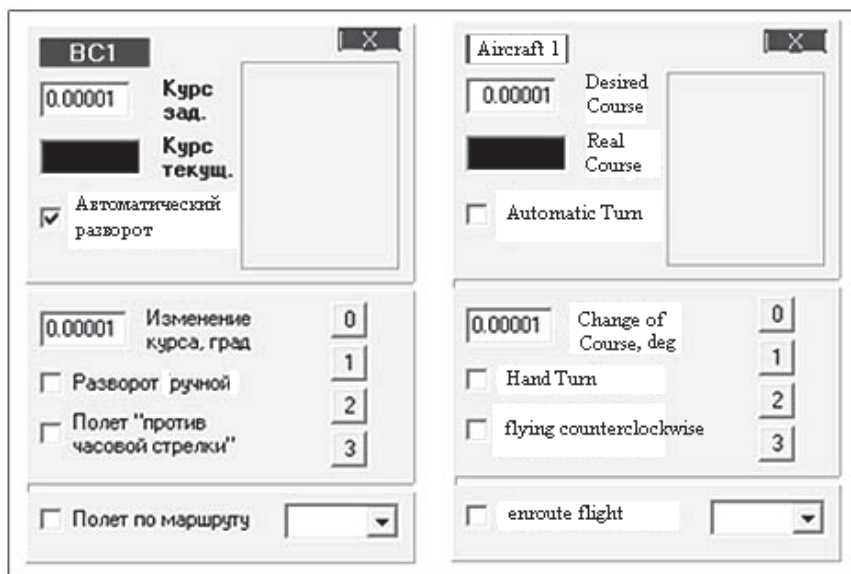


Рис. 6. Панель режимов полета

Fig. 6. The panel of flight modes

Режим ручного разворота устанавливается управляющими элементами средней части панели режимов полета ВС. Возможен разворот по часовой стрелке или против. Интервал изменения курса задается в соответствующем окне или с помощью оперативно переключаемых кнопок 1, 2, 3 (в порядке возрастания интервала). Кнопка 0 отменяет изменение курса.

Режим полета по маршруту устанавливается в нижней части панели режимов полета ВС (номер маршрута выбирается кнопкой в окне).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании опыта подготовки специалистов в области управления воздушным движением в МГТУ ГА выявлена целесообразность использования в процессе обучения демонстрации полетов воздушных судов (ВС) в различной воздушной обстановке.

При рассмотрении вопросов моделирования воздушной обстановки на ЭВМ был разработан интерфейс программы и получены результаты моделирования воздушной обстановки с учетом динамики изменения местоположения ВС и возможности управления параметрами полета. Требуемые для вычислительного эксперимента маршруты воздушных судов задаются с указанием курса и протяженности отрезками линейно-ломаных кривых.

Пользователь программы, одновременно являясь диспетчером, может осуществлять векторение – управление с заданием нового курса для изменения траектории полета ВС. В программе реализованы как автоматический, так и ручной режимы изменения траектории полета. Математическое моделирование динамики полета при переходе на новый курс не связано с характеристиками конкретного типа ВС.

На примерах с одним или несколькими ВС показана эффективность объектно-ориентированного программирования воздушной обстановки для целей обучения. Разработанная программа отвечает требованиям приложений среды Windows.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродский Ю.И. Лекции по математическому и имитационному моделированию. М.: Директ-Медиа, 2015. 240 с.
2. Авдеенко Т.В., Горский В.Г. Построение динамических моделей в пространстве состояний. М.: НГТУ, 2007. 292 с.
3. Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М.: Техносфера, 2006. 280 с.
4. Бордовский Г.А., Кондратьев А.С., Чоудери А.Д. Физические основы математического моделирования. М.: Академия, 2005. 320 с.
5. Плохотников К.Э. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. М.: Едиториал УРСС, 2003. 280 с.
6. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. М.: Физматлит, 2002. 320 с.
7. Архангельский А.Я. Delphi 2006. Язык Delphi, классы, функции Win32 и .NET. Справочное пособие. М.: Бином-Пресс, 2011. 1152 с.
8. Лесневский А.С. Объектно-ориентированное программирование для начинающих. М.: Бином, 2010. 232 с.
9. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi. М.: Бином-Пресс, 2008. 1158 с.
10. Озеров В.П. Delphi. Советы программистов. СПб.: Символ-Плюс, 2003. 976 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Тельпуховская Ольга Николаевна, кандидат технических наук, доцент МГТУ ГА, o.telpuhovskaya@mstuca.aero.

THE MODELING OF AIR SITUATION USING OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING SYSTEM

Ol'ga N. Tel'puhovskaya¹

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

ABSTRACT

Nowadays, it does make sense to use demonstration flights in the area of air traffic control in various air situations. The questions of computer air plot simulation are considered. For the simulation of processes and systems the technology

of simulation modeling is used. It is a formal description of the functioning logic. In addition, there is computation of multifactor experiments.

The picture of the aircraft is a conventional figure of the aircraft, the longitudinal axis position of which corresponds to its course. It can be on different or same routes. Changing of flight position appears according to the program using computer timer. For each aircraft, you enter its speed value. The controller can perform vectoring with the new course for changing the trajectory of the flight. The program has both automatic and manual modes. Mathematical modeling of flight, during the transition to a new course, does not relate to the characteristics of the specific type of aircraft. For example, there is the effectiveness of object-oriented program of air situation with one or more aircraft for training purposes. The aircraft forms on arbitrary sections of the route. The program determines for each aircraft the place of its initial installation and calculates the current distance to the next waypoint. The interval towards the waypoint determines the time of automatic course changing to a value corresponding to the new route. It's recommended to use Delphi programming system.

The object-oriented programming system is effective for the task. It shows that the data display and appropriate software are sufficient funds for the visualization of the air plot at different stages of studying.

Key words: Air Traffic Control, air situation, mathematical modeling.

REFERENCES

1. **Brodsky Y.I.** *Lekcii po matematicheskomu i imitacionnomu modelirovaniyu* [The lectures of mathematic and studying simulation]. Moscow, Direct-Media, 2015, 240 p. (in Russian)
2. **Avdeenko T.V., Gorskii V.G.** *Postroenie dinamicheskikh modelej v prostranstve sostojanij* [Creation of dynamic models in the space of states]. Moscow, NGTU, 2007, 292 p. (in Russian)
3. **Sirota A.A.** *Komp'yuternoe modelirovanie i ocenka jeffektivnosti slozhnyh sistem* [Computer modeling and assessment of the efficiency of complex systems]. Moscow, Technosphere, 2006, 280 p. (in Russian)
4. **Bordovskii G.A., Kondratyev A.S., Chouderi A.D.** *Fizicheskie osnovy matematicheskogo modelirovaniya* [Physical bases of mathematical modeling]. Moscow, Academy, 2005, 320 p. (in Russian)
5. **Plokhotnikov K. E.** *Matematicheskoe modelirovanie i vychislitel'nyj jeksperiment* [Mathematical modeling and computing experiment]. Moscow, Editorial of URSS, 2003, 280 p. (in Russian)
6. **Samarskii A.A., Mikhaylov A.P.** *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling]. Moscow, Fizmatlit, 2002, 320p. (in Russian)
7. **Arkhangelskii A.Ya.** *Jazyk Delphi, klassy, funkcii Win32 i .NET. Spravochnoe posobie* [Delphi 2006. Language, classes, Win32 and .NET functions. Handbook]. Moscow, Bing Press, 2011, 1152 p. (in Russian)
8. **Lesnevskii A.S.** *Obektno-orientirovannoe programmirovaniye dlja nachinajushhih* [Object-oriented programming for beginners]. Moscow, Binom, 2010, 232 p. (in Russian)
9. **Arkhangelskii A.Ya.** *Programmirovaniye v Delphi* [Programming in Delphi]. 2006. Moscow, Binom-Press, 2011, 1152 p. (in Russian)
10. **Ozerov V.P.** *Delphi. Sovety programmistov* [Delphi. Councils of programmers]. St. Petersburg, Simvol-Plus, 2003, 976 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ol'ga N. Tel'puhovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, o.telpuhovskaya@mstuca.aero.

Поступила в редакцию
Принята в печать

21.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

21.01.2017
25.05.2017

СТРАТЕГИЯ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОБЩЕСИСТЕМНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Л.Е. РУДЕЛЬСОН¹, С.Н. СМОРОДСКИЙ², А.С. СТЕПАНЕНКО¹

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

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

Рост потребностей в услугах авиатранспорта устойчиво опережает возможности перевозчиков. Передовые авиационные державы поставили цель к середине двадцатых годов утроить пропускную способность действующей системы организации воздушного движения. Технической основой таких достижений становится оснащение всех бортов аппаратурой вещательного автоматического зависимого наблюдения, обеспечивающего как контроль параметров их движения в любой точке планеты, так и надежный взаимный обмен достоверной информацией о воздушной обстановке и прогнозах ее развития между всеми участниками движения и наземными службами.

Выдвинутые экспертами ИКАО концепции совместного принятия решений по организации потоков воздушного движения и управления общесистемной информацией провозгласили в качестве средства повышения интенсивности полетов идею доступности полетной информации, причем не только для принятия к сведению, но и для внесения изменений в нее всеми участниками процесса организации и обслуживания потоков – аналитиками, метеорологами, плановиками, диспетчерами, пилотами (в части, их касающейся). Предложена технология совместной работы специалистов, позволяющая при изменении условий выполнения рейсов принимать взвешенные решения по обслуживанию потоков воздушных судов на всю глубину их полетов (как по трассам, так и по свободным траекториям).

Возникает задача разработки программных процедур компьютерной поддержки новых концепций, обеспечивающих целостность аэронавигационных данных, используемых участниками оперативной организации потоков. Все взаимосвязанные элементы организации воздушного движения (персонал и техника) могут с конечной вероятностью исходов событий совместной деятельности исказить общедоступную информацию. В статье предлагается трехуровневый алгоритм нейтрализации рассогласования данных в элементах распределенной сети наземных и бортовых вычислительных средств участников процесса, позволяющий в реальном масштабе времени поддерживать непротиворечивость сведений о текущей воздушной обстановке и тенденциях ее развития. Построена оптимальная (по критерию затрат вычислительных ресурсов) стратегия применения алгоритма.

Ключевые слова: организация потоков, общесистемное управление информацией, совместное принятие решений, контроль и восстановление целостности данных, алгоритм поддержания информационной целостности.

ВВЕДЕНИЕ

Стимулом развития гражданской авиации (ГА) постоянно выступает растущий спрос на воздушные перевозки [1]. Новейшие достижения, внедряемые в наземный, бортовой и космический сегменты полной системы организации воздушного движения (ОрВД), выдвигают отрасль на передовые рубежи науки и техники. Несколько скромнее успехи в реформировании методологии обслуживания воздушного движения (ОВД), в создании новых принципов планирования использования воздушного пространства (ИВП), организации потоков воздушного движения (ОПВД), технологии работы авиадиспетчера. Повышение интенсивности полетов компенсировалось в середине прошлого века наращиванием пропускной способности элементов структуры воздушного пространства (ВП) за счет «дробления» секторов (40–50-е годы), затем с помощью всеобъемлющей автоматизации деятельности оперативного персонала (60–90-е годы). Лишь в начале текущего столетия технический прогресс предоставил экспертам ИКАО возможность подготовки новых процедур организации воздушного пространства. В первую очередь это коснулось сокращения минимумов вертикального эшелонирования [2], позволившего «уплотнить» ВП в вертикальном разрезе. Сегодня на повестке дня стоит реализация концепций совместной ОПВД [3] и управления общесистемной информацией (SWIM) [4].

Согласно [3], «совместное принятие решений (Collaboration Decision Making, CDM) – это процесс, определяющий согласованный порядок принятия решения группой специалистов в

сфере ОрВД. В рамках процесса CDM они обмениваются информацией, касающейся принимаемого решения, договариваются о подходе и принципах принятия решений в нештатной ситуации воздушной обстановки и оперативно применяют их. Основная задача данного процесса состоит в том, чтобы повысить эффективность системы ОрВД в целом, соблюдая при этом равенство интересов и прав отдельных участников совместной деятельности. Концепция CDM рассматривается как средство достижения высоких целевых показателей эффективности ОПВД, которые применяются на последовательной и скоординированной основе».

Концепция SWIM сосредоточена на обеспечении надежного и достоверного обмена информацией, касающейся принимаемых решений. В [4] описываются процедуры взаимодействия участников процесса управления общесистемной информацией и технология работы специалистов на различных уровнях, вплоть до практической реализации замысла. В данной статье, с акцентом на компьютерную поддержку, рассмотрен один из подходов к проблеме.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Процессы сбора, преобразования, хранения и рассылки сообщений в информационно-вычислительных системах всегда сопряжены с риском искажения и потери данных. Обычно такие неблагоприятные события предотвращаются с помощью эвристических методов анализа конкретных изделий, и технические решения принимаются на основе высокой инженерной изобретательности разработчиков системы. Наглядным примером является сеть авиационной электросвязи [5]. В целях поддержания информационной целостности в ней используются дисциплины перезапроса нераспознанных сообщений, повторные запросы пропущенных сообщений, периодический контроль работоспособности аппаратуры связи. Не менее впечатляющими выглядят программно-алгоритмические комплексы управления информационными процессами и техническим состоянием аппаратуры центров Единой системы (ЕС) ОрВД, операционные системы которых в реальном масштабе времени поддерживают как информационную безопасность и целостность данных, так и живучесть взаимодействующих единиц оборудования [6].

Задача нейтрализации рассогласования аэронавигационных данных в современных автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) отличается от рассматриваемой ниже в основном размерностью и структурой базы данных (БД) системы. В [6] речь идет о локальном центре УВД, в данной статье ставятся проблемы ЕС ОрВД в целом. База аэронавигационных данных представляется в территориальной системе как распределенная наземная сеть, оперативно взаимодействующая с бортовыми вычислительными средствами. Сходство задач центров разного уровня проявляется в постановке задач и в подходе к их решению: манипулирование данными подразделяется на обновление информации о среде, в которой развивается процесс ОВД, и на сопровождение данных об объектах управления, т. е. о воздушных судах (ВС), совершающих полеты. Соответственно такому делению задач строится и структура программного обеспечения (ПО). Первая (анализ состояния среды) оценивается комплексом программ (КП) технического управления и контроля (тестирование и управление локаторами, пеленгаторами, линиями передачи данных, аппаратурой центров), КП обработки метеорологической информации (ведение информации о погоде в зоне ответственности системы) и КП сопровождения параметров структуры воздушного пространства (обновление характеристик элементов и ограничений ВП). Вторая (взаимодействие, навигация, наблюдение) поддерживается функциональными КП (обработка сообщений о движении ВС и результатов измерений их местоположения, решение навигационных задач и другая деятельность по ОВД).

Разработчики функциональных КП, как правило, оптимизируют свои алгоритмы в рамках наиболее приемлемых в соответствующей области знаний математических моделей. Например, задача прокладки траектории ВС решается КП обработки плановой информации (для прогнозирования загрузки элементов ВП), КП обработки радиолокационной информации (для отображения диспетчерам картины воздушной обстановки), КП обработки данных автоматиче-

ского зависимого наблюдения (обработка измерений местоположения ВС и штурманских расчетов, выполненных бортовой аппаратурой автоматического зависимого наблюдения – АЗН). Наибольшей погрешностью отличаются расчеты по планам полетов. Сообщения о движении воздушных судов, поступающие на вход КП, формируются с привязкой ко времени вылета с точностью до назначенного борту слота (≈ 15 мин), расчетные моменты подлета к границам районных центров – в часах и минутах относительно вылета, а траектория движения строится в виде ломаной линии, соединяющей отрезками прямых поворотные пункты маршрута.

Погрешность местоопределения бортов, оборудованных аппаратурой АЗН, составляет метры; точность измерений первичных радиолокаторов – десятки метров по высоте и минуты по азимуту; вторичная локация транслирует высоту по данным бортового альтиметра, а на точность определения дальности влияют технические параметры ответчиков (такие, как задержки ответа). Алгоритмы обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций в зоне действия системы используют либо прецизионные бортовые измерения, либо обработанные методами оптимальных статистических решений данные наблюдения от наземных радаров, но для предсказания развития воздушной обстановки они подставляются в огрубленные траектории планов полетов. Помимо рассогласований, вызванных использованием различных математических схем преобразования навигационных данных, в системе циркулирует поток диспетчерских вводов, а также данные о режимных ограничениях и опасных явлениях погоды. Как итог, о каждом элементе ВП, о воздушной обстановке в секторах ОВД в базе данных (БД) сопровождаются дополняющие друг друга описания, автономно обновляемые разными КП. Часть из них совпадает друг с другом (например, координаты элементов ВП, их наименования и коды), часть различается (состояние облачности на аэродроме, температура воздуха, коэффициент сцепления взлетно-посадочной полосы для метеорологической подсистемы или описание коридоров связи с трассами, нарезка секторов подхода и круга – для плановой).

Структурный анализ традиционных схем взаимодействия алгоритмов обработки данных показывает, что описания каждого структурного элемента системы и каждого ВС, сопровождаемые различными КП ПО АС УВД, не являются идентичными копиями. С каждым обновлением их рассогласования становятся все заметнее, риск нарушения целостности возрастает. Становятся вероятными различия не только в данных взаимодействующих функциональных КП, но и в их копиях на борту каждого ВС и в наземном сегменте системы (рис. 1). И лишь в силу скоротечности технологических процессов ОВД последствия нарушения целостности компьютерных данных проявляются достаточно редко.

Примеры последствий рассогласования данных: дублирование метки ВС на экране (рис. 1, а); отсутствие в формуляре сопровождения измеренных значений скорости и высоты полета; скопления в разных частях экрана непогашенных отображений по предыдущим запросам, наложенных друг на друга; не связанные с метками формуляры сопровождения; формуляры без позывного ВС и т. д. (рис. 1, б).

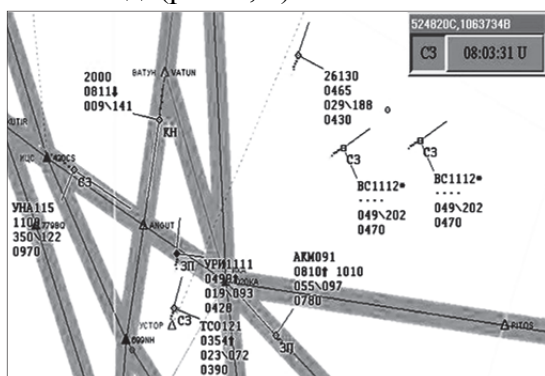


Рис. 1а. Двоение метки BC1112 на экране
Fig. 1a. Doubling the mark BC1112 on the screen

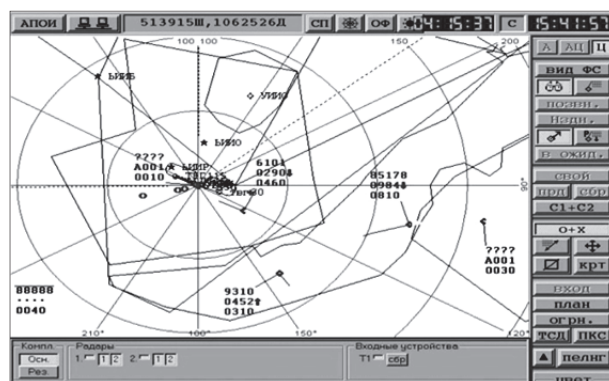


Рис. 1б. Искажения воздушной обстановки
Fig. 1b. Distortions of the air situation

Устранение рассогласований, как правило, выполняется организационными мероприятиями. Неоднозначность копий приводит к результатам, схожим по характеру с признаками недостаточной отладки ПО. Так они и идентифицируются, а средством борьбы с «деградацией» системы становится ее перезапуск. Все описания объектов создаются заново, противоречия исчезают. Однако важная часть информации при этом утрачивается. Для ее сохранения следует целенаправленно обнаруживать разночтения данных и оперативно разрешать их, а не выжидать момент наступления информационного отказа.

Поставим задачу создания алгоритма согласования данных, сопровождаемых произвольным количеством КП ПО всех бортовых и наземных компьютеров полной системы ОрВД.

ТРЕБОВАНИЯ К АЛГОРИТМУ ПОДДЕРЖАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ

Область применения алгоритма должна охватывать все фрагменты распределенной БД системы, рассредоточенные по обслуживаемым бортам и наземным центрам, осуществляющим совместную организацию потоков путем окончательного распределения ВС по месту, времени и высоте. Алгоритм (рис. 2) должен отслеживать каждый ввод в систему новых данных, выполненный любым участником совместного принятия решений, и удостоверяться в том, что произведенные изменения разосланы и получены по всем адресам, установленным дисциплиной обмена. В противном случае должна осуществляться повторная рассылка обновлений абонентам, по какой-либо причине не получившим их сразу. В отличие от запросов пропущенных сообщений в системе авиационной электросвязи, где обнаружение пропуска телеграмм производится по прибытии не-

корректно возрастающего номера сообщения, алгоритм должен самостоятельно выполнять регулярную оперативную проверку исполнения обмена. С поступлением новых данных абонент должен отправить в обратный адрес уведомление (квитанцию) о получении обновлений информации (рис. 2).

В дополнение к описанному контролю состоятельности обмена обновлениями, алгоритм должен осуществлять тотальную проверку однозначности описаний всех управляемых ВС и элементов структуры ВП в каждом фрагменте распределенной БД системы. С этой целью в каждой записи БД должны быть предусмотрены поля, предназначенные для хранения ключевых параметров, сформированных для сопоставления их значений в разных фрагментах БД. Примерами таких полей могут служить время последнего

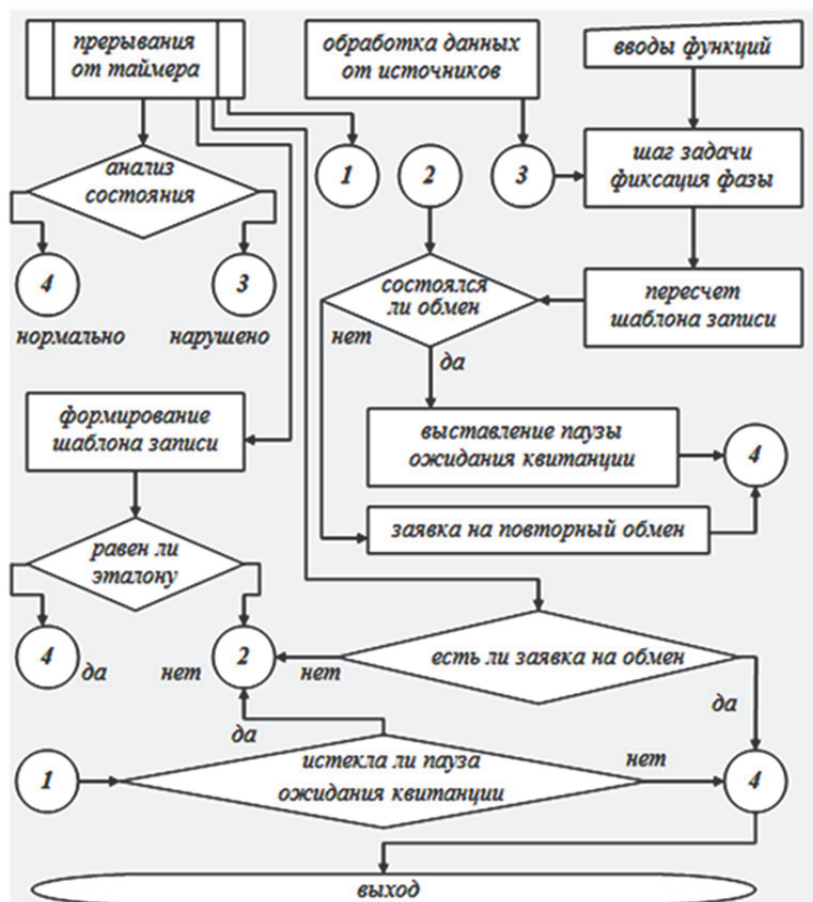


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поддержания целостности
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for maintaining integrity

го изменения записи (моменты исходного ввода в распределенную систему, а не моменты рассылки), идентификатор ВС или код элемента ВП, контрольные суммы неизменяемых парамет-

ров записи о сопровождаемом объекте и т. п. (рис. 2). Несовпадение моментов последнего изменения сигнализирует о пропуске сообщения, что инициирует его повторный запрос и посылку от составителя записи с самым поздним временем корректировки для устранения рассогласования данных в более ранних записях. К тем же последствиям приводит истечение паузы без успешного ожидания квитанции от абонента, которому источник обновлений направлял корректирующее сообщение, оказавшееся пропущенным на приемном конце, в силу чего подлежит повторной отправке абоненту, не подтвердившему прием обновлений.

При обнаружении невосстанавливаемых искажений информации об объекте в записи фрагмента БД любого участника совместного принятия решений алгоритм должен выбрать соответствующее эталонное описание в наземных или бортовых фрагментах и заменить им найденную искаженную запись.

Назначение статуса эталонов производит подсистема анализа качества работы ПО АС УВД по результатам статистической оценки показателей текущего состояния технологических процессов, составляющих обслуживание полетов. Подсистема использует ряд начальных установок, таких как приоритет координатных измерений, выполненных аппаратурой АЗН, в сравнении с радиолокационными, а прокладки траекторий методами ОРЛИ в сравнении с плановыми. Помимо использования априорных сведений, ПО производит накопление данных об областях пространства, в которых измерения одних локаторов, действующих в условиях перекрытия зон видимости, оказались более точными за период наблюдения, чем у других. Создается рациональная избыточность, позволяющая восстановить данные при их искажении.

Как следствие, предлагается трехуровневая схема согласования информации в рассредоточенных по фрагментам БД записях об управляемых объектах, обеспечивающая:

- однозначность описания параметров ВС и структуры ВП во взаимодействующих КП на основе сортировки данных по приоритетности источника (уровень 1);
- упорядочение обновлений во всех сопровождаемых копиях каждого описания ВС (в бортовых и в наземных центрах системы) за счет квитирования обмена (уровень 2);
- аутентификация прав доступа к БД и идентификация последствий программно-аппаратных сбоев и отказов обработки информации (уровень 3).

Для количественной оценки величин пауз ожидания квитанции, частоты проверок сеансов обмена, сопоставления ключевых параметров и других критериев работы алгоритма обратимся к статистике нарушения целостности данных в системах ОрВД.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕРЫ НАРУШЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ

Сгруппируем источники (риски) нарушения целостности данных в функциональных КП.

1. Отсутствие единой дисциплины изменения данных в наземном и бортовом сегментах.

Даже в локальном наземном центре ОрВД для каждого КП устанавливается собственный порядок обновления измеренных данных. Радары поставляют в центр текущие точки как результат первичной обработки радиолокационной информации (ОРЛИ). Алгоритмы вторичной ОРЛИ на основе экстраполяции измерений прокладывают наиболее вероятные (в том числе ложные) траектории движения ВС. Третичная обработка уточняет параметры движения каждого ВС по данным нескольких источников наблюдения. Все эти данные сохраняются, пока не будет принято решение о сбросе ложной траектории. В дополнение к ним по каждому ВС, оборудованному аппаратурой АЗН, сопровождаются данные спутниковой навигации. Как отмечалось выше, эти данные обладают минимальной погрешностью измерений и при формировании единой дисциплины корректировки данных должны признаваться приоритетными.

В данной статье предложена единая дисциплина (трехуровневая схема) согласования информации в рассредоточенных по фрагментам (копиям) БД записях о текущей обстановке.

2. Искажения информации вследствие аппаратных и программных сбоев.

Восстановление целостности данных, в силу непредсказуемости характера искажения в результате воздействия случайных событий, основывается на статистическом наблюдении. Обнаружить нарушение информационной целостности удастся последовательными вычислениями контрольных сумм значений полей записи об объекте и сопоставлениями со значениями, вычисленными в момент предыдущего включения процедуры. Эти же контрольные суммы используются для выравнивания содержимого копий, хранящихся на взаимодействующих компьютерах. При каждом санкционированном изменении записи, суммы пересчитываются заново, и рассогласование данных обнаруживается только в случаях, если изменения вызваны нарушениями информационно-вычислительного процесса, а не технологическими операциями.

3. Ошибки и нарушения взаимодействия экипажа и диспетчера по таким причинам, как:

- неустойчивая связь «борт – земля», либо ее отказ;
- отказы наземного и бортового оборудования систем навигации;
- погрешности горизонтальной и вертикальной навигации;
- ошибки определения местоположения ВС;
- задержки времени реакции человека и его ошибки.

Систематическую и случайную составляющие нарушений можно охарактеризовать как: погрешности:

- навигации и пилотирования ВС;
- наземной системы наблюдения.

отказы и сбои:

- бортовой навигационной системы,
- глобальной спутниковой системы,
- наземных навигационных средств,
- наземной системы наблюдения за ВС,
- линии связи удаленной передачи траекторных данных (разрыв линии),
- линии связи «борт – земля»,
- линий связи – недоставка (искажение) отдельных сообщений.

В [7, 8] и ряде других работ (отчеты по НИР и т. п.) получены вероятностные оценки влияния некоторых из этих причин на принятие решений специалистами по совместной организации потоков воздушного движения. Используется понятие «опорное ВС» как обозначение субъекта совместно принятого решения по изменению навигационных параметров движения. Вероятность α поступления неверной навигационной информации на опорное ВС от i -го абонента вычисляется по известной формуле для совместных событий:

$$\alpha = p_i + p'_i - p_i p'_i,$$

где p_i – вероятность отказа при навигационном обеспечении i -го ВС (погрешность превышает допустимые пределы), $i = 1, 2, \dots, n$; n – число ВС в зоне развития воздушной обстановки, p'_i – вероятность отказа канала связи с i -м абонентом. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Вероятности получения от абонентов неверной навигационной информации на опорном ВС
Probabilities of obtaining incorrect navigation information on the pivotal aircraft from subscribers

Отказ навигационного обеспечения ВС ($\alpha = 0$)	N_1	n_1	N_2	N_2	p
	50	2	100	2	$8,98 \cdot 10^{-4}$
Отказ линии передачи данных	N'_1	n'_1	N'_2	N'_2	p'
	$\alpha_1 = 0$		$\alpha_2 = 0$		$7,5 \cdot 10^{-2}$
Ошибка на опорном ВС	30	1	30	2	$7,39 \cdot 10^{-2}$

Продолжение таблицы 1

Отказ навигационного обеспечения ВС ($\alpha = 1$)	N_1	n_1	N_2	N_2	p
	50	3	50	1	$5,99 \cdot 10^{-2}$
Отказ линии передачи данных	N'_1	n'_1	N'_2	N'_2	p'
	$\alpha_1 = 1$		$\alpha_2 = 1$		$1,85 \cdot 10^{-2}$
Ошибка на опорном ВС	30	1	30	2	$1,33 \cdot 10^{-2}$

В процессе принятия решения об изменении маршрута опорного ВС анализируется и погрешность его собственных измерений. Вероятность β_i ошибки в навигационной информации при построении маршрута движения опорного ВС определяется как

$$\beta_i = p_{on} + \alpha_i - p_{on} \cdot \alpha_i = p_{on} (1 - p_i - p'_i + p_i p'_i) + p_i + p'_i - p_i \cdot p'_i.$$

Вероятности неверного выбора маршрута опорного ВС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Вероятность наличия неверной навигационной информации для построения маршрута опорного ВС
The probability of using incorrect navigation information for constructing the pivotal aircraft route

Характеристики надёжности ВС		Вероятность p_{on} ошибок опорного ВС	Вероятность α_i получения неверных данных	Вероятность β_i применения неверной информации для выбора маршрута опорного ВС
Обозначение	Значения данных			
p_1	0,01	0,01	0,02	0,03
p'_1	0,01			
p_2	0,02	0,01	0,03	0,04
p'_2	0,01			
p_3	0,005	0,01	0,015	0,025
p'_3	0,01			
p_4	0,007	0,01	0,015	0,025
p'_4	0,008			
p_5	0,009	0,01	0,017	0,027
p'_5	0,008			

Представленные результаты расчетов не учитывают рисков неправильного выбора новой траектории ВС, т. е. статистических ошибок первого и второго рода. В рассматриваемом случае это: 1) принятие совместного решения об изменении маршрута в ситуации, когда маршрут нужно сохранить в прежнем виде, либо напротив: 2) решение о сохранении маршрута в ситуации, когда его следует изменить. Соответствующие вероятностные меры приведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Статистические ошибки первого и второго рода при построении маршрута опорного ВС
Statistical errors of the first and second kind in the construction of the pivotal aircraft route

ε_{ij} – вероятность ошибочного изменения маршрута в j -ю точку при получении неверной навигационной информации с i -го ВС					
$j \backslash i$	1	2	3	4	5
1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4
2	0,2	0,15	0,3	0,2	0,1

Продолжение таблицы 3

3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
4	0,25	0,2	0,15	0,1	0,12
5	0,3	0,4	0,1	0,25	0,11
δ_{ij} – вероятность ошибочного сохранения маршрута в j -ю точку при получении неверной навигационной информации с i -го ВС					
$j \backslash i$	1	2	3	4	5
1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,15
2	0,2	0,1	0,04	0,07	0,1
3	0,11	0,09	0,03	0,04	0,01
4	0,02	0,03	0,04	0,07	0,08
5	0,1	0,1	0,06	0,03	0,06

В табл. 4 приведены результаты расчета обобщенных взвешенных показателей потерь для точек, в которые может перейти ВС на основе данных табл. 2 и 3. Здесь у опорного ВС пять вариантов для выбора оптимальной траектории движения, а вероятность получения некорректной навигационной информации составляет $p(\Delta) = 0,2$. Параметр Δ вводится для количественной оценки факторов, не связанных с получением навигационной информации, т. е. таких, как сложность воздушной обстановки, метеоусловия, психологическое состояние пилота и т. д.

Таблица 4

Table 4

Обобщённые взвешенные показатели потерь	значение
ε_1 – вероятность неверного обновления маршрута в 1-ю точку	0,25
δ_1 – вероятность неверного сохранения маршрута в 1-ю точку	0,22
λ_1 – вес ошибки ε_1 неверного обновления маршрута в 1-ю точку	0,3
η_1 – вес ошибки δ_1 неверного сохранения маршрута в 1-ю точку	0,4
P_1 – обобщённый взвешенный показатель потерь для точки 1	0,163
ε_2 – вероятность неверного обновления маршрута во 2-ю точку	0,24
δ_2 – вероятность неверного сохранения маршрута во 2-ю точку	0,22
λ_2 – вес ошибки ε_2 неверного обновления маршрута в точку 2	0,4
η_2 – вес ошибки δ_2 неверного сохранения маршрута в точку 2	1
P_2 – обобщённый взвешенный показатель потерь для точки 2	0,316
ε_3 – вероятность неверного обновления маршрута в 3-ю точку	0,24
δ_3 – вероятность неверного сохранения маршрута в 3-ю точку	0,21
λ_3 – вес ошибки ε_3 неверного обновления маршрута в точку 3	0,6
η_3 – вес ошибки δ_3 неверного сохранения маршрута в точку 3	0,7
P_3 – обобщённый взвешенный показатель потерь для точки 3	0,291
ε_4 – вероятность неверного обновления маршрута в 4-ю точку	0,22
δ_4 – вероятность неверного сохранения маршрута во 4-ю точку	0,21
λ_4 – вес ошибки ε_4 неверного обновления маршрута в точку 4	0,7
η_4 – вес ошибки δ_4 неверного сохранения маршрута в точку 4	0,8
P_4 – обобщённый взвешенный показатель потерь для точки 4	0,322
ε_5 – вероятность неверного обновления маршрута в 5-ю точку	0,23
δ_5 – вероятность неверного сохранения маршрута во 5-ю точку	0,21
λ_5 – вес ошибки ε_5 неверного обновления маршрута в точку 5	0,5
η_5 – вес ошибки δ_5 неверного сохранения маршрута в точку 5	0,9
P_5 – обобщённый взвешенный показатель потерь для точки 5	0,304

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ

Алгоритм контроля целостности данных, обсуждавшийся выше, основан на:

- периодической проверке идентичности рассредоточенных описаний управляемых объектов и элементов системы путем сопоставления их ключевых параметров;
- проверке фактического исполнения рассылки санкционированных изменений записей во взаимодействующие бортовые и наземные фрагменты (копии) распределенной БД по событиям обновлений информации на основе квитирования обмена;
- замещении искаженной записи, обнаруженной в каком-либо фрагменте БД, ее эталонной копией, сопровождаемой подсистемой текущего анализа качества работы ПО.

Выполнение перечисленных операций связано с применением громоздких вычислительных процедур и длительными паузами обмена данными через системы спутниковой связи, что ставит в качестве важной задачи построение стратегии контроля информационной безопасности и целостности, нацеленной на оптимизацию затрат ресурсов времени, необходимых для работы алгоритма. Проверки осуществляются в соответствии с дисциплиной приоритетной очередности, что позволяет улучшить показатели времени ожидания обслуживания записей путем динамического управления длиной очередей с помощью их оперативного перераспределения.

Будем исследовать модель процесса в векторном информационном пространстве БД, в котором записи представляются векторами $\bar{X}$ с координатами $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_J$. Каждая такая координата эквивалентна числовому выражению длины пути доступа к записи по каждому из входящих в нее атрибутов, где $j = \overline{1, J}$ – порядковый номер атрибута, J – количество атрибутов записей. В своей совокупности векторы отображают достижимость данных, их количество N равно числу записей, хранящихся в распределенной БД. В [6] аналогичная модель анализируется на примере адресации непосредственной расстановкой, что позволяет оценивать качество управления в каждый момент t длительностью доступа (временем прохождения или длиной пути поиска) к искомым записям. Необходимая размерность вектора $\bar{X}_{NJ}(t)$ состояния системы определяется количеством J атрибутов, используемых как вторичные ключи, т. е. как пути (частичные очереди) доступа к записи: $\bar{X}_{NJ}(t) = \{x_{N1}(t), \dots, x_{NJ}(t)\}$. Тогда, задавая либо предельно допустимую длину L_0 для всех путей доступа, либо последовательность $\{L_{0j}\}$ для каждого пути, можно в качестве оценки текущего состояния системы принять $\max_j \frac{\bar{X}_{NJ}(t)}{L_{0j}} \leq 1$.

Если в произвольный момент t_i значение хотя бы одной координаты вектора $\bar{X}_{NJ}(t_i)$ превзойдет установленный ей предел L_{0j} , то подобный выброс сигнализирует о необходимости оперативного регулирования процесса, позволяющего восстановить нарушенную меру состояния. Вмешательство (регулирование) осуществляется либо по событию ввода новой (или обновления устаревшей) записи и установления путей доступа к содержащимся в ней атрибутам, либо периодической процедурой анализа текущих значений L_{0j} . Ввод по событиям требует меньших затрат вычислительных ресурсов. Периодический контроль более универсален и может использоваться на всех уровнях поддержания целостности данных. Каждый акт регулирования состоит в перераспределении запросов очередей, что обеспечивает превышение L_{0j} над $\bar{X}_{NJ}(t)$. Длительность процедуры реорганизации частичных очередей проверяемых записей зависит от суммарной длины пути доступа. Если наряду с последовательностью предельных величин $\{L_{0j}\}$ задать последовательность критических уровней L_{cj} , $L_{cj} < L_{0j}$, то предупредительное регулирование очереди следует производить уже при нарушении условия $\bar{X}_{NJ}(t) \leq L_{cj}$.

Для формализации процедур контроля обозначим затраты времени: на оперативное регулирование как T_0 ; на предупредительное – T_p ($T_0 > T_p$); на вычисление длины пути доступа –

$$\hat{T}_{\Sigma} = \hat{T}_{\Sigma}(\Delta t, \hat{L}_{c1}, \dots, \hat{L}_{cj}) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{T_o q_o(t) + T_p q_p(t) + T_m q_m(t)}{t}.$$
[illegible]

123

понентам $(s = \overline{1, S})$: $T_{\Sigma}^*(t) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S T_{\Sigma s}^*(t)$. Если в итоге $T_{\Sigma}^*(t) < \hat{T}_{\Sigma}(t) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \hat{T}_{\Sigma s}(t)$, то новая стратегия $(\Delta t^*, L_{c1}^*, \dots, L_{cj}^*)$, независимо от количества вмешательств, предпочтительнее исходной по критерию суммарных затрат времени на процедуры контроля целостности данных.

Найденная стратегия позволяет не только создавать оптимальную последовательность регулирований, но и представить ее в виде несложных алгоритмических процедур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложена схема трехуровневого алгоритма согласования данных, сопровождаемых системой при реализации концепции общесистемного управления информацией, рассредоточенных в копиях бортовых и наземных компьютерных средств участников совместной организации потоков воздушного движения. Логика работы алгоритма основана на том, чтобы в процессе возрастания разноточений данных в рассредоточенных взаимодействующих фрагментах распределенной базы данных не доводить процесс до потери целостности, предвещающей информационный отказ программного обеспечения, но своевременно выявлять и устранять эту угрозу. Для разработки соответствующих функций анализируются возможные причины нарушений целостности, предлагаются критерии обнаружения рассогласований и выстраивается оптимальная стратегия манипулирования данными, гарантирующая минимум затрат вычислительных ресурсов при заданном для ОрВД в целом уровне достоверности общесистемной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котов Н.А. История гражданской авиации России: учебное пособие. Часть 2. С-Пб., 2009.
2. Руководство по применению минимума вертикального эшелонирования в 300 м (1000 футов). Документ 9574 AN/934, ИКАО, Монреаль, 2002.
3. Руководство по совместной организации потоков воздушного движения. Документ 9971 AN/485, ИКАО: Монреаль, 2012.
4. Руководство по управлению общесистемной информацией. Документ 10039 AN/511, ИКАО: Монреаль, 2012.
5. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к конвенции о международной гражданской авиации. Международные стандарты и рекомендуемая практика. ИКАО: Монреаль, 2014.
6. Перебейнос С.В., Черникова М.А. Компьютерная технология нейтрализации рассогласований полетной информации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 136. С. 22–29.
7. Затучный Д.А. Влияние ошибки при передаче информации по каналу связи на построение оптимальной траектории ВС // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 136. С. 131–136.
8. Барановский А.М. Сопоставительная оценка показателей качества функционирования аэронавигационных систем Евросоюза и России на 2020 год // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209, С. 45–49.
9. Барзилович Е.Ю. и др. Метод предупреждения отказов в сложных авиационных радиоэлектронных системах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2003. № 63. С. 13–20.
10. Рудельсон Л.Е. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением: Учебное пособие. Часть I. Системное программное обеспечение. Кн. 3. Управление периферией и связью. М.: МГТУ ГА, 2008.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рудельсон Лев Ефимович, д.т.н., профессор, МГТУ ГА, l-rudelson44@yandex.ru.

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

Степаненко Анастасия Сергеевна, ст. преподаватель МГТУ ГА, xumeraass@mail.ru.

STRATEGY OF DATA INTEGRITY CONTROL FOR SYSTEM WIDE INFORMATION MANAGEMENT CONCEPT

Lev E. Rudel'son¹, Stanislaw N. Smorodskiy², Anastasia S. Stepanenko¹

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

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

ABSTRACT

The growth in demand for air transportation services is steadily ahead of the capacity of carriers. The most advanced aviation empires set a goal to triple the capacity of the current air traffic management system by the mid-twenties. The technical basis for such achievements is equipping all aircraft with automatic dependent surveillance broadcast systems, which provides both control over the parameters of their movement anywhere in the world, and reliable mutual exchange of verified information on the air picture and forecasts of its development between all pilots and ground services.

The concepts of collaborative decision-making on air traffic flows management and System Wide Information Management, suggested by ICAO experts, have proclaimed the idea of the flight information availability as a means of increasing the intensity of flights, not only for considering, but also for making changes in it by all the participants of the process of organizing and servicing the flows – analysts, meteorologists, planners, air traffic controllers, pilots (in the part relating to their area). The technology of specialists' cooperation is proposed. It allows to make sensible decisions on servicing aircraft flows for the whole depth of their flights (both on routes and along free trajectories) when changing the conditions for performing flights.

The task is to develop software procedures for computer support of new concepts that ensure the integrity of aeronautical data used by all the participants in the operational organization of flows. All the interconnected elements of air traffic management (personnel and equipment) may distort the system public information with the known probability of cooperation outcomes. The article proposes a three-level algorithm for neutralizing data mismatch in the elements of a distributed network of process participants ground and on-board computing facilities, allowing in the actual time to maintain consistency of information about the current air situation and its development prospects. An optimal strategy for the algorithm application has been constructed (by the criterion of computational resource expenses).

Key words: Air Traffic Flow Management, System Wide Information Management, Collaborative Decision Making, Data Integrity Control and Rehabilitation, Algorithm for Maintaining Information Integrity.

REFERENCES

1. **Kotov N.A.** *Istorija grazhdanskoj aviacii Rossii* [History of Civil Aviation of Russia]. Text-book. Part 2. St. Petersburg, 2009. (in Russian)
2. Guidelines for the Application of a Vertical Separation Minimum of 300 m (1000 ft). Document 9574 AN/934, ICAO, Montreal, 2002.
3. Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept, Doc. 10039 AN/511, ICAO, Montreal, 2012.
4. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management, Doc. 9971 AN/485, ICAO, Montreal, 2012.
5. Aeronautical Telecommunications. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. International Standards and Recommended Practices for ICAO, Montreal, 2014.

6. Perebeynos S.V., Chernikova M.A. *Komp'yuternaja tehnologija nejtralizacii rassoglasovanij poletnoj informacii* [Computer Technology to Neutralize the Misalignment of Flight Information]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2008, No. 136, pp. 22–29. (in Russian)

7. Zatuchny D.A. *Vlijanie oshibki pri peredache informacii po kanalu svyazi na postroenie optimal'noj traektorii VS* [The Effect of an Error in the Transmission of Information over a Communication Channel to the Construction of an Optimal Flight Path]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2008, No. 136, pp. 131–136. (in Russian)

8. Baranovskiy A.M. *Sopostavitel'naja ocenka pokazatelej kachestva funkcionirovaniya ajeronavigacionnyh sistem Evrosojuza i Rossii na 2020 god* [Comparison of Estimation of Key Performance Indicators of European and Russian Air Navigation Systems for 2020 Year]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2014, No. 209, pp. 45–49. (in Russian)

9. Barzilovich E.Yu. *Metod preduprezhdenija otkazov v slozhnyh aviacionnyh radiojel'ektronnyh sistemah* [The Method of Preventing Failures in the Complex Avionics Systems]. Scientific Bulletin MSTUCA, 2003, No. 63, pp. 13–20. (in Russian)

10. Rudel'son L.E. *Programmnoe obespechenie avtomatizirovannyh sistem upravlenija vozdušnym dvizheniem* [Software for Automated Air Traffic Control Systems]. Part I. System Software. Book 3. Management of Periphery and Communication. Tutorial. M., MSTUCA, 2008. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev E. Rudel'son, Doctor of Engineering Sciences, Professor, 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.

Anastasia S. Stepanenko, Assistant Professor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, xumeraass@mail.ru.

Поступила в редакцию 21.01.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 21.01.2017
Accepted for publication 25.05.2017

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-127-134

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ
БОРТОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ
С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ
ПРИ СЕКТОРНОМ ОБЗОРЕ**

Е.Е. НЕЧАЕВ¹, К.С. ДЕРЯБИН²

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

²*ПАО «Туполев», г. Москва, Россия*

Одним из недостатков интерферометрических бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны является относительно узкая, по сравнению с аналогичными системами космического базирования, полоса обзора. Увеличение полосы обзора при боковом обзоре интерферометра возможно за счет увеличения высоты полета и угла визирования, при этом снижается точность измерения высоты из-за увеличения наклонной дальности. Другим возможным вариантом увеличения полосы обзора является использование обзора отличного от бокового. В статье рассматривается эффективность применения секторного обзора в бортовых радиолокационных станциях с синтезированием апертуры антенны в режиме интерферометрии. Приводится математическая модель и описание геометрии процесса интерферометрического измерения высоты при секторном обзоре. Проведен анализ влияния высоты подстилающей поверхности и угла наблюдения на изменение фазы отраженного сигнала. Показано, что изменение угла наблюдения вносит дополнительный вклад в изменение фазы. Проведен расчет потенциальной точности измерения высоты. Результаты расчета показывают, что увеличение угла наблюдения снижает точность измерения высоты. Максимальное снижение точности наблюдается при угле наблюдения 90°. Несмотря на некоторое снижение точности измерения высоты, применение секторного обзора позволяет расширить полосу обзора. Снижение точности измерения высоты можно ограничить путем выбора оптимальных параметров сканирования.

Ключевые слова: интерферометрические радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны, секторный обзор.

Получение цифровых моделей местности в районах с быстроменяющейся обстановкой является важной задачей для многих отраслей народного хозяйства и науки [1, 2, 4, 6].

Одним из способов получения информации о высоте местности является использование бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны в интерферометрическом режиме [3, 5, 7–11].

Основным недостатком систем, использующих в качестве носителя воздушные суда, является высокая стоимость получаемой цифровой модели местности по сравнению с аналогичными системами космического базирования из-за относительно малой полосы обзора.

Существующие интерферометрические бортовые радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны (ИФРСА) воздушного базирования для измерения высоты используют поперечную интерферометрическую базу и боковой обзор (направление максимума диаграммы направленности перпендикулярно направлению движения самолета-носителя). В этом случае ширина полосы обзора ИФРСА зависит от ширины луча, высоты полета и угла визирования. Для увеличения полосы обзора необходимо увеличивать высоту полета самолета-носителя и угол визирования, что приводит к уменьшению точности измерения высоты. Для расширения полосы обзора без изменения наклонной дальности можно использовать секторный обзор.

Секторный обзор подразумевает отклонение угла наблюдения луча антенны от значения $\frac{\pi}{2}$ в процессе сканирования (рис. 1). Рассмотрим влияние угла наблюдения на точность измерения высоты.

В процессе интерферометрической обработки ИФРСА формирует два радиолокационных изображения (РЛИ) одного и того же участка местности. Информация о высоте в конкретной точке содержится в разности фаз соответствующих пикселей двух РЛИ. Следовательно, точность измерения высоты в ИФРСА зависит от точности измерения фазы в каждой точке пары РЛИ.

Рассмотрим влияние высоты и угла наблюдения на фазу отраженного сигнала. Геометрия, описывающая это влияние, изображена на рис. 2.

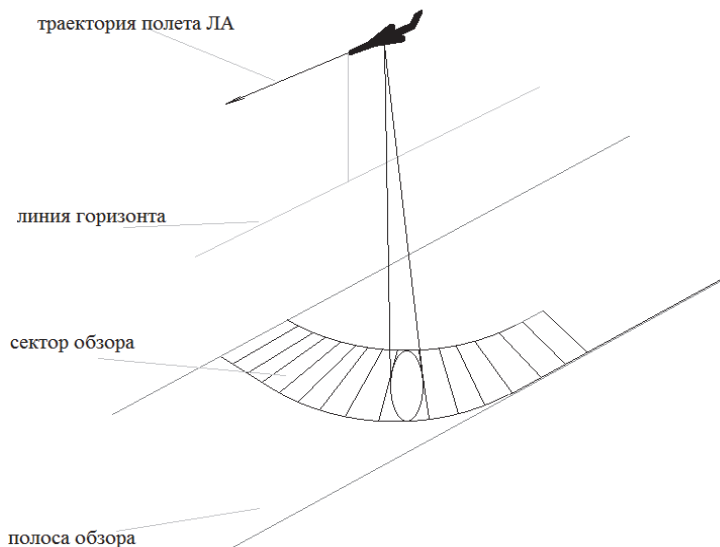


Рис. 1. Секторный обзор БРЛС
Fig. 1. Sector scan of synthetic aperture radar

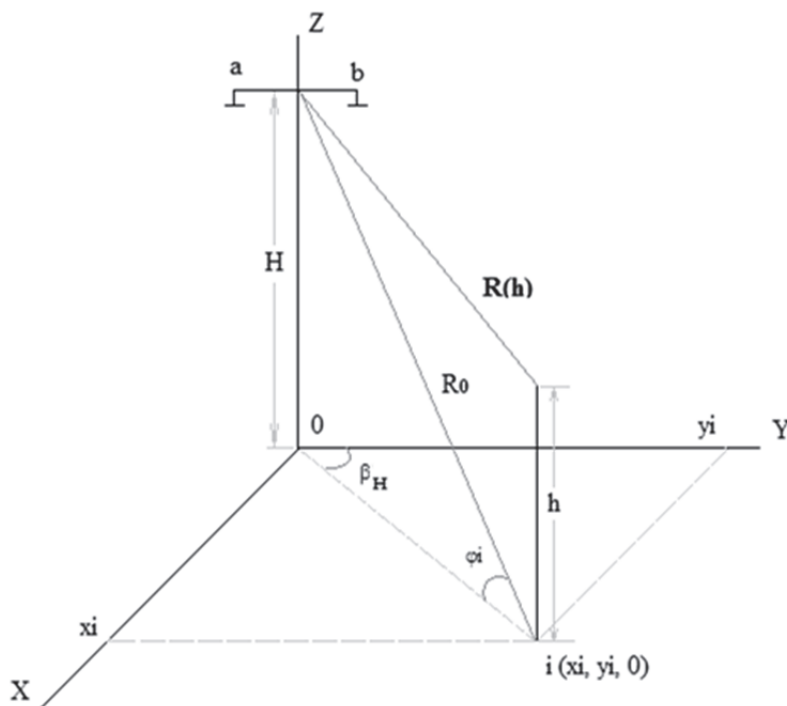


Рис. 2. Система координат ИФРСА при секторном обзоре
Fig. 2. Coordinate system of IFSAR with sector scan

Фаза принятого сигнала зависит от расстояния до цели:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} R. \quad (1)$$

Наклонная дальность до точки на поверхности референц-эллипсоида определяется следующим образом:

$$R_0 = \sqrt{H^2 + x_i^2 + y_i^2}. \quad (2)$$

При изменении высоты наклонная дальность до цели становится ее функцией [1]:

$$R(h) = \sqrt{(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2}. \quad (3)$$

Чтобы оценить влияние изменения высоты на изменение фазы принятого сигнала, продифференцируем функцию $R(h)$ относительно изменения высоты:

$$\begin{aligned} \frac{dR(h)}{dh} &= \frac{1}{2} \cdot [(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2]^{-\frac{1}{2}} \cdot (2h - 2H) = \frac{h - H}{\sqrt{(H - h)^2 + x_i^2 + y_i^2}}; \\ dR(h) &= - \left[\frac{H - h}{R(h)} \right] \cdot dh. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив $h = 0$ в (4), получим выражение, описывающее влияние высоты цели на расстояние до цели:

$$R(h) = - \left(\frac{H}{R_0} \right) \cdot dh = - \left(\frac{H \cos \beta_n \cdot \cos \varphi_i}{y_i} \right) \cdot dh. \quad (5)$$

Изменение фазы принятого сигнала будет равно

$$|d\phi| = \frac{4\pi \cdot H \cos \beta_n \cdot \cos \varphi_i}{\lambda \cdot y_i} \cdot dh. \quad (6)$$

При $\beta_n = 0$, что соответствует боковому обзору, фаза принятого сигнала будет зависеть только от высоты цели.

На рис. 3 показано влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала.

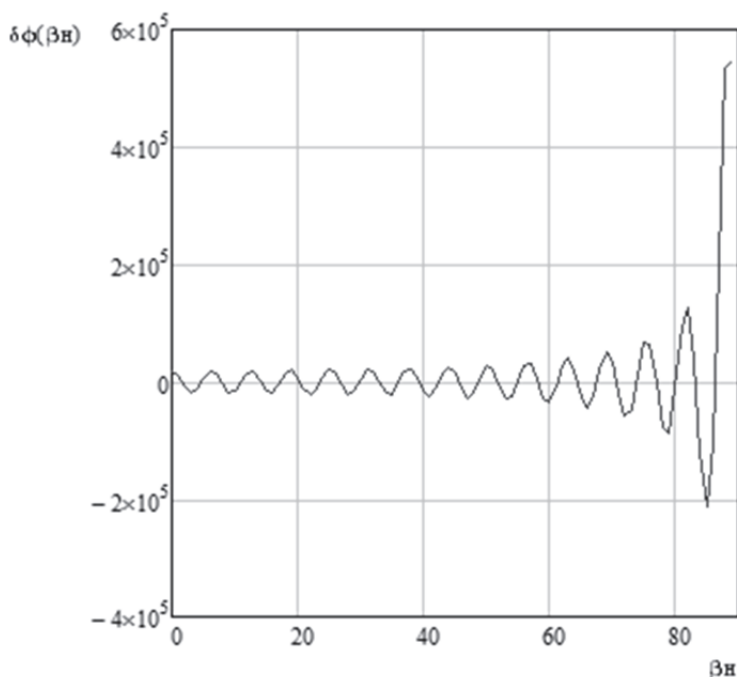


Рис. 3. Влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала
Fig. 3. Influence of the observation angle on the phase of a received signal

Определим потенциальную точность измерения высоты при различных углах наблюдения. Геометрия задачи для определения высоты изображена на рис. 4.

Проекция наклонных дальностей первой и второй антенны на плоскость YOZ соответственно будут равны

$$R_H \cdot \cos \beta_a \equiv R, \quad (7)$$

$$(R_H + \Delta R) \cdot \cos \beta_b \equiv r. \quad (8)$$

Проекция наклонной дальности первой антенны является линией равных углов. Высота цели определяется следующим образом:

$$h = H - R \cdot \sin \varphi_{\perp}. \quad (9)$$

Разность расстояний от антенн ИФРСА до цели

$$r^2 = B^2 + R^2 - 2BR \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_6). \quad (10)$$

Подставив (7) и (8) в (9) и (10) соответственно получим

$$h = H - R_H \cos \beta_a \cdot \sin \varphi_{\perp}; \quad (11)$$

$$(R_H + \Delta R)^2 = \frac{B^2 + R_H^2 \cos^2 \beta_a - 2BR_H \cos \beta_a \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_6)}{\cos^2 \beta_b}.$$

Учитывая, что $R_H \gg \Delta R$ и $R_H \gg B$ [1],

$$\Delta R \approx \frac{-B \cos \beta_a \cdot \cos(\varphi_{\perp} + \varphi_6)}{\cos^2 \beta_b}. \quad (12)$$

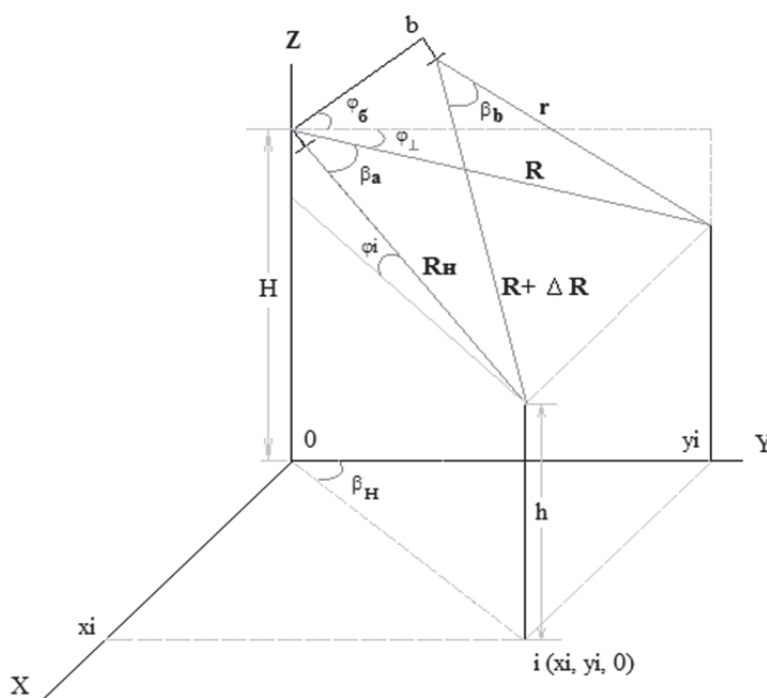


Рис. 4. Геометрия интерферометрического определения высоты
Fig. 4. Geometry of Interferometric estimation of the height

Продифференцируем измеряемую высоту h по разности наклонных дальностей ΔR :

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} = \frac{dh}{d\varphi_{\perp}} \cdot \frac{d\varphi_{\perp}}{d(\Delta R)};$$

$$\frac{dh}{d\varphi_{\perp}} = -R_{\text{H}} \cos \beta_a \cdot \cos \varphi_{\perp}; \quad (13)$$

$$\frac{d\varphi_{\perp}}{d(\Delta R)} = \frac{1}{d(\Delta R)/d\varphi_{\perp}} = \frac{B \cos \beta_a \cdot \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)}{\cos^2 \beta_b}. \quad (14)$$

Отсюда

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} = \frac{-R_{\text{H}} \cos \varphi_{\perp} \cdot \cos^2 \beta_b}{B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)},$$

$$|dh| = \frac{-R_{\text{H}} \cos \varphi_{\perp} \cdot \cos^2 \beta_b}{B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)} \cdot |d(\Delta R)|. \quad (15)$$

С учётом (12) получим

$$|dh| = \frac{\lambda R_{\text{H}} \cos \varphi_{\perp} \cdot \cos^2 \beta_b}{4\pi B \sin(\varphi_{\perp} + \varphi_6)} \cdot |d\phi|. \quad (16)$$

Точность измерения фазы можно представить в виде [2, с. 185]

$$|\delta\phi| = \frac{1}{\sqrt{q}}, \quad (17)$$

где q – отношение сигнал-шум.

Выразив углы β_b и $\varphi_{\perp}$ через угол наблюдения β_{H} , получим окончательное выражение оценки потенциальной точности измерения высоты

$$|dh| = \frac{\lambda R_{\text{H}} \cos \left[\arcsin \left(\frac{\sin \beta_{\text{H}} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\Delta R} \right) \right] \cdot \cos \left[\arccos \left(\frac{y_i}{R_{\text{H}} \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \beta_{\text{H}} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R_{\text{H}}} \right) \right)} \right) \right]}{4\pi \sqrt{q} B \sin \left[\left(\frac{y_i}{R_{\text{H}} \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \beta_{\text{H}} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{R_{\text{H}}} \right) \right)} \right) + \varphi_6 \right]}, \quad (18)$$

где ΔR определяется следующим образом:

$$\Delta R = \sqrt{[x_i^2 + (y_i - B \cos \varphi_6)^2]^2 + [B \sin \varphi_6 + R_H \sin \varphi_6]^2}. \quad (19)$$

При секторном режиме обзора угол наблюдения β_H изменяется по закону [3, с. 85]

$$\beta_H(t) = \beta_0 + \int_0^t \Omega_A(\tau) d\tau, \quad (20)$$

где β_0 – начальный угол наблюдения, $\Omega_A(\tau)$ – угловая скорость перемещения луча диаграммы направленности.

Рассчитаем потенциальную точность измерения высоты для следующих условий полета: высота полета – 10000 м, наклонная дальности до цели – 18000 м, длина интерферометрической базы – 10 м, длина волны – 3,75 см, угол наклона базы – 0° , высота подстилающей поверхности постоянна – 100 м. Зависимость точности измерения высоты от угла изображена на рис. 5.

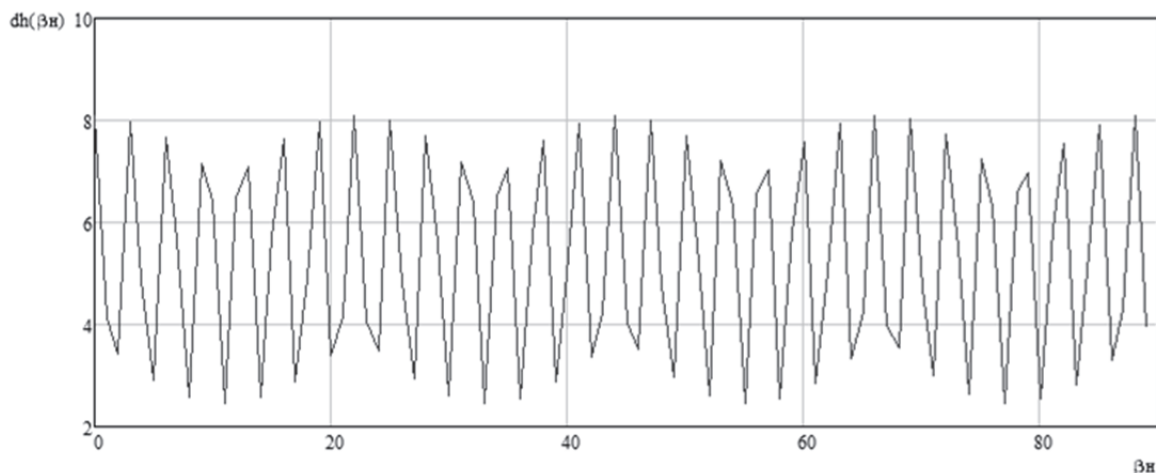


Рис. 5. График зависимости точности измерения высоты от угла наблюдения
Fig. 5. Graph of accuracy relationship between the estimation height and the observation angle

Средняя точность определения высоты для данных условий составляет ~ 7 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Максимальное влияние угла наблюдения на фазу принятого сигнала будет при угле наблюдения 90° .
2. Полученные результаты измерения потенциальной точности показывают возможность работы ИФРСА с использованием секторного обзора.
3. Уменьшение точности измерения высоты, вызванное изменением угла наблюдения, можно ограничить путем выбора оптимальных параметров сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mark A.R.** A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE A&E Systems Magazine, vol. 22, N 9, 2007.
2. Авиационные системы радиовидения. Монография / В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев, Е.Е. Колтышев, Г.С. Кондратенков, А.А. Лавров, А.Ю. Фролов, В.Т. Янковский: под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015.

3. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988.
4. Бакулев П.А. Радиолокационные станции. М.: Радиотехника, 2004.
5. Кондратенков Г.С. Радиолокационные станции обзора Земли / Г.С. Кондратенков, В.С. Потехин и др. М.: Радио и связь, 1983.
6. Дудник П. И. Многофункциональные радиолокационные системы: учеб. пособие для вузов / П.И. Дудник, А.Р. Ильчук и др. М.: Дрофа, 2007.
7. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учеб. пособие. СПб., 1999.
8. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / пер. с нем. М.: Мир, 1988.
9. Елизаветин И.В. Условия получения космическим РСА стереоизображений для построения цифровых моделей // Исследования Земли из космоса. 1994. No. 3.
10. Доросинский Л.Г., Лысенко Т.М. Классификация пространственно-распределенных объектов по данным РЛС бокового обзора // Радиотехника. 1996. No. 3.
11. Пресняков А.Н. Радиолокационное обнаружение наземных малоразмерных неоднородностей // Радиотехника. 1996. No. 6.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Дерябин Кирилл Сергеевич, аспирант кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, deryabin88@bk.ru.

CHARACTERISTICS OF AIRBORNE INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR WITH SECTOR SCAN

Evgenii E. Nechayev¹, Kirill S. Deryabin²

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

²*Production joint-stock company "Tupolev", Moscow, Russia*

ABSTRACT

One of the drawbacks of airborne interferometric synthetic aperture radar is a relatively narrow swath compared to analogous space based systems. Increasing the swath with side view of the interferometer can be possible by increasing the flight altitude and angle of sight. At the same time the height measurement accuracy decreases due to slant range distance increase. Another possible way of swath increasing is using sector scan. The efficiency of sector scan using in interferometric synthetic aperture radar is analyzed in this paper. The mathematical model and geometry of height measurement at a sector scan have been discussed. There was made an analysis of the effect of terrain height and observation angle on received signal phase changing. Observation angle changing is shown to contribute to the phase changing. Potential height accuracy measurement was calculated. The calculation results show that increasing the observation angle reduces height accuracy measurement. The maximum accuracy decrease is obtained at the observation angle of 90°. Despite height accuracy measurement decrease applying the sector scan allow to expand the swath. The accuracy decrease can be limited by selecting optimal parameters of scanning.

Key words: interferometric synthetic aperture radar, sector scan.

REFERENCES

1. Mark A.R. *A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing*. IEEE A&E Systems Magazine, 2007, vol. 22, no. 9.

2. Antipov V.N., Vikentiev A.Yu., Koltashev E.E., Kondratenkov G.S., Lavrov A.A., Frolov A.Yu., Yankovsky V.T. *Aviatsionnye sistemyi radiovideniya* [Aviation system radiovideniya]. M., Radiotekhnika 2015. (in Russian)
3. Antipov V.N., Gorjainov V.T., Kulin A.N. *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury antennoi* [Radar stations with digital synthetic aperture antenna]. M., Radio i svyaz, 1988. (in Russian)
4. Bakulev P.A. *Radiolokacionnye stantsii* [Radar]. M., Radiotekhnika, 2004. (in Russian)
5. Kondratenkov G.S. *Radiolokacionnye stantsii obzora Zemli* [Radar earth observation]. M., Radio i svyaz, 1983. (in Russian)
6. Dudnik P.I. *Mnogofunktsionalnye radiolokacionnye sistemy. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Multifunctional radar system. The allowance for high schools]. M., Drofa, 2007. (in Russian)
7. Neronskii L.B., Mihailov V.F., Bragin I.V. *Mikrovolnovaya apparatura distantsionnogo zondirovaniya poverhnosti Zemli i atmosfery. Radiolokatori s sintezirovannoi aperturoi antennoi. Ucheb. Posobie. SPb., SPb. GU AP*, 1999. (in Russian)
8. Kronberg P. *Distantsionnoe izuchenie Zemli. Osnovi i metody distantsionnykh issledovaniy v geologii* [Remote study of the Earth. Fundamentals and methods of remote sensing methods in Geology]. Per. s nem. M., Mir, 1988. (in Russian)
9. Elizavetin I.V. *Usloviya polucheniya kosmicheskikh RSA stereoizobrazhenii dlya postroeniya cifrovih modelei. Issledovaniya Zemli iz kosmosa* [The Conditions for obtaining a space RSA images for building digital models]. Earth exploration from space, 1994, No. 3. (in Russian)
10. Dorosinskii L.G., Lisenko T.M. *Klassifikatsiya prostranstvenno-raspredelevennykh obektov po dannim RLS bokovogo obzora* [Classification of spatially - distributed objects according to the side-looking radar]. Radiotekhnika, 1996, No. 3. (in Russian)
11. Presnyakov A.N. *Radiolokacionnoe obnaruzhenie nazemnykh malorazmernykh neodnorodnostei* [Radar's detection of small ground-based inhomogeneities]. Radiotekhnika, 1996, No. 6. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenii E. Nechayev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Air Traffic Control Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation (MSTUCA), eenetchayev@mail.ru.

Kirill S. Deryabin, Postgraduate student of Air Traffic Control Chair, MSTUCA, Engineer of Production Joint-Stock Company "Tupolev", deryabin88@bk.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 28.02.2017
Accepted for publication 25.05.2017

ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ВОЗДУШНЫХ СУДАХ

С.Б. СТУКАЛОВ¹, Д.С. СТУКАЛОВ², В.И. КОНДРИКОВ³

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

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

³Открытое акционерное общество «ЛИК», г. Москва, Россия

Рассматриваются вопросы по развитию и практическому применению на воздушных судах гражданской авиации бортовых оптико-электронных систем, обеспечивающих получение информации видения пилоту в полете днем и ночью в простых и сложных метеоусловиях. Представлены нормативно-правовые документы, устанавливающие требования по применению подобного типа оптико-электронных систем на воздушных судах. Проанализирована классификация бортовых оптико-электронных систем, объединенных общим названием электронных систем визуализации. Рассмотрены пути реализации рекомендаций по их построению. Проанализированы возможности систем разных классов: систем улучшенного видения (Enhanced Vision Systems (EVS)), систем искусственного видения (Synthetic Vision Systems (SVS)), комбинированных систем искусственного видения (Combine Vision Systems (CVS)) и бортовых систем технического зрения с расширенными возможностями визуализации Enhanced Flight Vision Systems (EFVS)). Указано, что в настоящее время к системам перспективного применения относят системы класса EVS. С целью анализа возможностей практического применения таких систем в задачах обеспечения безопасности полета на малых высотах и посадки были проведены летные эксперименты системы, установленной на легком вертолете. Представлены результаты летных экспериментов по практической работе телевизионного и инфракрасного каналов видения типовой перспективной системы визуализации в простых и сложных условиях наблюдения. На основании результатов летных экспериментов сделаны выводы о целесообразности практического применения электронных систем визуализации на воздушных судах для обеспечения безопасности полета. Установлено, что системы можно применять при полете как для задач наблюдения, обследования местности, так и обеспечения безопасного полета. При полете вертолета на малых высотах и выполнении посадки пилоту целесообразно использовать от оптико-электронной системы визуализации информацию видения со стороны задней полусферы нижней хвостовой части. Выявлено, что в работе инфракрасного (ИК) канала и быстрых поворотах камеры системы визуализации проявляется запаздывание соответствия направлений видения и реального полета. Проявляется размытие изображения видения. В режиме регистрации информации ИК-спектра возникает проблема фильтрации помех, вызванных появлением в секторе наблюдения выхлопных газов двигателя вертолета, снега. Это затрудняет получение преимущества видения систем визуализации в сложных метеоусловиях. В выводах указано, что в перспективных системах визуализации для ИК каналов требуется дополнительное использование методов и алгоритмов обеспечения высокой четкости изображения видения.

Ключевые слова: воздушные суда, электронные системы визуализации, летный эксперимент, качество изображения, безопасность полета, посадка воздушных судов.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обеспечения безопасности полётов воздушных судов (ВС) требует развития направлений по совершенствованию бортовых систем видения. Для экипажа ВС одним из наиболее важных источников информации является канал зрительного восприятия [1, 3]. Вследствие этого задачи разработки бортовых систем видения для ВС воздушного транспорта являются актуальными.

Статья 37 Воздушного кодекса Российской Федерации N 60-ФЗ от 19 марта 1997 г. определяет требования по обязательной сертификации гражданских воздушных судов, авиационных двигателей и воздушных винтов нового типа, беспилотных авиационных систем и их элементов. Разработка комплекса авионики самолетов гражданской авиации в настоящее время выполняется с использованием руководящих документов:

- действующей документации Авиарегистра МАК (AP МАК), EASA и FAA по нормам летной годности и сертификации авиационного оборудования;
- документов Авиарегистра МАК, FAA, EASA, ARINC, RTCA и SAE по процессам разработки, испытаний, сертификации и производства бортового оборудования.

Для формирования сертификационных требований к перспективным бортовым системам видения, устанавливаемым на борту гражданских воздушных судов, в настоящее время международными регулируемыми организациями подготовлен ряд нормативных документов (RTCA DO – 254, RTCA DO – 178B, RTCA DO – 315 и др.), которые определяют рекомендации по техническим характеристикам. Выделены типовые классы авиационных систем видения: системы улучшенного видения (Enhanced Vision Systems (EVS)), системы искусственного видения (Synthetic Vision Systems (SVS)), комбинированные системы искусственного видения (Combine Vision Systems (CVS)) и бортовые системы технического зрения с расширенными возможностями визуализации (Enhanced Flight Vision Systems (EFVS)) [2]. В настоящее время классы бортовых оптико-электронных систем объединяют в одну группу «системы визуализации».

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОСТРОЕНИЮ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

К системам класса EVS относят электронные средства обеспечения лётного экипажа изображением, полученным от датчика, или обработанное изображение внешней обстановки (рис. 1) [5, 6].

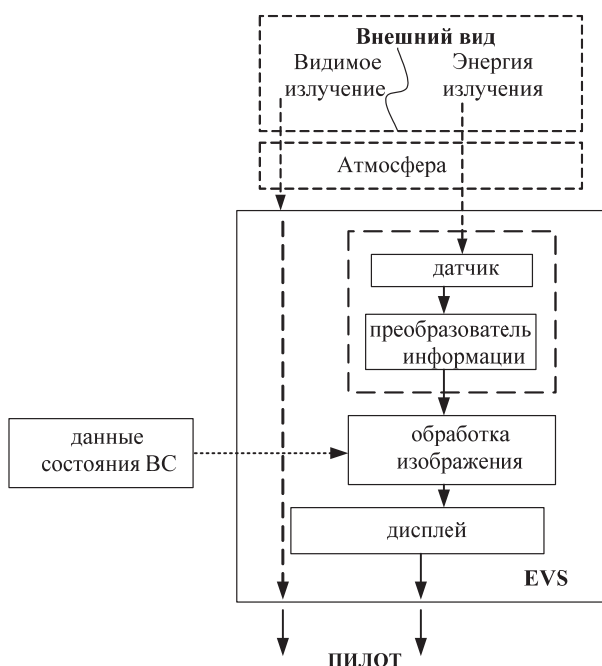


Рис. 1. Структурная схема EVS

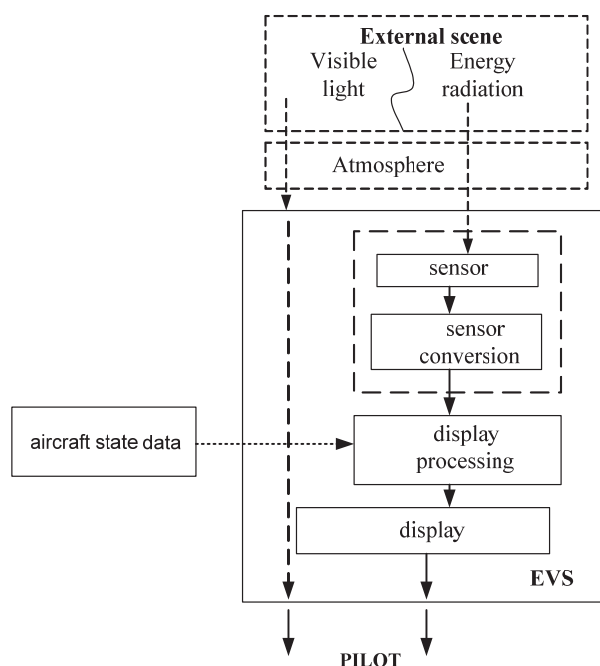


Fig. 1. Block diagram of EVS

Система EVS в качестве основы информации использует инфракрасные (ИК) датчики различных диапазонов частот, видеодатчики, которые конструктивно объединяются в камеру системы визуализации. Информация видения после обработки изображения выводится на дисплей. Пилот в режиме реального времени может наблюдать созданную системой EVS графическую информацию, которая проецируется на индикаторе лобового стекла или же на многофункциональном индикаторе, который является компьютерным дисплеем, входящим в состав бортовой системы отображения информации. Для обработки изображения могут быть исполь-

зованы данные о состоянии воздушного судна, информация от бортовых радиолокационных станций, лазерных локационных средств, параметров навигации баз данных рельефа поверхности вдоль полетного маршрута и баз данных о местоположениях аэропортов и объектов взлетно-посадочной полосы и другие.

Камеры систем визуализации систем EVS технически размещают на гиростабилизированных платформах (рис. 2, 3).

В настоящее время системы класса EVS применяют в основном для решения задач обследования местности, поисково-спасательных операций и правоохранительной деятельности и др. [4].



Рис. 2. Камера системы класса EVS
Fig. 2. The camera of EVS class system



Рис. 3. Размещение камеры системы класса EVS на гиростабилизированной платформе
Fig. 3. Camera placement of EVS class system on the gyro-stabilized platform

К системам искусственного видения (SVS) относят электронные средства для вывода на дисплей сформированного вычислителем изображения. Это изображение соответствует видимому из кабины пилота, но оно вычисляется по ориентации ВС в пространстве, по высоте, географическим координатам ВС и базе данных. Изображение от систем искусственного видения может выводиться на основной пилотажный дисплей (рис. 4) [7, 8].

Система комбинированного видения (CVS) является комбинацией каналов искусственного видения (SVS) и улучшенного видения (EVS). Современные разработки предусматривают получение искусственного изображения для полета на больших высотах и улучшенное изображение для полета на малых высотах. В CVS изображения искусственного вида могут быть получены из базы данных в комбинации с изображениями реальных датчиков, наложенными и согласованными на тот же дисплей.

Системы с расширенными возможностями визуализации EFVS позволяют кроме улучшенных изображений внешней среды по направлению полета дать информацию рельефа местности, взлетно-посадочной полосы, обнаружения и отображения опасных препятствий, точной навигации, контроля работоспособности.



Рис. 4. Перспективная типовая система искусственного зрения на пилотажном дисплее
Fig. 4. The prospect typical system of artificial vision on the flight display

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В настоящее время к системам перспективного применения относят системы класса EVS. Для анализа возможностей практического применения таких систем и задач обеспечения безопасности полета на малых высотах и посадки были проведены летные эксперименты. Оценивалась практическая работа телевизионного и ИК каналов видения перспективной системы визуализации в простых и сложных условиях наблюдения. Эксперименты проводились в зимний период (январь) днем с 14 до 16 часов и в ночное время с 19 до 22 часов [5]. В качестве воздушного судна был использован легкий вертолет. Камера системы визуализации (рис. 5) устанавливалась на гиросtabilизированной платформе.

В ходе летного эксперимента решались следующие задачи.

1. Анализ необходимости получения информации видения для пилота вертолета со стороны задней полусферы.
2. Анализ качества полученной информации видения в полете воздушного судна (вертолета) в простых и сложных условиях видения.



Рис. 5. Камера системы визуализации
Fig. 5. The imaging system camera

Для получения информации видения задней полусферы вертолета камера системы визуализации направлялась в заднюю полусферу воздушного судна. Выполнялась регистрация информации видения в передней и задней полусферах при полете вертолета на малых высотах и выполнении посадки (рис. 6–11).

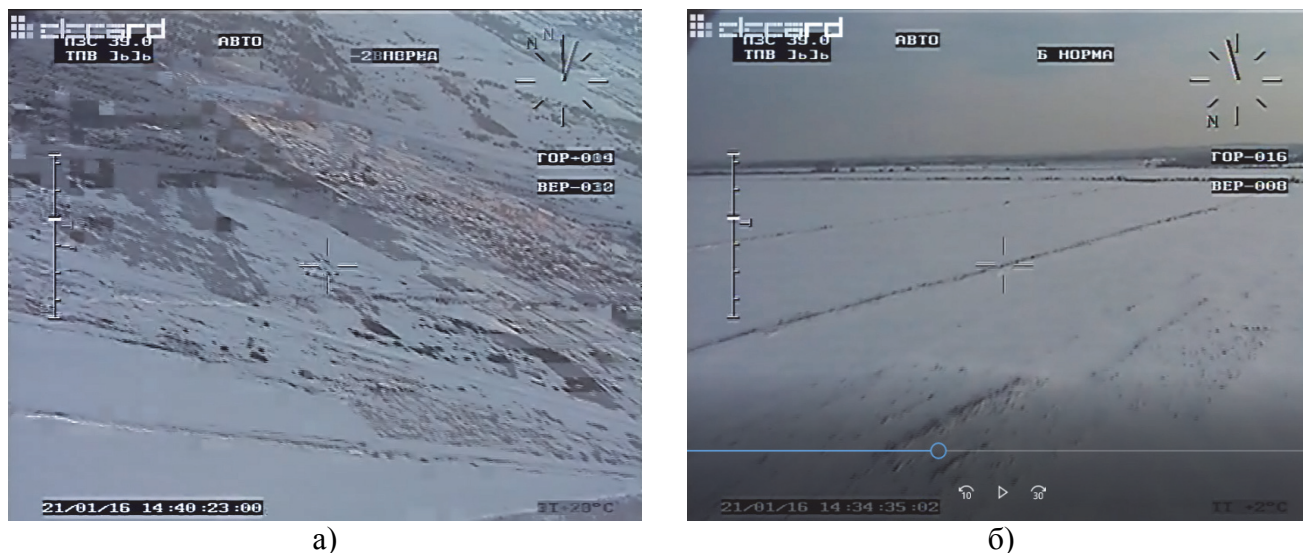


Рис. 6. Результаты регистрации информации видения со стороны передней полусферы при полете на малых высотах (а) и посадке (б)

Fig. 6. The results of vision data logging from the part of the front hemisphere when flying at low altitudes (a) and at landing (b)

Анализ всех этапов полета на малых высотах и посадки показывает, что для обеспечения безопасности полета пилоту необходима информация видения со стороны задней полусферы нижней хвостовой части вертолета. На данных регистрации видно, что хвостовая балка вертолета на малых высотах может коснуться поверхности посадки (и других объектов местности) раньше ползьев вертолета. При отсутствии системы визуализации нижняя хвостовая часть вертолета пилоту не видна. В таком случае посадка выполняется пилотом интуитивно.



Рис. 7. Результаты регистрации информации видения со стороны задней полусферы при заходе на посадку

Fig. 7. The results of vision data logging from the rear hemisphere during landing

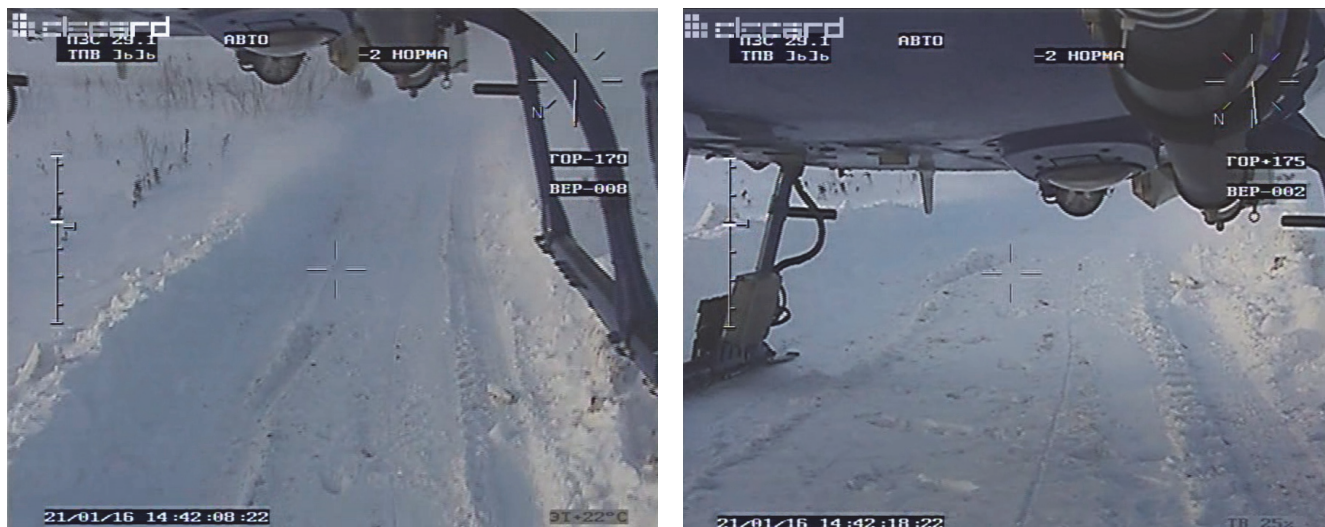


Рис. 8. Результаты регистрации информации видения со стороны задней полусферы при посадке
Fig. 8. The results of vision data logging from the rear hemisphere during landing

В ходе второй части летного эксперимента проведен анализ качества регистрации информации видения при помощи системы визуализации днем телевизионным каналом (ТВ) (рис. 6, а) и в вечернее время ИК-каналами (рис. 6, б–10).

Из полученных данных регистрации визуальной информации видно, что качество изображения достаточно хорошее при регистрации от телевизионного канала днем при простых метеоусловиях наблюдения. В вечернее время (в сложных условиях наблюдения) требуется использование для видения ИК-канала системы. В этом случае зарегистрировано ухудшение качества (рис. 9, б, 10).



Рис. 9. Результаты регистрации информации видения днем телевизионным каналом (ТВ) (а) и в вечернее время ИК каналами (б)
Fig. 9. The results of vision data logging in the afternoon with a television channel (TV) (a) and in the evening with IR channels (b)

Изображение заметно теряет качество при наличии в секторе наблюдения выхлопных газов двигателя вертолета (рис. 10, а), снега (рис. 10, б). Это связано с заметным поглощением и рассеянием регистрируемого спектра излучения ИК-диапазона.

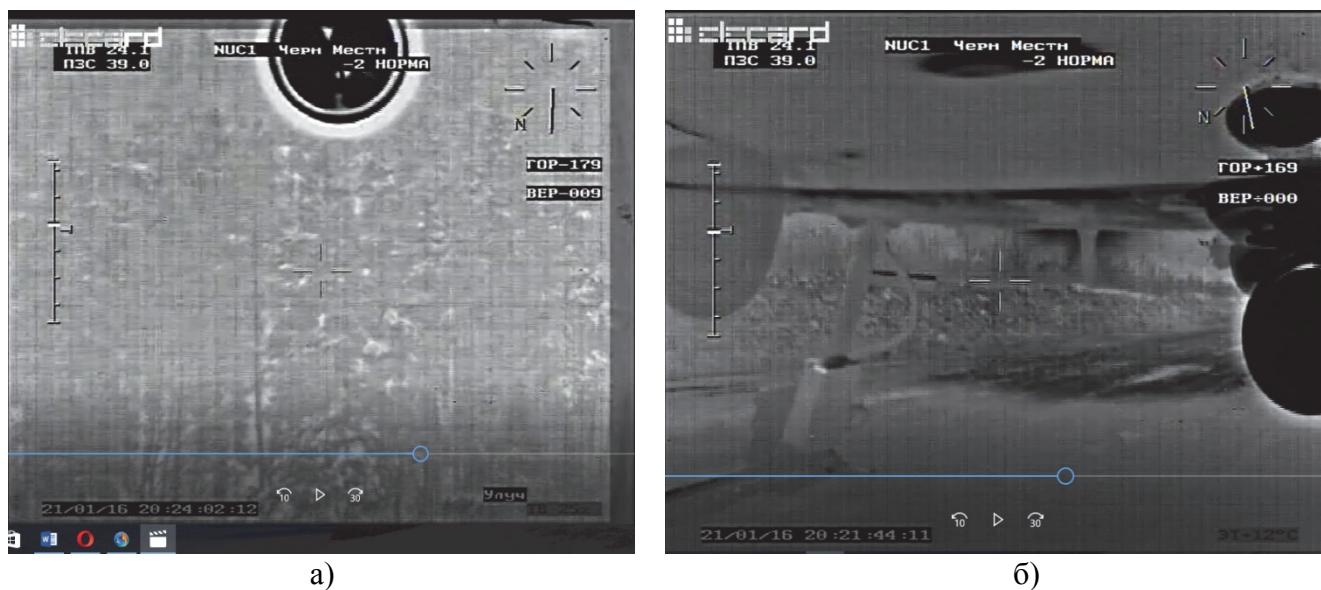


Рис. 10. Результаты регистрации информации видения ИК-каналом при наличии в секторе наблюдения снега (а) и выхлопных газов двигателя вертолета (б)

Fig. 10. The results of infrared vision data logging with IR channel with snow (a) and helicopter engine exhaust (b) available in the observation sector

При движении относительно анализируемой площадки происходит смазывание и размытие изображения (рис. 11). При высоких скоростях поворота камеры проявляется несоответствие видения и направления полета вертолета. Из рис. 10, 11 видно, что в ИК-канале системы визуализации возникает проблема фильтрации помех в режиме регистрации информации наблюдения ИК-диапазона спектра излучения. Это затрудняет получение преимущества видения систем визуализации в сложных метеоусловиях.

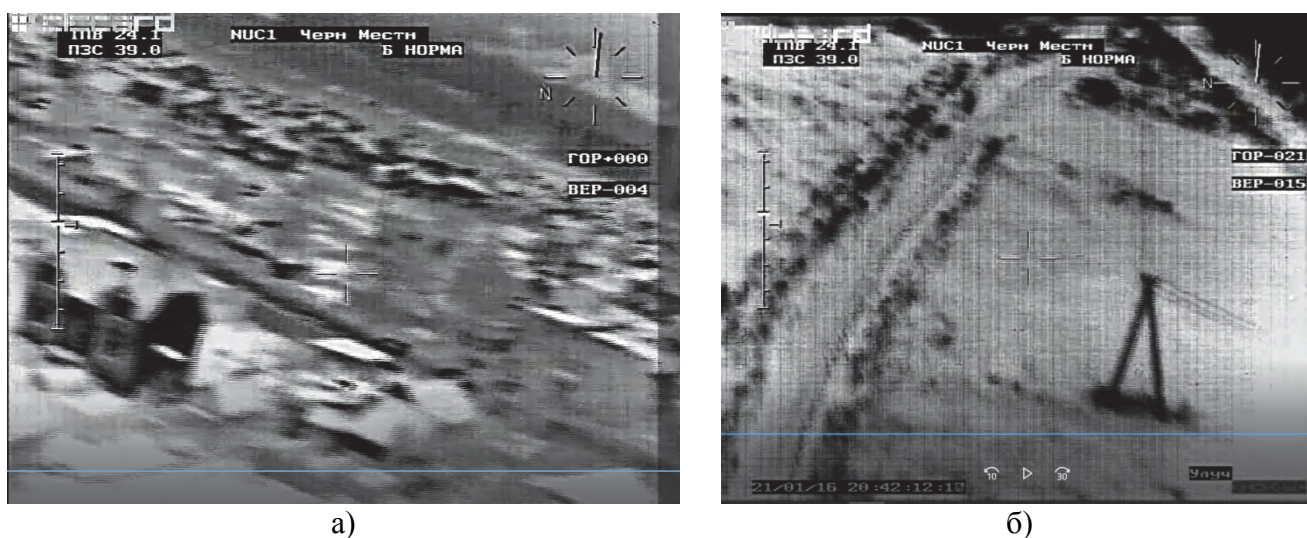


Рис. 11. Размытие изображений в движении

Fig. 11. Blur of images in motion

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В ходе летных экспериментов подтверждена необходимость практического применения электронных систем визуализации на воздушных судах. Системы можно применять как для задач наблюдения, обследования местности при полете, так и обеспечения посадки вертолета.
2. Для обеспечения безопасности полета вертолета на малых высотах и при выполнении посадки пилоту необходима информация видения со стороны задней полусферы нижней хвостовой части.
3. При работе ИК-канала и быстрых поворотах камеры проявляется запаздывание соответствия направлений видения и реального полета.
4. При работе ИК-канала возникает размытие изображения видения.
5. В ИК-канале возникает проблема фильтрации помех в режиме регистрации информации ИК-спектра. Это затрудняет получение преимущества видения систем визуализации в сложных метеоусловиях.
6. В перспективных системах визуализации для ИК-каналов требуется дополнительное использование методов и алгоритмов обеспечения высокой четкости изображения видения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стукалов С.Б., Бабаев В.Г. Перспективные направления применения систем видения на воздушных судах // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов участников научно-технической конференции, посвященной 45-летию университета. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 138.
2. Стукалов С.Б., Стукалов А.С. Нормативное регулирование требований к бортовым системам визуализации // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов участников научно-технической конференции, посвященной 45-летию университета. М.: МГТУ ГА. 2016. С. 139.
3. Стукалов С.Б., Стукалов Д.С. Подходы по организации применения электронных систем освещения новых технологий // Проблемы безопасности российского общества. 2015. № 1. С. 110–116.
4. Диагностические и измерительные приборы. Официальный сайт компании «Мир Диагностики» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.diaworld.ru/> (дата обращения: 12.02.2017).
5. Стукалов С.Б., Лутин Э.А., Стукалов Д.С. и др. Исследование инновационных подходов применения оптико-электронных технологий на воздушных судах. Отчет о НИР № 04-15. № госрегистрации 115112310002. М.: МГТУ ГА. 2016. 61 с.
6. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. М.: КДУ, 2011. Вып. 4. С. 11–44.
7. Премиум авионики для самолетов общего назначения. Официальный сайт компании Avidyne. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.avidyne.com/> (дата обращения: 12.02.2017).
8. Многофункциональный дисплей EX600. Официальный сайт компании Avidyne [Электронный ресурс]. URL: <http://www.avidyne.com>. (дата обращения: 12.02.2017).
9. Универсальные системы авионики. Официальный сайт компании Universal Avionics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.uasc.com>. (дата обращения: 12.02.2017).
10. Интегрированная система цифрового видения. Официальный сайт компании Rockwell Collins [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rockwellcollins.com>. (дата обращения: 12.02.2017).
11. Технологии систем улучшенного/синтезированного зрения для управления летательными аппаратами. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах /

Л.Н. Костяшкин, С.И. Бабаев, А.А. Логинов, О.В. Павлов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: труды научно-технической конференции-семинара. М.: КДУ, 2011. Вып. 4. С. 45–56.

12. Обработка и анализ изображений в бортовых оптико-электронных системах. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, Л.Н. Костяшкин, Ю.Н. Романов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010: труды научно-технической конференции-семинара. М.: КДУ, 2011. Вып. 4. С. 57–62.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Стукалов Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент, профессор МГТУ ГА, stukalov@mstuca.aero.

Стукалов Дмитрий Сергеевич, магистрант РЭУ им. Г.В. Плеханова, d.s.stukalov@mail.ru.

Кондриков Вадим Игоревич, бортовой оператор ОАО «ЛИК», i.korostelina@mstuca.ru.

OPPORTUNITIES OF ELECTRO-OPTIC VISUALIZATION PRACTICAL APPLICATIONS ON BOARD THE AIRCRAFT

Sergey B. Stukalov¹, Dmitry S. Stukalov², Vadim I. Kondrikov³

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

²*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia*

³*Open Joint Stock Company "LIK", Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article covers the following issues: the development and practical application of airborne electro-optic systems in the civil aviation aircraft. They provide flight visual information for the pilot day and night in visual and instrument weather conditions. The legal documents establishing the requirements for the application of this type of electro-optic systems in aircraft are presented. The classification of airborne electro-optic systems, commonly named as electronic visualization systems is analyzed. The ways of implementing the recommendations in their construction are considered. There have been analyzed the possibilities of systems of different classes: enhanced vision systems (EVS), synthetic vision systems (SVS), combine vision systems (CVS) and on-board vision systems with advanced visualization features, Enhanced Flight Vision Systems (EFVS). It is determined that nowadays EVS systems are considered to be the potential application systems. In order to analyze the possibilities of practical application of such systems in the issues of flight safety at low altitude and landing, flight experiments of the system installed on a light helicopter were conducted. The research introduces the results of flight experiments on the practical work of television and infrared (IR) viewing channels of a promising typical system in simple and complex observation conditions. Based on the results of flight experiments, a conclusion can be made about the relevance of practical application of electronic visualization systems on board the aircraft to ensure flight safety. It is determined that the systems can be used in flight both for land observation tasks and ensuring a safe flight. When flying the helicopter at low altitude and landing procedures the pilot should use visual information from the rear hemisphere of the lower tail unit by electro-optical visualization system. It was elicited that in the infrared (IR) channel and the fast rotation of visualization system camera located there is a corresponding delay of vision direction and the actual direction of flight. The vision is blurred. In the mode of the infrared spectrum information there appears a filtering problem of interference caused by helicopter engine exhaust gases and snow in the sector of observation. It makes it more difficult to obtain the benefits of visualization systems vision in adverse weather conditions. The conclusions indicated that perspective visualization systems for IR channels require additional use of methods and algorithms to ensure high-definition vision.

Key words: aircraft, electronic visualization systems, flight experiment, picture quality, flight safety, aircraft landing.

REFERENCES

1. **Stukalov S.B., Babaev V.G.** *Perspektivniye napravleniya primeneniya sistem videniya na vozdushnykh sudakh*. [Promising areas of application of vision systems on the aircraft]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva. Sbornik tezisev dokladov uchastnikov nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashhennoy 45-letiyu universiteta. Moskva. MGTU GA* [Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society. Abstracts of the participants of the scientific and technical conference dedicated to the 45th anniversary of the university. Moscow. MSTUCA], 2016, 138 p. (in Russian)
2. **Stukalov S.B., Stukalov A.S.** *Normativnoe regulirovanie trebovaniy k bortovym sistemam vizualizatsii* [Normative regulation of the requirements for on-board systems of visualization]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva. Sbornik tezisev dokladov uchastnikov nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashhennoy 45-letiyu universiteta. Moskva. MGTU GA* [Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society. Abstracts of the participants of the scientific and technical conference dedicated to the 45th anniversary of the university. Moscow. MSTUCA], 2016, 139 p. (in Russian)
3. **Stukalov S.B., Stukalov D.S.** *Podhody po organizatsii primeneniya ehlektronnykh sistem osveshcheniya novykh tekhnologiy* [Organization of electronic lighting system application within new technologies]. *Security Problems of the Russian Society. Scientific journal*, № 1, 2015, pp. 110–116. (in Russian)
4. Diagnostic and measuring instruments. Official site of World Diagnostics. Available at: <http://www.diaworld.ru/> (accessed: 12.02.2017).
5. **Stukalov S.B., Lutin E.A., Stukalov D.S.** *Issledovanie innovatsionnykh podhodov primeneniya optiko-ehlektronnykh tekhnologiy na vozdushnykh sudakh. Otchet o NIR № 04-15. № gosregistratsii 115112310002* [Report on the research work. The study on the innovative approaches application of optoelectronic technology on the aircraft. Research report number 04-15. State registration number 115112310002]. Moscow, MSTUCA, 2016, 61 p. (in Russian)
6. **Vizilter Y.U., Geltov S.Y.** *Problemy tekhnicheskogo zreniya v sovremennykh aviacionnykh sistemakh* [Problems of Technical Vision in Aviation Systems]. *Computer vision in control systems of the mobile objects. Proceedings of the conference-workshop-2010*, Vol. 4. M., KDU, 2011, pp. 11–44. (in Russian)
7. Premium avionics for general aviation aircraft. Official site Avidyne. Available at: <http://www.avidyne.com/> (accessed: 12.02.2017).
8. Multifunction display EX600. Official site Avidyne. Available at: <http://www.avidyne.com/> (accessed: 12.02.2017).
9. Universal avionics system. The official website of Universal Avionics. Available at: <http://www.uasc.com/> (accessed: 12.02.2017).
10. Integrated system of digital vision. The official website of the company Rockwell Collins. Available at: <http://www.rockwellcollins.com/> (accessed: 12.02.2017).
11. **Kostiashkin L.N., Babaev S.I., Loginov A.A., Pavlov O.V.** *Tekhnologii sistem uluchshennogo/sintezirovannogo zreniya dlya upravleniya letatel'nyimi apparatami. Problemy tekhnicheskogo zreniya v sovremennykh aviacionnykh sistemakh* [Aircraft control enhanced vision systems technologies]. *Computer vision in control systems of the mobile objects. Proceedings of the conference-workshop-2010*, Vol. 4. M., KDU, 2011, pp. 45–56. (in Russian)
12. **Alpatov B.A., Babayan P.V., Kostyashkin L.N., Romanov Yu.N.** *Obrabotka i analiz izobrazhenij v bortovykh optiko-ehlektronnykh sistemakh. Problemy tekhnicheskogo zreniya v sovremennykh aviacionnykh sistemakh* [Image processing and analysis in vehicle-borne optical-electronic systems]. *Computer vision in control systems of the mobile objects. Proceedings of the conference-workshop-2010*, Vol. 4. M., KDU, 2011, pp. 57–62. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey B. Stukalov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Full Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, stukalov@mstuca.aero.

Dmitry S. Stukalov, Master Student of Plekhanov Russian Economic University, d.s.stukalov@mail.ru.

Vadim I. Kondrikov, Board Cameraman of OJSC "LIC", i.korostelina@mstuca.ru.

Поступила в редакцию 23.01.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 23.01.2017
Accepted for publication 25.05.2017

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-146-155

**ПРОЕКТЫ САНИТАРНО-ЗАЩИТНЫХ ЗОН АЭРОПОРТОВ,
АЭРОДРОМОВ, ВЕРТОДРОМОВ И ПОСАДОЧНЫХ ПЛОЩАДОК
КАК ОСНОВА ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ИХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ**

О.А. КАРТЫШЕВ¹, Н.И. НИКОЛАЙКИН²

¹*Центр экологической безопасности гражданской авиации, г. Москва, Россия*

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

Анализируется десятилетний опыт разработки проектов санитарно-защитных зон отечественных аэропортов в гражданской авиации на основании требований СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, выявлены причины снижения качества проектных работ и затягивания сроков согласования на завершающей стадии разработки. Показано, что к числу основных причин сложившейся негативной ситуации с разработкой и согласованием проектов относятся: отсутствие в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 механизма проверки расчетных границ зон и контуров авиационного шума методами натурных исследований; порядка внесения корректировок в проект; регламента установления окончательных размеров санитарно-защитных зон аэропорта. Приведены примеры как завышенных, так и заниженных размеров шумовых зон и зон рассеивания загрязняющих веществ и причины заинтересованности в этом аэропортов, органов Роспотребнадзора и местных органов власти.

Обосновываются концептуальные положения, которые следует использовать в редакции нового нормативного документа санитарного законодательства России, регламентирующего разработку проектов санитарно-защитных зон аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок. Новый документ позволит учитывать разнообразные факторы негативного воздействия на окружающую среду при эксплуатации аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок.

Предлагается ввести понятие «оперативная карта заданного индекса авиационного шума», чем будет решаться задача легитимизации учета пролетного авиационного шума в государственном кадастре недвижимости. Даны предложения по величинам эквивалентных и максимальных уровней звука, создаваемого на селитебной территории городов и поселков городского типа при пролетах и наземной эксплуатации воздушных судов. Нормативы предложено гармонизировать с аналогичными международными правилами, они должны предусматривать градацию зон по 5 дБА.

Даются итоговые предложения по учёту выявленных недостатков, сформулированы требования к составу разделов проекта санитарно-защитных зон, вносятся предложения по установлению гигиенических нормативов авиационного шума на приаэродромной территории аэропортов.

Ключевые слова: аэропорт, территория, санитарно-защитная зона, защита окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ

Недопонимание учета специфики воздействия воздушных судов (ВС) на окружающую среду (ОС) и работы воздушного транспорта, отсутствие единообразного порядка разработки проектов санитарно-защитных зон (СЗЗ) аэропортов и требований к проведению их экспертизы сдерживает разработку проектов СЗЗ, сказывается на их качестве, а также ведёт к затягиванию сроков согласования выполненных проектов. По заключению Минэкономразвития от 17.01.2013 об экспертизе Постановления Главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 № 74 о введении в действие новой редакции СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [1] в ряде случаев эти сроки затягиваются на 4–7 лет.

Проекты СЗЗ в целом, повышенные требования, предъявляемые к ним, порядок их экспертизы и согласования, в частности, затрагивают интересы соответствующих авиационных объектов в связи с оценкой его применения на будущую деятельность отдельных предприятий и промзоны крупных аэропортов, которые отличаются своими характеристиками, типами принимаемых ВС, оснащённостью и прочими производственными показателями.

В настоящее время формируются требования к новому нормативному документу, который должен заменить СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [1]. Необходимо проанализировать накопленный в гражданской авиации (ГА) опыт практического применения действующего документа в части разработки проектов СЗЗ аэропортов, разработать предложения по учёту выявленных недостатков, сформулировать требования к составу разделов проекта, а также внести предложения по установлению гигиенических нормативов авиационного шума на приаэродромной территории аэропортов.

На основании анализа опыта разработки проектов СЗЗ аэропортов, выполненных в 2007–2016 гг., предлагается нижеизложенное обоснование концептуального подхода к созданию нового нормативного документа, регламентирующего разработку проектов СЗЗ.

РАБОТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО ОБОСНОВАНИЮ РАЗМЕРОВ ЗОН

Проведенный анализ качества выполненных проектов СЗЗ аэропортов и их экспертизы показывает, что в ряде случаев для уменьшения размеров неблагоприятной зоны разработчиками от учета скрываются значимые источники воздействия на ОС, некорректно и/или не в полном объеме используются исходные данные по объектам – источникам негативного воздействия. При этом расчет концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) от наземных источников, выполняемый с использованием программы «Эколог» [2], достаточно правдоподобен, однако расчет приземных концентраций ЗВ от авиационных двигателей ВС [3] при их летной и наземной эксплуатации [4] вызывает большие сомнения. Кроме того, в расчетах рассеивания ЗВ в атмосфере не учитываются выбросы от всех объектов аэропортовых комплексов (промузлов), не анализируется сочетанное действие ЗВ от наземных и воздушных источников выбросов.

Авиационные специалисты Европейского Союза прогнозируют [5] к 2035 г. рост авиаперевозок на 45 %. Отмеченные выше обстоятельства создают проблемы при стремлении обеспечить экологическую безопасность промышленно-транспортных узлов, имеющих в своем составе аэропорты [6], при том, что основные задачи по охране окружающей среды, поставленные в своё время и сформулированные в Приложении 16 к Чикагской конвенции о международной гражданской авиации [7], в наши дни ИКАО признаны решенными. Находят решение даже проблемы негативного экологического воздействия, возникающие при авиационных происшествиях [8, 9].

При этом контуры авиационного шума при летной эксплуатации ВС [10] по максимальным уровням чаще всего просто «рисуются» без какого-либо обоснования и расчетов. Расчеты контуров эквивалентного шума [10] под предлогом наличия учета максимального контура как большего по сравнению с эквивалентным, хотя для аэропортов с большой интенсивностью эксплуатации ВС преобладающее значение имеет учет эквивалентных уровней, чаще всего не производятся и не отображаются на картах местности, хотя, как следует из директивы Европейского Парламента и Совета Европы 2002/49/ЕС «Об оценке и регулировании шума окружающей среды», уровень эквивалентного шума является основным критерием оценки акустического комфорта территории.

Отмеченное усугубляется неправильным применением известных методов расчета, а также придуманных разработчиками самостоятельно расчетных методик и программного обеспечения. Это приводит к завышению размеров шумовых зон и зон рассеивания загрязняющих веществ. Так, для аэропортов Шереметьево и Домодедово разработчиком проектов (ООО «Центр экологических инициатив») по названным факторам [11] в несколько раз неоправданно увеличены площади территорий СЗЗ и санитарных разрывов, что повлекло необходимость дополнительного расходования средств федерального бюджета на отселение людей из этих зон. В противном случае строительство новой взлётно-посадочной полосы (ВПП) в Шереметьево, в соответствии с письмом Роспотребнадзора №01/10003-12-23 от 04.09.2012 ФС в адрес Росавиации, запрещалось.

С другой стороны, в последнее время практически все экспертные организации и территориальные органы Роспотребнадзора рекомендуют разработчикам сокращать расчетные размеры СЗЗ аэропортов и соответствующих санитарных разрывов. Первая причина в том, что пока не решен вопрос об ответственности за отселение людей, оказывающихся в СЗЗ, то есть не

регламентировано, за чей счёт вести отселение: за счёт муниципальных органов власти или аэропортов. Другая причина – не регламентировано ограничение жилищного и дачного строительства в зоне санитарных разрывов.

Местные органы власти также бывают заинтересованы в принятии «правильных» размеров расчетной СЗЗ и санитарных разрывов. При рассмотрении состояния и проблем организации государственного санитарно-эпидемиологического надзора за санитарно-защитными зонами аэропортовых комплексов на территории РФ на коллегии Роспотребнадзора от 21.06.2013 г. выяснилось следующее. Для обоснования выноса аэропорта Саратов-Центральный из перспективного под жилищное строительство района Управлением Роспотребнадзора по Саратовской области было выдано положительное заключение на расчетную СЗЗ. По этому заключению вокруг аэропорта с интенсивностью движения всего 10–15 рейсов в сутки «оказалось» 86 дошкольных образовательных учреждений, 58 школ, 32 лечебно-профилактических учреждения города Саратова. Таких «показателей» нет даже для самых крупных аэропортов страны.

Какую-либо ответственность за «согласованные» в итоге размеры расчетных СЗЗ и санитарных разрывов не несут ни разработчики проектов СЗЗ, ни экспертные организации, ни территориальные органы Роспотребнадзора, все надеются на последующий этап работ, на разработку проекта установленной СЗЗ, утверждаемой Федеральной службой Роспотребнадзора.

Такое положение сложилось вследствие отсутствия как в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [1], так и в проекте его новой редакции (СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14), принятой в сентябре 2014 г. и отмененной в декабре 2014 г. [12]:

- механизма проверки (в том числе с проведением натурных исследований) границ СЗЗ и санитарных разрывов (контуров авиационного шума), полученных расчетами;
- порядка внесения корректировок в проект;
- регламента установления окончательных размеров СЗЗ аэропорта.

В проекте редакции СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14 [12] по сравнению с предыдущей [1] было предложено значительное сокращение сроков разработки и этапов согласования проектов за счет устранения двухзвенной системы, оставлен только проект расчетных границ СЗЗ с последующим подтверждением границ СЗЗ самим предприятием в рамках проводимого им производственного экологического (производственного) контроля. Данное предложение заведомо приведет к конфликту интересов жителей, предприятий (особенно аэропортов) и органов Роспотребнадзора.

Вероятно, поэтому сегодня, по данным Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия, приведенным в решении коллегии от 21.06.2013 г., только 52 из 262 аэропортов, постоянно контролируемых органами Роспотребнадзора, имеют проекты расчетных границ СЗЗ и санитарных разрывов, согласованные только территориальными органами, которые не подлежат учету в целях планирования землепользования [13]. При этом нет практически ни одной установленной СЗЗ с размером, утвержденным Федеральной службой Роспотребнадзора. Единственным исключением является утвержденная в 2014 г. установленная СЗЗ аэропорта Тюмень, где в зоне повышенных уровней авиационного шума многоэтажная жилая застройка просто отсутствует.

Таким образом, понесенные аэропортами значительные временные и финансовые затраты на разработку расчетных проектов СЗЗ оказались напрасны, так как для муниципальных органов, на территории которых располагаются аэропорты, до сих пор отсутствуют какие-либо факторы, ограничивающие застройку на территории зон фактически экологически (по авиационному шуму) непригодных для проживания населения.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ К РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ И ПРАВИЛ ПО ШУМУ

При обсуждении проекта СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14 [12] совместными усилиями Росавиации, Главного медико-санитарного управления Минобороны, Департамента авиационной

промышленности Минпромторга было показано, что проект новой редакции СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14 [12] так же, как и предыдущая редакция СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [1], не отражает и не учитывает специфику деятельности аэропортов и аэродромов. Требуется создание нового отдельного документа в сфере санитарного законодательства РФ, гармонизированного с международной и отечественной практикой, например, в виде СанПиНа «Санитарно-защитные зоны аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок», разъясняющего и регламентирующего требования к обоснованию и установлению размеров СЗЗ, при этом:

- отвечающего интересам авиационных предприятий всех форм собственности;
- не противоречащего новой разрабатываемой редакции СанПиН 2.2.1/2.1.1-14.

Поэтому целесообразно концептуально обозначить посылы, рекомендуемые для введения в новый документ.

Предлагается, что правила должны:

- распространяться на все аэропорты, аэродромы и посадочные площадки государственной, экспериментальной и гражданской авиации (далее – аэропорты, аэродромы);
- включать перечень предоставляемой в Роспотребнадзор несекретной документации, сроки рассмотрения и перечень возможных причин для отклонения проектов;
- кроме требований к размерам и установлению границ СЗЗ аэропортов, аэродромов устанавливать перечень оснований для пересмотра этих размеров;
- для планирования землепользования (в рамках разработанных проектов) устанавливать порядок функционального зонирования приаэродромной территории в виде оперативной карты заданного индекса авиационного шума.

Примечание: введением понятия «оперативная карта заданного индекса авиационного шума» решается задача легитимизации учета в государственном кадастре недвижимости, что предусмотрено ГОСТ Р 53187-2008 [13] и успешно применяется в странах ЕС [14];

- для своевременного учёта изменений акустической ситуации (при планировании землепользования, застройки и определения границ зон функционального зонирования приаэродромной территории) предусматривать возможность разработки оперативной карты заданного индекса авиационного шума аэропорта, аэродрома (в виде отдельного самостоятельного проекта, не связанного с проектом СЗЗ);

- определять размер и границы СЗЗ, границы зон функционального зонирования приаэродромной территории вдоль установленных маршрутов полета ВС, а также зоны ограничения застройки на основании результатов:

- расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с учетом фонового загрязнения;

- расчета уровней авиационного шума от летных операций ВС (в том числе на посадочных площадках), включающих разбег, взлет, полет по кругу при выполнении тренировочных полетов, заход на посадку и пробег по ВПП с включением реверса авиадвигателей, как показано в работе [15];

- проведения при необходимости натурных исследований (наблюдений) и измерений загрязнения атмосферного воздуха и уровней авиационного шума;

- устанавливать размер и границы единой СЗЗ по объединенной границе наибольшего пофакторного воздействия наземных и воздушных источников загрязнения атмосферного воздуха и авиационного шума от передающих радиотехнических объектов (ПРТО) и ВС при выполнении летных операций;

- определять критерии обоснования и критерии пересмотра размеров и границ СЗЗ (например, изменение в регламентируемые периоды времени интенсивности полетов ВС на 50% и более или изменение структуры парка эксплуатируемых (обслуживаемых) ВС по эмиссионным и акустическим характеристикам на 30 % и более), а также устанавливать расчетный период перспективного развития и сроки обязательного пересмотра проекта;

– установить периодичность натурных исследований и измерений в рамках ежегодной программы производственного контроля, например, измерения качества атмосферного воздуха не более 2 раз в год (весенне-летний и осенне-зимний периоды) и измерения авиационного шума – не более 2 раз в год в периоды максимальной интенсивности эксплуатации ВС с последующим осреднением полученных значений; измерения электромагнитных излучений (ЭМИ) – не менее одного раза в год;

– предусматривать возможность установления границ СЗЗ на основании средне-годовых показателей суммарных выбросов всех источников загрязнения атмосферного воздуха и уровней физических воздействий объектов, что позволит гармонизировать полученные экологические границы аэропорта, аэродрома с соответствующими европейскими показателями;

– устанавливать исчерпывающий перечень наземных источников шума и выбросов ЗВ, подлежащих учету, что позволит исключить различное толкование значимости их воздействия у исполнителей и представителей органов экологической экспертизы.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ГИГИЕНИЧЕСКИЕ НОРМАТИВЫ АВИАЦИОННОГО ШУМА И ИХ ВЕЛИЧИНЫ

Существующая сегодня проблема установления гигиенических нормативов по фактору «авиационный шум» для территорий, находящихся не только в пределах СЗЗ, но и в достаточно обширной приаэродромной зоне «акустического дискомфорта» рассматриваемых объектов (ВПП, посадочных площадок и стандартных маршрутов полета в зоне взлета и посадки ВС) является чрезвычайно актуальной. Предлагается устанавливать отдельно нормативы размера СЗЗ и отдельно нормативы зон регулируемой застройки (зон «акустического дискомфорта») приаэродромной территории по авиационному шуму.

Нормативы следует гармонизировать с аналогичными международными правилами [16, 17, 18], и они должны предусматривать градацию зон по 5 дБА, при этом:

– эквивалентные и максимальные уровни звука, создаваемого на селитебной территории городов и поселков городского типа при пролетах и наземной эксплуатации ВС (включая проведение опробования авиадвигателей и работу машин, оборудованных авиадвигателями на аэродромах и вертодромах), в дневное время не должны превышать значение среднегодового эквивалентного уровня звука $L_{дн}$ (дБА) – 65 дБА (при существующей и прогнозируемой годовой интенсивности полетов более 50 тысяч самолетоввылетов) и $L_{дн}$ (дБА) – 62 дБА (для годовой интенсивности полетов менее 50 тысяч самолетоввылетов);

– максимальные уровни звука при пролетах самолетов не должны превышать в дневное время (с 7:00 до 23:00) – 85 дБА, а в ночное время (с 23:00 до 7:00) – 75 дБА.

Описанный подход в наши дни уже используется в городах Москве и Санкт-Петербурге при оценке транспортного шума. Критерием при соответствующем анализе используется величина эквивалентного уровня шума, а не максимального. Учет максимальных уровней звука в составе проектов СЗЗ можно осуществлять в виде построения «зон регулируемой застройки» (либо «зон ограничения застройки») по фактору авиационный шум для разработки противозумных мероприятий. В работе [18] для окрестностей аэропортов Внуково, Остафьево, Уфа ранее уже приводились примеры построения контуров зон воздействия авиационного шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время отечественные аэропорты испытывают значительные трудности с разработкой и согласованием проектов санитарно-защитных зон. Изложенный анализ работ по выполнению, экспертизе и согласованию проектов расчетных СЗЗ аэропортов на соответствие

требованиям СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [1] выявил значительное несовершенство действующего санитарного законодательства в сфере регламентации и оценки воздействия авиационных объектов на окружающую среду, а также низкое качество разработки самих проектов СЗЗ. Прежде всего, это вызвано необоснованным приравнением объектов гражданской авиации к крупным промышленным предприятиям 1 и/или 2 класса опасности и неверным пониманием «универсальными» разработчиками проектов специфики авиации.

Ситуация усугубляется отсутствием однозначной позиции у Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) в сфере нормирования и учета авиационного шума на приаэродромной территории. В ряде случаев многолетнее отсутствие окончательно установленных границ СЗЗ и санитарных разрывов привело к появлению новой жилой застройки на селитебной территории вблизи границ аэропортов. Это ведёт к ограничению производственной активности аэропортов, к невозможности согласовать проекты СЗЗ, когда в зону пролетного авиационного шума попадает существующая жилая застройка.

Выход из сложившейся патовой ситуации возможен с помощью введения нового нормативного документа санитарного законодательства, гармонизированного с международной и отечественной практикой, например, в виде самостоятельного СанПиН «Санитарно-защитные зоны аэропортов, аэродромов, вертодромов и посадочных площадок», которым будет предусмотрена разработка отдельного, не связанного с проектом СЗЗ, проекта «Оперативной карты авиационного шума аэропорта».

Предлагаемые концептуальные положения дают возможность создать такой документ, сформировать и разъяснить заинтересованным организациям и специалистам основные специфические требования, которые должны быть учтены в нем и которые не противоречат разрабатываемой новой редакции СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» [12]. Всё изложенное отвечает интересам аэропортов гражданской авиации и может служить основными критериями совместимости деятельности аэропортов с требованиями защиты окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 № 74 (ред. от 25.04.2014) «О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_74669/ (дата обращения: 11.02.2017).
2. **Соснин А.С.** Компьютерные программы расчета загрязнения атмосферы. Обзорная статья по программам серии «Эколог». Фирма Интеграл, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.integral.ru/program.html> (дата обращения 03.01.2017).
3. **Николайкина Н.Е.** Промышленная экология: Инженерная защита биосферы от воздействия воздушного транспорта / Н.Е. Николайкина, Н.И. Николайкин, А.М. Матягина. М.: Академкнига, 2006. 239 с.
4. **Смирнов Н.Н.** Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов / Н.Н. Смирнов, Ю.М. Чинючин. М.: МГТУ ГА, 2015. 580 с.
5. Пояснительная записка. Обзор сектора авиации // European Aviation Environmental Report. EASA, 2016; 3 p. [Электронный ресурс]. URL: http://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/EAAer%202016%20Executive%20Summary%20-RU.pdf (дата обращения 14.02.2017).
6. **Николайкин Н.И.** Экологическая безопасность. Промышленно-транспортные и энергетические узлы: монография / Н. Николайкин, Н. Николайкина. Saarbrücken, Deutschland: Verlag LAP LAMBERT Academic Publishing. 2016. 385 p.

7. Охрана окружающей среды. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации: Том 1. Авиационный шум. 7-е изд. ИКАО, 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://www.icao.int/asmap/Annexes/an16_v1_cons_ru.pdf (дата обращения 03.01.2017).

8. **Николайкин Н.И., Старков Е.Ю.** Уменьшение экологических последствий от воздействия авиационных происшествий // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 225. С. 129–136.

9. **Старков Е.Ю., Николайкин Н.И.** О возможности снижения экологического воздействия при авиационном происшествии // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего: плюс. 2016. Выпуск 02 (30). С. 13–19.

10. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения. Межгосударственный стандарт [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200112157> (дата обращения 03.01.2017).

11. **Картышев О.А.** Новые методические подходы к установлению размеров санитарно-защитной зоны и санитарных разрывов аэропортов гражданской авиации // Гигиена и санитария. 2013. № 1. С. 89–92.

12. Об отмене постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 02.09.2014 № 52 «Об утверждении СанПиН 2.2.1/2.1.1.3219-14 «Санитарно-защитные зоны, санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 25.12.2014 № 90 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420266523/> (дата обращения 03.01.2017).

13. ГОСТ Р 53187-2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий. М.: Стандартинформ, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.internet-law.ru/stroyka/doc/55459/> (дата обращения 20.02.2017).

14. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise (Директива 2002/49/EC Европейского Парламента и Совета Европы от 25 июня 2002 года по оценке и регулированию шума окружающей среды), 2002. Official Journal of the European Communities, 2002, L 189:12–25.

15. **Картышев О.А.** Построение зон воздействия авиационного шума вблизи аэропортов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 160. С. 148–158.

16. Инструктивный материал по сбалансированному подходу к управлению авиационным шумом. Doc 9829 AN/451. 2-е изд. ИКАО, 2008 [Электронный ресурс]. URL: http://www.aviadocs.net/icaodocs/docs/9829_cons_ru.pdf (дата обращения 11.12.2016).

17. Комплексное воздействие факторов окружающей среды и образа жизни на здоровье населения: диагностика, коррекция, профилактика // Материалы пленума Научного совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды 11–12 декабря 2014 г. / Под ред. акад. РАН Ю.А. Рахманина. М.: Таус-Пресс, 2014. 500 с.

18. **Титов А.В.** Экологическая безопасность при проектировании, строительстве и эксплуатации аэродромов // Наука и транспорт. Гражданская авиация. 2012. № 1. С. 44–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Картышев Олег Алексеевич, кандидат технических наук, заведующий испытательной лабораторией ООО «Центр экологической безопасности ГА», oa_kartyshev@mail.ru.

Николайкин Николай Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Безопасность полётов и жизнедеятельности» МГТУ ГА, nikols_n@mail.ru.

PROJECTS ON AIRPORTS, AIRFIELDS, HELICOPTER AERODROMES AND LANDING GROUNDS SANITARY PROTECTION AREAS AS THE BASIS OF THEIR ACTIVITY COMPLIANCE ASSESSMENT TO ECOLOGICAL REQUIREMENTS

Oleg A. Kartyshev¹, Nikolay I. Nikolaykin²

¹*Civil Aviation Environmental Safety Center, Moscow, Russia*

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

ABSTRACT

Ten years experience of the development of domestic airports sanitary protection zones projects in civil aviation based on Sanitary Regulations and Norms 2.2.1/2.1.1.1200-03 requirements is analyzed, the reasons of loss of quality of project works and delaying of coordination terms at the last stage of the development are established. It is shown that among the main reasons for current negative situation with projects development and coordination are: absence of a check algorithm of settlement borders of areas and contours of aviation noise with the use of natural researches methods in Sanitary Regulations and Norms 2.2.1/2.1.1.1200-03; absence of methods of amendment in projects and regulations of establishment of the airport sanitary protection zones final dimensions. Examples of oversized and undersized noise areas and ones of the polluting substances dispersion as well as the reasons of local authorities' interests in it are given.

Conceptional strategies which should be used in the edition of a new Russian conservancy normative document regulating the development of projects on sanitary protection areas. New document will allow to consider various factors of negative environmental impact of the airports, airfields, helicopter aerodromes and landing grounds activities.

It is offered to introduce the concept of "aviation noise set index operational card", which will solve the legitimization problem of the aviation noise account in the State Immovable Property Cadaster. Suggestions on equivalent and maximum level magnitude of the sound made at the residential territory of cities and urban-type settlements by flights and aircraft ground operation are given.

Standards are supposed to be harmonized with similar international rules and have to provide zone gradation by 5 dBA.

Suggestions on the considerations of the revealed deficiencies are made, requirements to project sections structure of sanitary protection zones are formulated, proposals on the establishment of aviation noise hygienic standards on the airports aerodrome environs are offered.

Key words: airport, territory, sanitary protection area, environmental protection.

REFERENCES

1. *Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 25.09.2007 N 74 (red. ot 25.04.2014)* [The resolution of the Russian Federation Chief state health officer from 25.09.2007 N 74 (an edition of 25.04.2014)] "*O vvedenii v deistvie novoi redaktsii sanitarno-epidemiologicheskikh pravil i normativov SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inyykh ob'ektov"* [About introduction of sanitary and epidemiologic rules and standards of SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Sanitary protection zones and sanitary classification of the enterprises, constructions and other objects" new edition]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_74669/ (accessed: 11.02.2017). (in Russian)

2. **Sosnin A.S.** *Kompyuternyye programmyi rascheta zagryazneniya atmosferyi. Obzornaya statya po programmam serii «Ekolog»* [The computer programs of the atmosphere pollution calculation. A review according to programs of the «Ecologist» series]. Firma Integral, 2017. Available at: <http://www.integral.ru/program.html> (accessed: 03.01.2017). (in Russian)

3. **Nikolaykina N.E., Nikolaykin N.I., Matyagina A.M.** *Promyshlennaya ehkologiya: Inzhenernaya zashchita biosfery ot vozdeystviya vozdushnogo transporta* [Industrial ecology: Engineering protection of the biosphere from air transport influence]. Moscow, Akademkniga, 2006, 239 p. (in Russian)

4. **Smirnov N.N., Chinyuchin Yu.M.** *Osnovy teorii tekhnicheskoi ekspluatatsii letatelnykh apparatov* [The theory of aircraft technical operation bases]. Moscow, MSTU CA, 2015, 580 p. (in Russian)
5. **Poyasnitelnaya zapiska. Obzor sektora aviatsii** [Explanatory note. Sector of aircraft Review]. European Aviation Environmental Report. EASA, 2016, 3 p. Available at: http://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/EAEr%202016%20Executive%20Summary%20-U.pdf (accessed: 14.02.2017). (in Russian)
6. **Nikolaikin N., Nikolaikina N.** *Ekologicheskaya bezopasnost. Promyshlennno-transportnye i energeticheskie uzly* [Ecological safety. Industrial and transport and power knots]. Monograph. Saarbrücken, Deutschland, Verlag LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016, 385 p. (in Russian)
7. Environmental Protection. International Standards and Recommended Practices. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation: Volume 1. Aircraft Noise. Edition 7. ICAO, 2014. Available at: http://www.6pl.ru/asmap/Annexes//an16_v1_cons_ru.pdf (accessed: 03.01.2017).
8. **Nikolaikin N.I., Starkov E.Yu.** *Umenshenie ekologicheskikh posledstviy ot vozdeystviya aviatsionnykh proisshествiy* [Ecological Consequences Reduction from Aviation Accidents Impacts]. Civil Aviation High TECHNOLOGIES, 2016, no 225, pp. 129–136.
9. **Starkov E.Yu., Nikolaikin N.I.** About Possibility of Aviation Incident Ecological Influences Decrease. XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus, 2016, Issue no. 02 (30), pp. 13–19.
10. GOST 22283-2014. *Shum aviatsionnyi. Dopustimye urovni shuma na territorii zhiloi zastroiki i metody ego izmereniya. Mezhhgosudarstvennyi standart* [Aviation noise. Appropriate noise levels on the territory of residential houses and methods of its measurement]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200112157> (accessed: 04.01.2017). (in Russian)
11. **Kartyshev O.A.** *Novyye metodicheskie podkhody k ustanovleniyu razmerov sanitarnozashchitnoi zony i sanitarnykh razryvov aeroportov grazhdanskoi aviatsii* [New methodical approaches to establishment of a sanitary protection zone and sanitary ruptures of the civil aviation airports sizes]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2013, no. 1, pp. 89–92. (in Russian)
12. *Ob otmene postanovleniya Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiiskoi Federatsii ot 02.09.2014 N 52 "Ob utverzhdenii SanPiN 2.2.1/2.1.1.3219-14 "Sanitarno-zashchitnye zony, sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inyykh ob"ektov". Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiiskoi Federatsii ot 25.12.2014 no. 90* [About Cancellation of the Russian Federation Chief State Health Officer Resolution from 02.09.2014 no. 52 "About the Statement the SanR&N 2.2.1/2.1.1.3219-14 "Sanitary Protection Zones, Sanitary Classification of the Enterprises, Constructions and Other Objects": Resolution of the Russian Federation State Health Officer Chief of the 25.12.2014 no. 90]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420266523/> (accessed: 04.01.2017). (in Russian)
13. GOST R 53187-2008. *Akustika. Shumovoy monitoring gorodskikh territoriy* [Acoustics. Noise monitoring of urban areas]. M., Standartinform, 2009. Available at: <http://www.internet-law.ru/stroyka/doc/55459/> (accessed: 04.02.2017). (in Russian)
14. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise, 2002. Official Journal of the European Communities, 2002, L 189:12–25.
15. **Kartyshev O.A.** *Postroyeniye zon vozdeystviya aviatsionnogo shuma vblizi aeroportov* [Sanitary Zone Definition in the Airport Vicinity on the Base of Aviation Noise Factor]. Scientific Bulletin of MSTU CA, 2010, no. 160, pp. 148–158. (in Russian)
16. The Balanced Approach to Aircraft Management: ICAO Doc 9829 AN/451. 2-d issue. ICAO, 2007. Available at: http://www.aviadocs.net/icaodocs/docs/9829_cons_ru.pdf (accessed: 04.02.2017).
17. *Kompleksnoe vozdeystvie faktorov okruzhayushchei sredy i obraza zhizni na zdorovye naseleniya: diagnostika, korrektsiya, profilaktika: Materialy plenuma Nauchnogo soveta Rossiiskoi Federatsii po ekologii cheloveka i gigiene okruzhayushchei sredy. 11–12 December 2014* [Complex envi-

ronmental factors impact and way of life on the population health: diagnostics, correction, prevention: Materials of Scientific council of the Russian Federation plenum on the person ecology and environment hygiene. December 11–12, 2014]. Edited by RAS akad. Yu.A. Rakhmanin. Moscow, Taus-Press, 2014, 500 p.

18. Titov A.V. *Ekologicheskaya bezopasnost pri proektirovanii, stroitelstve i ekspluatatsii aerodromov* [Ecological safety of airfields design, construction and operation]. *Nauka i transport. Grazhdanskaya aviatsiya* [Science and transport. Civil aviation], 2012, no. 1, pp. 44–46.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. Kartyshev, Candidate of Engineering Sciences, Head of Test Laboratory of “Civil Aviation Environmental Safety Center”, oa_kartyshev@mail.ru.

Nikolay I. Nikolaykin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Life and Flight Safety Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, nikols_n@mail.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 28.02.2017
Accepted for publication 25.05.2017

РОЛЬ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО АЭРОНАВИГАЦИОННОГО ПЛАНА ИКАО

В.В. ВОРОБЬЕВ¹, А.В. ВЛАСОВА¹

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

Развитие мировой гражданской авиации осуществляется на основе выполнения концепции ИКАО CNS/ATM, которая определила основные стратегические направления повышения эффективности выполнения полетов воздушных судов. На основе этой концепции в последние годы в ИКАО был разработан Глобальный аэронавигационный план, в котором основные стратегические направления реализации концепции CNS/ATM были конкретизированы в так называемые блоки, что сформулировано в виде понятия блочной модернизации Глобальной авиационной системы. При этом в Глобальном аэронавигационном плане указано, что введение новых процедур и систем обеспечения полетов ВС неизбежно вызовет изменения в уровне управления безопасностью полетов. Поэтому ставится задача сохранения, а возможно и повышения, уровня управления безопасностью полетов при внедрении новых процедур и систем в рамках реализации Глобального аэронавигационного плана ИКАО. Немаловажная роль в этом процессе отводится различным радиоэлектронным системам, которые самым непосредственным образом связаны с внедрением новых систем и процедур.

Отсюда возникает общая глобальная задача оценки изменения уровня управления безопасностью полетов при внедрении новых процедур и систем, связанных с использованием радиоэлектронного оборудования как на борту воздушного судна, так и на земле. Отдельные аспекты решения указанной проблемы рассматриваются в представленном материале.

Ключевые слова: Глобальный аэронавигационный план, Глобальный план обеспечения безопасности полетов, блочная модернизация авиационной системы, управление безопасностью полетов, радиоэлектронное оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие мировой гражданской авиации (ГА) осуществляется на основе выполнения концепции Международной организации ГА (ИКАО) CNS/ATM (Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management – Связь, навигация, наблюдение/Организация воздушного движения (пер. с англ.)) [1–3], которая определила основные стратегические направления дальнейшего повышения эффективности выполнения полетов воздушных судов (ВС) ГА. На основе этой Концепции в последние годы в ИКАО был разработан Глобальный аэронавигационный план (ГАНП), в котором основные стратегические направления реализации концепции CNS/ATM конкретизированы в так называемые блоки, что в итоге было сформировано в виде понятия блочной модернизации Глобальной авиационной системы. При этом в ГАНП указано, что введение новых процедур и систем обеспечения полетов ВС неизбежно вызовет изменения в уровне безопасности полетов (БП). В результате был принят еще один документ ИКАО, а именно, Глобальный план обеспечения безопасности полетов (ГПБП), который дополнил ГАНП в части поддержания имеющегося уровня управления БП и, по возможности, его увеличения при реализации соответствующих процедур и методов в рамках ГАНП. Так как при реализации ГАНП достаточно большая роль отводится бортовым и наземным радиоэлектронным средствам и системам, то возникает задача оценки степени влияния вводимых радиоэлектронных средств и систем (РЭСС) на уровень БП. В то же время в документах Росавиации¹ указывается, что для РФ наиболее целесообразное развитие событий в рамках реализации ГАНП за-

¹ План внедрения навигации, основанной на характеристиках (PBN) в ВПРФ. М.: Росавиация, 2014.

ключается в одновременном внедрении новых РЭСС и в модернизации уже имеющихся РЭСС, что связано с особенностями РФ как объекта выполнения полетов ГА.

Целесообразно рассмотреть отдельные аспекты оценки влияния вводимых и модернизированных РЭСС, по прогнозам ГАНП, на уровень БП в рамках реализации ГПБП.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При рассмотрении вопросов управления безопасностью полетов достаточно много внимания уделяется взаимосвязям возникновения отказов различных систем обеспечения полета ВС с изменением уровня управления безопасностью полетов. Данным вопросам посвящены отечественные [4, 5] и зарубежные [6, 7] публикации. Однако в них рассматриваются общие подходы к решению задачи оценки степени влияния вводимых РЭСС на уровень БП и не конкретизируются собственно сами системы. Далее, необходимо исследовать возможность получения аналитических зависимостей между показателями, определяющими уровень безопасности полетов, и показателями, определяющими качество функционирования РЭСС. Для этого нужно: первое – выбрать соответствующий набор показателей, характеризующих уровень БП, для проведения соответствующего анализа. Второе – выбрать показатели, определяющие качество функционирования РЭСС, которые могут быть использованы для оценки уровня управления БП.

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ КАЧЕСТВОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЭСС

Структура блочной модернизации (рис. 1) содержит четыре блока, которые должны быть реализованы последовательно во времени, начиная с первого блока и заканчивая четвертым, ориентировочно, в 2028 г. При этом ИКАО не исключает вариантов реализации отдельных блоков в других временных рамках по усмотрению государств – членов ИКАО.

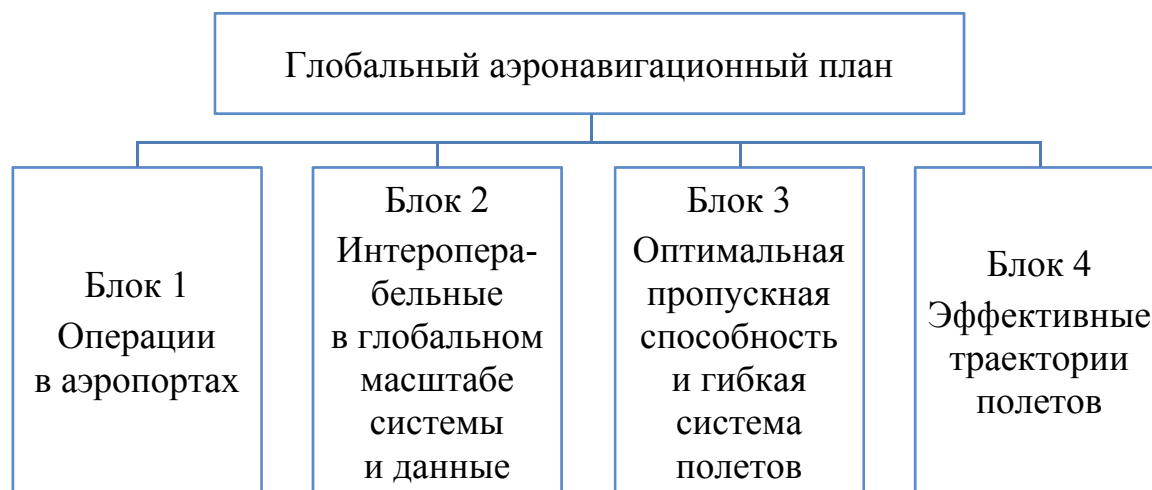


Рис. 1. Структура Глобального аэронавигационного плана
Fig. 1. Global Air Navigation Plan Structure

Известно, что большое количество происшествий происходит в пределах аэропортовой зоны, поэтому ограничимся рассмотрением процедур первого блока модернизации Глобальной аэронавигационной системы «Операции в аэропортах».

В рамках ГАНП первый блок модернизации Глобальной аэронавигационной системы содержит пять модулей (рис. 2).



Рис. 2. Структура блока 1 ГАНП
Fig. 2. Global Air Navigation Plan Block 1 Structure

В аэропортах выполняются следующие операции.

1. Оптимизация схем захода на посадку, включая наведения в вертикальной плоскости, что является первым шагом в направлении повсеместного внедрения заходов на посадку по системам спутниковой радионавигации (ССРН).
2. Повышение пропускной способности взлетно-посадочной полосы (ВПП) за счет оптимизированного эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе.
3. Оптимизация потоков движения по ВПП на основе установления очередности (процедуры взлета и вылета).
4. Безопасность и эффективность наземных операций, т. е. наблюдение за наземным движением в аэропортах в интересах поставщиков аэронавигационного обслуживания (структуры управления воздушным движением (УВД)).
5. Оптимизация операций в аэропортах на основе применения принципов совместного принятия решений в аэропортах, т. е. обеспечение взаимодействия служб УВД и различных служб обеспечения полетов.

Из приведенного перечня модулей, обеспечивающих реализацию первого блока ГАНП, видно, что здесь могут быть задействованы системы радиосвязи и передачи данных, системы радионавигации, включая спутниковые системы, системы наблюдения, т. е. радиолокационные системы и комплексы совместно с системами автоматического зависимого наблюдения (АЗН) радиовещательного (АЗН-Р) и контрактного (АЗН-К) типов.

Структуры, составляющие понятие РЭСС, т. е. системы телекоммуникаций, навигации и наблюдения, в той или иной мере будут влиять на уровень БП уже на первом этапе реализации блочной модернизации Глобальной аэронавигационной системы.

В качестве показателей управления БП, согласно ГПБП, нужно учитывать два показателя, а именно: возможности возникновения фактора опасности и фактора риска при эксплуатации РЭСС. Можно найти аналитические взаимосвязи следующего вида:

$$\begin{cases} \Phi_o = f(\overline{M}), \\ \Phi_p = f(\overline{N}), \end{cases} \quad (1)$$

где Φ_o – показатели, определяющие опасный фактор;
 Φ_p – показатели, характеризующие фактор риска;
 $\overline{M}$ – вектор показателей качества функционирования соответствующих РЭСС, влияющих на показатели опасного фактора;
 $\overline{N}$ – вектор показателей качества функционирования соответствующих РЭСС, влияющих на показатели фактора риска.

На практике в качестве опасного фактора могут быть взяты различные показатели, которые характеризуют возможные последствия возникновения опасного фактора. Например, отсутствие связи при выполнении полета ВС относится к понятию инцидента, т. е. отсутствие связи между экипажем ВС и диспетчером УВД есть опасный фактор, который может привести к таким последствиям, как нарушение норм эшелонирования, возникновение потенциально конфликтной ситуации и т. д.

Соответственно, возникновение опасного фактора может привести к фактору риска. Отказ бортового метеорадиолокатора в сложных метеоусловиях есть инцидент, т.е. отказ метеорадиолокатора является опасным фактором, создающим фактор риска авиационного происшествия.

Показатели качества функционирования РЭСС, а именно векторы $\overline{M}$ и $\overline{N}$ носят нестационарный характер, т. е. они в течение определенного временного интервала могут существенно изменяться в зависимости от имеющейся в данном радиоканале помеховой обстановки. Эта помеховая обстановка зависит от действия помех от других радиосредств, имеющихся в конкретном аэропорту, воздействия помех атмосферного или промышленного происхождения и т. д. В определенные моменты времени действия помех не вызывают снижение показателей качества функционирования РЭСС и не составляют понятия опасного фактора. В то же время возможно такое состояние электромагнитной обстановки, когда снижение показателей функционирования конкретной РЭСС может стать основанием для формирования опасного фактора, влекущего за собой возникновение опасности риска.

В качестве примера можно привести системы передачи информации, работающие в диапазоне высоких частот (ВЧ). Прохождение сигнала в канале ВЧ в значительной степени зависит от состояния ионосферы и, при определенных условиях, возможны прерывания сигнала, вплоть до полной потери связи длительностью до 5 минут [8]. Тогда очевидно, что при спокойном состоянии ионосферы каналы ВЧ передачи информации не представляют основы для создания опасного фактора, а возмущенное состояние ионосферы дает возможность появления опасного фактора.

Такие примеры можно привести для любых систем, использующих РЭСС для целей решения задач телекоммуникации, навигации и наблюдения. Другими словами, функциональное состояние любой радиоэлектронной системы может быть основой для возникновения опасного фактора, что в полной мере определяется условиями помехового воздействия на соответствующий радиоканал [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при реализации ГАНП в РФ необходимо особое внимание уделять вопросам совершенствования систем управления БП как в новых разворачиваемых РЭСС, так и в модернизируемых, что отвечает основной стратегии развития ГА РФ на базе внедрения выполнения полетов ВС по методам, указанным в ГАНП. Особое внимание при этом следует уделить особенностям отнесения тех или иных РЭСС к структурам, которые могут создавать опасные факторы для БП.

Эти вопросы и подлежат дальнейшим исследованиям с точки зрения возможности возникновения опасных факторов в РЭСС, причем здесь вряд ли возможны единые подходы к анализу, необходимо отдельно рассматривать системы телекоммуникации, навигации и наблюдения. Кроме того, возможно, целесообразно отдельно рассматривать бортовые и наземные РЭСС с точки зрения поставленных вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция и системы CNS/ATM в гражданской авиации / под ред. Г.А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003.
2. Затучный Д.А., Логвин А.И., Нечаев Е.Е. Проблемы реализации режима автоматического зависимого наблюдения в России. М.: МГТУ ГА, 2012.
3. Спутниковые системы навигации и управления воздушным движением / Д.А. Затучный, А.И. Логвин, Р.Н. Акиншин, К.П. Лихоеденко, Ю.И. Мамон. Тула: ЦНИИМАШ, 2016.
4. Михайлов Ю.Б., Волынский-Басманов Ю.М. Безопасность на транспорте и ее количественная оценка. М.: НУЦ АБИНТЕХ, 2012.
5. Риски и безопасность авиационных систем и комплексов / Г.Н. Гипич, В.Г. Евдокимов, Е.А. Куклев, В.С. Шапкин. М.: ФГУП ГОСНИИГА, 2013.
6. Babak V., Kravchenko V., Vasylyev V. Methods of conflict probability estimation and decision making for air traffic management Aviation. Vilnius, Technika, Vol. 10, no. 1, 2006.
7. Bicchi A., Pallotino L. On Optimal cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol. 1, no. 4, 2000.
8. Кузьмин Б.И. Авиационная цифровая электросвязь в условиях реализации «Концепции ИКАО – ИАТА CNS/ATM в РФ». СПб. – Н. Новгород.: ООО «Агентство ВиТ», 2007.
9. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. М.: Радио и связь, 1981.
10. Давыдов П.С., Иванов П.А. Эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования: справочник. М.: Транспорт, 1990.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Вадим Вадимович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, v.vorobjev@mstuca.aero.

Власова Аруся Витальевна, аспирант 3-го года обучения, ст. преподаватель кафедры организации перевозок на воздушном транспорте, заместитель декана ФУВТ МГТУ ГА, arusya92@mail.ru.

THE ROLE OF NAVIGATIONAL AIDS IN FLIGHT SAFETY MANAGEMENT WITHIN ICAO GLOBAL AIR NAVIGATION PLAN

Vadim V. Vurobyov¹, Arusya V. Vlasova¹

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

ABSTRACT

The development of the global civil aviation is provided on the basis of the ICAO Communication and Surveillance/Air Traffic Management Concept, which has determined the basic strategy for further commercial flight management effectiveness improvement. On the basis of this concept a Global Air Navigation Plan has been developed by ICAO recently. The core strategies of CNS/ATM concept were specified and combined into so-called blocks. Thus the term Global Aviation System block upgrade has been introduced. At the same time, GANP states that the introduction of new procedures and flight management systems will inevitably affect flight safety. Accordingly, there is a task of flight safety management level maintaining, or even increasing within the Global Air Navigation Plan implementation. Various air navigational aids play a significant role in the process as they are directly associated with the new systems and structures introduction.

This breeds the new global challenge of flight safety management level change assessment during the introduction of new procedures and systems connected with the use of both navigational aids and instruments. Some aspects of this problem solution are covered in the article.

Key words: Global Air Navigation Plan, Global Flight Safety Management Plan, aviation system block upgrade, flight safety management, navigational aids.

REFERENCES

1. *Kontsepciya i sistemy CNS/ATM v grazhdanskoy aviatsii* [The concept and the system CNS/ATM in civil aviation]. Pod red. G.A. Kryzhanovskogo. M., IKC Akademkniga, 2003. (in Russian)
2. **Zatuchnyiy D.A., Logvin A.I., Nechaev E.E.** *Problemy realizatsii rezhima avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya v Rossii* [Problems of realisation of automatic dependant supervision in Russia]. M., MGTU GA, 2012. (in Russian)
3. **Zatuchnyiy D.A., Logvin A.I., Akinshin R.N., Lihoddenko K.P., Mamon Yu.I.** *Sputnikovye sistemy navigatsii i upravleniya vozdushnyim dvizheniem* [Satallite systems of navigation and control over airtraffic]. Tula, CNIIMASH, 2016. (in Russian)
4. **Mihaylov Yu.B., Volynskiy-Basmanov Yu.M.** *Bezopasnost' na transporte i ee kolichestvennaya otsenka* [Safety on transport and its quantitative assessment]. M., NUC ABINTEKH, 2012. (in Russian)
5. **Gipich G.N., Evdokimov V.G., Kuklev E.A., Shapkin V.S.** *Riski i bezopasnost' aviatsonnykh sistem i kompleksov* [Risks and safety of aviation systems and complexes]. M., FGUP GOSNIIGA, 2013. (in Russian)
6. **Babak V., Kravchenko V., Vasylyev V.** Methods of conflict probability estimation and decision making for air traffic management Aviation. Vilnius, Technika, Vol. 10, no. 1, 2006.
7. **Bicchi A., Pallotino L.** On Optimal cooperative Conflict Resolution for Air Traffic Management Systems. EEE Transactions on intelligent transportation systems, Vol. 1, no. 4, 2000.
8. **Kuzmin B.I.** *Aviacionnaya cifrovaya elektrosvyaz' v usloviyah realizatsii «Konceptii IKAO – IATA CNS/ATM v RF»* [Aviational digital telecom under conditions of the realization of “ICAO concept IATA CNS/ATM in RF”]. SPb. – N. Novgorod., OOO Agentstvo ViT, 2007. (in Russian)
9. **Falkovich S.E., Homyakov Eh.N.** *Statisticheskaya teoriya izmeritel'nykh radiosistem* [Statistical theory of measuring radiosystems]. M., Radio i svyaz', 1981. (in Russian)
10. **Davydov P.S., Ivanov P.A.** *Ekspluatatsiya aviacionnogo radioelektronnogo oborudovaniya. Spravochnik* [Aviation radio-telephony equipment exploitation. Handbook]. M., transport, 1990. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vadim V. Vurobyov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Life and Flight Safety Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.vorobyev@mstuca.aero.

Arusya V. Vlasova, 3-d year post graduate student, Assistant of Air Transport Management Chair, Deputy Dean, Department of Air Transport Management, Moscow State Technical University of Civil Aviation, arusya92@mail.ru.

Поступила в редакцию 21.01.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 21.01.2017
Accepted for publication 25.05.2017

АКТУАЛЬНОСТЬ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА НА АВИАПРЕДПРИЯТИЯХ

О.Г. ФЕОКТИСТОВА¹, И.К. ТУРКИН², С.В. БАРИНОВ³

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

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

³Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, г. Москва, Россия

Анализируется понятие «концепции приемлемого риска», пришедшее на смену устаревшей концепции абсолютной безопасности, и отмечается возрастающая значимость оценки производственных рисков на современном этапе. Рассмотрели несколько основных методов оценки рисков. Более подробно рассмотрен матричный метод оценки рисков, который можно применять при оценке рисков на авиапредприятиях в рамках системы управления охраной труда.

Способность корректно оценить риски и разработать адекватные меры предосторожности позволит авиапредприятию избежать происшествий, ведущих к тяжелым последствиям для работников, а также к прямым и косвенным издержкам предприятия, среди которых можно выделить как прямой ущерб имуществу и потере прибыли, так и затраты, связанные с расследованием происшествий, выплатой штрафов и компенсаций, потерей делового имиджа и т. п. С целью снижения травматизма и выработки навыков безопасного поведения у персонала на авиапредприятиях предлагается внедрить карту с оценкой рисков, которая будет являться мощным инструментом предупреждения аварийных ситуаций с вовлечением всего персонала в процесс предупреждения аварийных ситуаций и соблюдения безопасных условий труда.

Оценка производственных рисков является неотъемлемой частью оценки всей деятельности организации и системы измерения качества работы подразделений и отдельных работников. Работа по охране труда на предприятии должна основываться на выявлении имеющихся рисков и управлении ими. Оценка рисков является при этом краеугольным камнем планирования по охране труда.

Ключевые слова: авиапредприятие, риск, производственный риск, опасные факторы, вредные факторы.

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении большого числа причин техногенных аварий и несчастных случаев, связанных с потенциально опасной техникой (к которой относится авиационная техника), выявлено, что необходима разработка методологии управления риском, позволяющая определить баланс между масштабами возможного ущерба от использования продукции и ее социально-экономическими преимуществами. Это привело к созданию концепции «Приемлемого риска».

Традиционный подход к обеспечению безопасности базируется на концепции «абсолютной безопасности» [1]. Ее суть сводилась к стремлению сделать техносферу абсолютно безопасной для людей и предполагала внедрение всех мер защиты, которые практически осуществимы. Однако сейчас люди пришли к пониманию, что абсолютная безопасность недостижима или связана с огромными, подчас неоправданными для общества финансовыми затратами. Помимо этого, обеспечить нулевой риск в действующих системах невозможно, и человек должен быть ориентирован на возможность возникновения опасной ситуации. Поэтому в промышленно развитых странах с конца 70-х – начала 80-х гг. XX в. в исследованиях, связанных с обеспечением безопасности, начался переход от концепции абсолютной безопасности к концепции приемлемого (допустимого) риска, суть которой заключается в снижении опасности до такого низкого уровня, который приемлет общество в данный период времени. Это такой низкий уровень смертности, травматизма или инвалидности людей, который не влияет на показатели безопасности предприятия, отрасли экономики или государства.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экономические, социальные и политические аспекты и представляет некоторый компромисс между требуемым уровнем безопасности и возможностями его достижения. Ресурсы любого общества ограничены, и если вкладывается неоправданно много средств в мероприятия, направленные на снижение технического риска, то объем средств, направляемых на развитие социальной сферы и экономики, будет уменьшаться. То есть при увеличении затрат на безопасность технический риск уменьшается, но растет риск социально-экономический. Это приходится учитывать при выборе уровня риска, с которым общество пока вынуждено мириться [2].

Актуальность проблемы оценки производственных рисков обусловлена тем, что обеспечение безопасности населения от различных техногенных источников в развитых странах уже несколько десятилетий осуществляется на основе концепции приемлемого риска, требующей количественного определения риска и сравнения его с допустимым уровнем. В последние годы роль и значение управления рисками как инструмента снижения потерь и повышения эффективности национальных экономик во всем мире постоянно возрастает. Значение этого инструмента возрастает прежде всего из-за роста самих рисков. Оценка и управление производственными рисками – это насущная экономическая необходимость.

Анализ риска является частью системного подхода к принятию политических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого в нашей стране обеспечением промышленной безопасности, а за рубежом – управлением риском. При этом анализ риска или риск-анализ (Risk Analysis, Process Hazard Analysis) определяется как систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска для отдельных лиц или групп населения, имущества или окружающей среды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных условиях целями оценки производственных рисков является предотвращение:

- травматизма и смертности на производстве;
- материальных потерь;
- нарушений законодательства;
- прямых и косвенных издержек, связанных с возможными происшествиями.

Оценка риска обеспечивает:

- понимание потенциальных опасностей и воздействия их последствий на достижение установленных целей организации;
- получение информации, необходимой для принятия решений;
- понимание опасности и ее источников;
- идентификацию ключевых факторов, формирующих риск, уязвимых мест организации и ее систем;
- возможность сравнения риска с риском альтернативных организаций, технологий, методов и процессов;
- обмен информацией о риске и неопределенностях;
- информацию, необходимую для ранжирования риска;
- предотвращение новых инцидентов на основе исследования последствий произошедших инцидентов;
- выбор способов обработки риска;
- соответствие правовым и обязательным требованиям;
- получение информации, необходимой для обоснованного решения о принятии риска в соответствии с установленными критериями;
- оценку риска на всех стадиях жизненного цикла продукции.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА НА АВИАПРЕДПРИЯТИЯХ

Как правило, анализ риска включает в себя анализ и исследование информации о риске. Он обеспечивает входные данные процесса общей оценки риска, помогает в принятии решений относительно необходимости обработки риска, а также помогает выбрать соответствующие стратегии и методы обработки риска.

Анализ риска включает анализ вероятности и последствий идентифицированных опасных событий с учетом наличия и эффективности применяемых способов управления. Данные о вероятности событий и их последствиях используют для определения уровня риска.

Методы, используемые при анализе риска, могут быть качественными, количественными или смешанными.

При качественной оценке риска определяют последствия, вероятность и уровень риска по шкале «высокий», «средний» и «низкий»; оценка последствий и вероятности может быть объединена; сравнительную оценку уровня риска в этом случае проводят в соответствии с качественными критериями.

При количественном анализе оценивают практическую значимость и стоимость последствий, их вероятности и получают значение уровня риска в определенных единицах, установленных при разработке области применения менеджмента риска. Полный количественный анализ не всегда может быть возможен или желателен из-за недостаточной информации об анализируемой системе, видах деятельности организации, недостатка данных, влияния человеческого фактора и подобного или потому, что такой анализ не требуется, или трудозатраты на количественный анализ слишком велики. В таком случае ранжирование рисков высококвалифицированными специалистами может быть более эффективно.

В смешанных методах используют числовую шкалу оценки последствий, вероятности и их сочетания для определения уровня риска по соответствующей формуле. Шкалы могут быть линейными, логарифмическими или могут быть построены по другим принципам. Используемые формулы соответственно могут быть различными.

Оценка риска может быть выполнена с различной степенью глубины и детализации с использованием одного или нескольких методов разного уровня сложности. Форма оценки и ее выходные данные должны быть совместимы с критериями риска, установленными при определении области применения.

При выборе метода оценки риска необходимо учитывать, что метод должен:

- соответствовать рассматриваемой ситуации и организации;
- предоставлять результаты в форме, способствующей повышению осведомленности о виде риска и способах его обработки;
- обеспечивать прослеживаемость, воспроизводимость и верификацию процесса и результатов.

Согласно установившейся мировой практике существует и находит применение довольно большое количество методов выявления и идентификации опасных событий и анализа развития аварийных ситуаций. Используемые методы [3, с. 92–94] могут быть представлены тремя группами:

- первая – сравнительные методы, куда входят методы, основанные на регламентных проверках, ревизии уровней безопасности, относительного разделения потенциально опасных процессов, условий, материалов на категории «штрафных», «кредитуемых» и др.;
- вторая – так называемые основные методы, включающие: исследование риска эксплуатации путем регулярного обследования объекта с целью выявления возможных отклонений от нормативов; анализ состояний отказов оборудования, приборов и их последствий, в частности реакций системы на отказы; оценку результатов неожиданных событий по схеме «что, если?» и др.;

- третья – методы, основанные на разработке, построении и анализе логических диаграмм: деревьев событий, причинно-следственных связей, надежности человеческого фактора.

К числу методов, которые дают наилучшие результаты, следует отнести: метод анализа деревьев отказов, метод анализа дерева событий и метод анализа причинно-следственных связей, сочетающий в себе два предыдущих метода. При реализации этих методов рассматриваются все возможные пути развития аварийных процессов. В первом методе за основу берется анализ надежности и отказов систем. При этом большое значение придается построению дерева отказов, которое бы отражало все возможные наложения отказов и возникающие при этом последствия. Дерево отказов определяет структуру и последовательность вероятностных расчетов по оценке риска возникновения возможных аварий [4].

В методе анализа дерева событий рассматриваются события, влекущие за собой в конечном счете аварию, выделяется преобладающая последовательность этих событий. За начальную точку дерева событий берется исходное событие. Перечень исходных событий, которые могут явиться причиной развития аварийных процессов, устанавливается при проектировании объекта и содержится в технической документации. Затем осуществляется логический перебор различных путей развития аварии (ветвей дерева событий) и ее возможных последствий. Построить дерево событий, которое бы учитывало все возможные ситуации, нелегко, особенно для сложных технических систем (каким может являться летательный аппарат). Это обусловлено разнообразием используемого оборудования, систем и приборов, большим количеством возможных путей развития аварий. Поэтому при построении дерева событий и проведении анализа идут по пути исключения событий, не вносящих существенного вклада в вероятность реализации последствий или являющихся практически невозможными в силу противоречия тем или иным физическим законам. С помощью дерева событий строится расчетная схема по оценке вероятности возникновения возможных аварийных ситуаций.

В настоящее время получил довольно широкое развитие метод оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций, основанный на анализе причинно-следственных связей. В этом методе также предусматривается построение расчетной диаграммы, которая связывает отказы и опасные события в причинно-следственные цепочки. Каких-то определенных рекомендаций по конструированию причинно-следственных диаграмм, соотношению элементов отказа и опасных событий в их цепочках еще не сформулировано.

Для проведения исследований по безопасности техногенно опасных объектов и расчетов по оценке риска разрабатываются модели источников опасности, диаграммы деревьев происшествий и событий – исходов аварии (катастрофы) с учетом всех возможных вариантов их возникновения и развития.

Стоит отметить, что при анализе развития аварий, катастроф, возможно, целесообразно использование известных из теории вероятности формул Байеса. С их помощью могут быть определены апостериорные вероятности реализации возможных гипотез возникновения и развития аварийного процесса.

Вероятность возникновения и развития аварии в соответствии с гипотезой H_s определяется по формуле

$$P(H_s|A) = \frac{P(H_s)P(A|H_s)}{\sum_{k=1}^n P(H_k)P(A|H_k)}, \quad (1)$$

где $P(H_s|A)$ – искомая апостериорная, условная вероятность; A – случайное событие возникновения аварии; $P(H_s)$, $P(H_k)$ – априорные вероятности реализации сценариев (гипотез) H_s и H_k ; $P(A|H_s)$, $P(A|H_k)$ – априорные вероятности возникновения аварии по сценариям (гипотезам) H_s и H_k .

Если число принимаемых во внимание сценариев возникновения и развития аварии (гипотез) равно n , то

$$\sum_{k=1}^n P(H_k) = 1; \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^n P(H_s|A) = 1. \quad (3)$$

Для моделирования функционирования техногенно опасных объектов, которые могут классифицироваться как организационно-технические системы, также приемлема динамическая модель материальной системы, описанная П.Г. Беловым. Такого рода модель, представленная на рис. 1, дает более широкие возможности для проведения исследований, чем использование указанной выше модели «человек – машина – среда», имеющей общий характер.

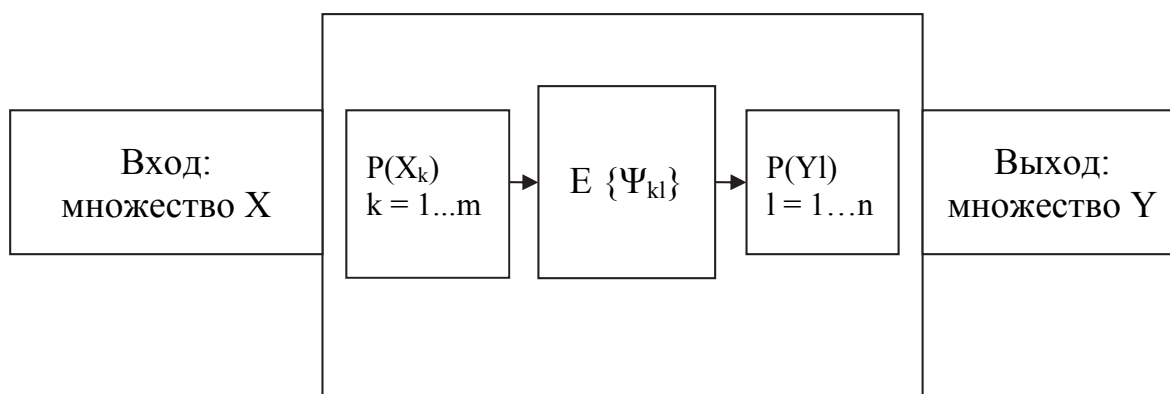


Рис. 1. Модель материальной динамической системы
Fig. 1. The model of a material dynamic system

Рассматриваемая динамическая модель может применяться для моделирования не только обычных организационно-технических систем, но также и для так называемых систем полиэрготехнического характера, отличающихся наличием в своем составе разнородных организационных структур и многообразием инженерно-технических систем и средств, каковым является авиапредприятие.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Управление рисками в области охраны труда и промышленной безопасности является составной частью Системы управления охраной труда и промышленной безопасности авиапредприятия и направлено на повышение эффективности ее функционирования [5].

Знание источников опасности, инструментов оценки рисков, степени воздействия опасностей на людей и принятие необходимых мер по снижению или устранению этого воздействия является обязательным условием безопасности труда при осуществлении производственной деятельности.

Управление рисками осуществляется при выполнении каждой производственной операции, выполняемой работниками предприятия, и направлено на исключение (снижение) неприемлемых рисков за счет реализации соответствующих защитных мер [6].

Процесс управления рисками является систематическим и постоянным, включает в себя:
– идентификацию опасностей;

- оценку риска;
- разработку и реализацию защитных мер до начала производства работ.

На предприятиях управление рисками должно проводиться в 2 этапа:

1 этап – первичная идентификация и оценка рисков перед производством работ, на которые отсутствуют утвержденные Карты оценки риска;

2 этап – повторная (периодическая) идентификация и оценка рисков перед производством работ, на которые разработаны и утверждены Карты оценки риска.

Управление рисками на 1 этапе состоит из:

- планирования и организации работ;
- первичной идентификации опасностей;
- оценки рисков;
- разработки защитных мер;
- оформления Карты оценки рисков.

Для организации работ по управлению рисками на 1 этапе издается приказ руководителя авиапредприятия, которым определяются:

- перечень всех производственных операций, осуществляемых на объекте (в подразделении) с учетом деятельности персонала;
- состав рабочих групп по оценке рисков (далее – рабочая группа);
- график работ по идентификации опасностей и оценке рисков;
- порядок внутреннего обучения рабочих групп методике управления рисками.

В состав рабочей группы включаются:

- руководитель рабочей группы – руководитель объекта производства работ основного и вспомогательного производства/руководитель структурного подразделения;
- специалист службы ОТ, ПБ и ООС;
- непосредственные исполнители работ.

Перед оценкой рисков для рабочих групп в обязательном порядке проводится внутреннее обучение методике оценки риска.

Далее проводится первичная идентификация опасностей, целью которой является выявление всех опасностей, исходящих от технологического процесса, опасных веществ, выполняемых работ, оборудования, инструмента, а также людей, участвующих в технологическом процессе.

Опасности подразделяются на пять основных категорий в зависимости от природы их действия: физические, химические, эргономические, биологические, природные и риски, связанные с человеческим фактором.

Перечень не является всеобъемлющим, в случае выявления опасностей, не указанных в данном перечне, рабочая группа формулирует наименование опасностей самостоятельно и включает их в карту оценки рисков [7].

Перед первичной идентификацией опасностей, для всестороннего рассмотрения предстоящей работы, рабочими группами осуществляется сбор следующей информации по каждому виду работы:

- описание задания, срок и частота его выполнения, включая задания, связанные с разными этапами работы (подготовительные работы, выполнение работы, заключительные работы);
- время проведения и продолжительность работы (продолжительность работы в часах/сменах, время суток, время года и т. д.);
- место, где непосредственно будут выполняться работы, информация об оборудовании, используемому для доступа к этому месту;
- информация о работнике (ах) (обязанности, квалификация, профессиональная подготовка, особые навыки, необходимые для выполнения работы);

- другие лица, на которых данная работа может повлиять каким-либо образом (посетители, рабочие подрядных организаций, другие сотрудники предприятия и т. д.);
- уровень компетентности работников, занятых в выполнении данной задачи, включая и пройденные ими специальные курсы, мнение непосредственного руководителя;
- существующие инструкции по безопасности, эксплуатации и видам работ, планы работ;
- используемое оборудование, инструкции по его эксплуатации, а также особые риски (ручные инструменты с электрическим приводом, погрузчики, такелажное и грузоподъемное оборудование и т. д.);
- грузы, материалы или объекты, которые необходимо будет транспортировать, включая их габариты, форму, допустимую дистанцию транспортировки и высоту штабелировки;
- используемые источники опасности: электричество, давление, сжатый воздух, азот, охлажденная вода и т. д.;
- данные об используемых химических веществах;
- требования применяемых инструкций по промышленной безопасности и охране труда, инструкций по эксплуатации или методам проектирования, а также стандартов Общества;
- требования безопасности, установленные законодательством РФ и нормативными документами (ГОСТ, ГОСТ Р, СНиП, правила безопасности и т. д.);
- существующие уже меры безопасности и контроля (инструкции по безопасности, инспекции, тесты, планы работ, утвержденные методы, используемые наряды-допуски, система аудиторских проверок, контроль со стороны руководства и т. д.);
- возможные аварийные ситуации и действия в них, включая и ситуации, возникающие в результате повреждения технологических установок или оборудования, нарушения герметизации, сбоев в технологических процессах/производстве.
- взаимодействие с другими работниками (в том числе подрядчиками) при одновременном выполнении работ на рабочей площадке.

При проведении оценки рисков производственной операции их уровень определяется как сочетание вероятности наступления и тяжести возможных последствий опасного события.

Определение тяжести возможных последствий опасного события

После первичной идентификации опасностей рабочая группа определяет тяжесть возможных последствий от воздействия каждой опасности для каждого этапа производственной операции.

Тяжесть возможных последствий определяется в соответствии с табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Критерии определения тяжести ущерба The criteria of the occurrence probability

Вербальное описание последствий в случае реального возникновения опасности (опасного действия, ситуации)	Тяжесть ущерба
1	2
Пострадавшему не требуется оказание медицинской помощи. Травма, требующая оказания простых мер первой помощи (легкие ушибы, синяки и т. п.). Неблагоприятные изменения в организме работника, восстанавливающиеся к началу следующей смены	Незначительный ущерб (микротравма, дискомфорт работника на рабочем месте)

Продолжение таблицы 1

Травма с необходимостью обращения за медицинской помощью с потерей трудоспособности не более 3 дней. Незначительное воздействие на организм работника, организм восстанавливается не более чем через 3 дня	Малый ущерб (воздействие на состояние здоровья работника незначительно)
Пострадавшего работника доставляют в организацию здравоохранения или требуется ее посещение с потерей трудоспособности до 30 дней. Проявляются начальные признаки профессионального (ых) заболевания (й) после 15 лет работы и более	Средний ущерб (неблагоприятное воздействие на состояние здоровья работника)
Длительное расстройство здоровья работника с временной потерей трудоспособности от 30 до 60 дней. Требуется лечение в стационаре организации здравоохранения	Большой ущерб (значительная утрата трудоспособности)
Травма, повлекшая смерть работника (работников). Травма, заболевание с потерей трудоспособности, приведшая к постоянной инвалидности или профессиональному заболеванию. Стойкая утрата трудоспособности	Очень большой ущерб (смертельный случай, хроническое заболевание, опасность развития острых поражений)

Определение вероятности опасного события

Вероятность опасного события определяется в соответствии с табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Критерии вероятности возникновения
The matrix of the risks estimation

Вербальное описание вероятности (частоты) возникновения опасности (опасного действия, ситуации)	Вероятность (частота) возникновения (ВВ)
1	2
Опасность или её проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, не должны возникнуть за все время профессиональной деятельности работника. Получение травмы, вредного воздействия на организм работника при реализации опасного события практически исключено	Очень низкая (практически невозможно)
Сложно представить опасное событие, однако оно может произойти. Для реализации опасного события необходимы многочисленные поломки (отказы) оборудования, ошибки персонала	Низкая
Опасность или ее проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, возникают лишь в определенные периоды профессиональной деятельности работника. Опасное событие иногда может произойти, нехарактерно, но может произойти	Средняя
Опасность или ее проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, возникают постоянно в течение всей профессиональной деятельности работника. Опасное событие происходит достаточно регулярно, высокая степень возможности реализации опасного события	Высокая
Опасное событие, скорее всего, произойдет. Событие происходит очень часто	Очень высокая

В случае отсутствия у участников группы единого мнения при оценке тяжести ущерба и/или вероятности возникновения опасности обязанность по выбору уровня тяжести ущерба и/или вероятности возникновения возлагается на руководителя группы оценки риска.

Уровень риска этапов производственных операций определяется как область сочетания вероятности и тяжести возможных последствий в соответствии с табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Матрица оценки рисков
Matrix of the estimation of the risks

МАТРИЦА ОЦЕНКИ РИСКОВ						
ПОСЛЕДСТВИЯ	КРУПНЫЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ	II	II	III	III	III
	КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ	I	II	III	III	III
	ТЯЖЕЛЫЕ	I	II	II	III	III
	ЛЕГКИЕ	I	I	II	II	III
	МАЛОЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ	I	I	I	I	II
		ОЧЕНЬ НИЗКАЯ	НИЗКАЯ	СРЕДНЯЯ	ВЫСОКАЯ	ОЧЕНЬ ВЫСОКАЯ
		ВЕРОЯТНОСТЬ				

С целью снижения неприемлемого (среднего или высокого) уровня риска до приемлемого определяются мероприятия по его снижению в соответствии с иерархией защитных мер, составленной в порядке снижения эффективности защиты.

Одним из основных инструментов управления рисками является Карта оценки рисков.

Карта оценки рисков оформляется для каждой производственной операции, выполняемой работниками предприятия, по результатам работы по управлению риском на 1 этапе.

При управлении риском на 2 этапе, перед началом проведения всех производственных операций непосредственный руководитель работ совместно с исполнителями проводит оценку фактического уровня рисков с использованием разработанной и утвержденной Карты оценки рисков.

В целях идентификации опасностей, оценки рисков и реализации защитных мер, обеспечивающих допустимый уровень рисков предстоящей работы, руководитель с исполнителями обязан всесторонне рассмотреть производственное задание и посетить место проведения работ.

В зависимости от результатов оценки рисков руководитель работ принимает одно из следующих решений:

- работу начинать разрешается – при отсутствии дополнительных опасностей и фактического выполнения защитных мероприятий Карты оценки рисков;
- работу выполнять запрещается до снижения уровня риска до приемлемого – при идентификации дополнительных опасностей, требующих разработки и реализации дополнительных защитных мероприятий за счет собственных ресурсов;
- работу выполнять запрещается – при идентификации дополнительных опасностей, требующих для снижения рисков дополнительных ресурсов и решения вышестоящего руководства.

Производство работ при неприемлемом (недопустимом) уровне рисков, а также без проведения оценки рисков всеми производителями работ запрещается [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В ст. 209 Трудового кодекса Российской Федерации под профессиональным риском понимается вероятность причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных и/или опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору или в иных случаях, установленных настоящим Кодексом, другими федеральными законами [9]. Оценка и управление профессиональными рисками в настоящее время является составной частью Системы управления охраной труда. Без анализа и управления профессиональными рисками невозможно создать безопасные условия труда, снизить травматизм и уменьшить профессиональные заболевания [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Феоктистова О.Г., Наумова Т.В.** Философские предпосылки правовой регламентации риска // Научный вестник МГТУ ГА, 2013, № 196, М., МГТУ ГА. С. 96–101.
2. Концепция приемлемого риска // Информационный ресурс по охране труда. [Электронный ресурс]. URL: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_39.html (дата обращения: 17.01.2017).
3. **Белов П.Г.** Теоретические основы системной инженерии безопасности. Киев: КМУГА, 1997.
4. **Феоктистова О.Г.** Основы повышения эффективности управления системой экологической безопасности при техническом обслуживании и ремонте авиационной техники: монография. М.: МГТУ ГА, 2008. 314 с.
5. ГОСТ Р 12.0.230-2007 ССБТ. Общие требования к системе управления охраной труда в организации. Системы управления охраной труда. Общие требования [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 08.01.2017).
6. ГОСТ Р 12.0.010-2009 ССБТ. Определение опасностей и оценка рисков [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 08.01.2017).
7. РД 03-418-01 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 08.01.2017).
8. Международный стандарт OHSAS 18001:2007. Система менеджмента профессиональной безопасности и здоровья [Электронный ресурс]. URL: www.cert-academy.org (дата обращения: 08.01.2017).
9. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 03.07.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017) [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 08.01.2017).
10. **Феоктистова Т.Г., Феоктистова О.Г.** Управление техносферной безопасностью: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2014. 100 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Феоктистова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой ВМКСС МГТУ ГА, oksana-feoktistova@yandex.ru.

Туркин Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «авиационно-ракетные системы» МАИ (НИУ), kafedra_602@mail.ru.

Баринов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «комплексная безопасность в строительстве» НИУ МГСУ, barinov100@bk.ru.

RELEVANCE OF PROCESS RISK ASSESSMENT IN AIRLINES

Oksana G. Feoktistova¹, Igor K. Turkin², Sergey V. Barinov³

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

² *Moscow Aviation Institute (national research university), Moscow, Russia*

³ *Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia*

ABSTRACT

The notion of “the concept on assumed risk” that took over from the outdated concept of absolute security is analyzed, the increasing significance of operating risk assessment at the present stage is noted. Some basic risk assessment techniques are considered. Matrix technique of risk assessment is considered more thoroughly, and it may be used in risk assessment of airlines in the context of labour protection management system.

The ability to correctly assess risks and develop appropriate precautionary measures will allow airlines to avoid incidents leading to drastic consequences for staff, as well as to direct and indirect costs for the enterprise among which there could be singled out both direct property damage and loss of profit and expenses connected to incident investigation, penalty and compensation payment, loss of business reputation and so on. To reduce the rate of accidents and to develop safe activities skills for airlines staff a risk assessment chart is supposed to be implemented, which will be an efficient accidents prevention involving the staff in the process and making them follow safe working conditions.

Process risk assessment is an integral part of assessment of the whole enterprise activity and work efficiency of a department and particular workers evaluation system. Labour protection activity should be based on risk identification and its control. Risk assessment is a keystone of labour protection activity planning.

Key words: airline, risk, process risk, dangerous factors, harmful factors.

REFERENCES

1. Feoktistova O.G., Naumova T.V. *Filosofskie predposylki pravovoj reglamentacii riska* [The philosophical preconditions of legal risk]. The Scientific Bulletin of MSTUCA, 2013, no. 196. 96–101 pp. (in Russian)
2. *Koncepciya priemlemogo riska // Informacionnyj resurs po ohrane truda* [The concept of acceptable risk. Information resource on the industrial safety measures]. Available at: http://ohrana-bgd.ru/bgdobsh/bgdobsh1_39.html (accessed: 17.01.2017). (in Russian)
3. Belov P.G. *Osnovy povysheniya ehffektivnosti upravleniya sistemoy ehkologicheskoy bezopasnosti* [The theoretical bases of system engineering of safety]. Kiev, KMUGA, 1997. (in Russian)
4. Feoktistova O.G. *Osnovy povysheniya ehffektivnosti upravleniya sistemoy ehkologicheskoy bezopasnosti pri tehničeskoy obsluzhivani i remonte aviatsionnoy tehnikoy* [The fundamentals of improving the efficiency of environmental safety management in the maintenance and repair of aviation equipment]. Monograph. Moscow, MSTUCA, 2008, 314 p. (in Russian)
5. GOST R 12.0.230-2007 SSBT *Obshchie trebovaniya k sisteme upravleniya ohranoj truda v organizacii. Sistemy upravleniya ohranoj truda. Obshchie trebovaniya* [General requirements for the control system of industrial safety measures in an organization. Control systems of industrial safety measures. General requirements]. Available at: www.consultant.ru (accessed: 08.01.2017). (in Russian)
6. GOST R 12.0.010-2009 SSBT *Opredelenie opasnostej i ocenka riskov* [The determination of dangers and the estimation of risks]. Available at: www.consultant.ru (accessed: 08.01.2017). (in Russian)
7. RD 03-418-01 *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnyh proizvodstvennykh ob"ektov* [The operating instructions on conducting of the analysis of the risk of dangerous production units]. Available at: www.consultant.ru (accessed: 08.01.2017). (in Russian)
8. *Mezhdunarodnyj standart OHSAS 18001:2007. Sistema menedzhmenta professional'noj bezopasnosti i zdorov'ya* [International standard OHSAS 18001:2007 the system of the management of professional safety and health]. Available at: www.cert-academy.org (accessed: 08.01.2017). (in Russian)

9. *Trudovoj kodeks Rossijskoj Federacii* [The Labor Code of the Russian Federation. The Federal Law] from 30.12.2001 N 197-FZ (ed. from 03.07.2016) (with chg. and add., vstup. in view s 01.01.2017) Available at: www.consultant.ru (accessed: 08.01.2017). (in Russian)

10. **Feoktistova T.G., Feoktistova O.G.** *Upravlenie tekhnosfernoj bezopasnost'yu* [Control of the technospheric safety: teaching aid]. Moscow, MGTU GA, 2014, 100 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana G. Feoktistova, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Calculating Machine, Complexes, Systems and Networks Chair of Moscow State Technical University of Civil Aviation, oksana-feoktistova@yandex.ru.

Igor K. Turkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Aviation-Missile Systems Chair of MAI (Research Institute), kafedra_602@mail.ru.

Sergey V. Barinov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Complex Safety in the Building Department, NIU MGSU, barinov100@bk.ru.

Поступила в редакцию 22.02.2017
Принята в печать 25.05.2017

Received 22.02.2017
Accepted for publication 25.05.2017

ББК 05
Н 34
Св. план 2017

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 20, № 04, 2017
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 20, No. 04, 2017

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 24.08.17 г.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

11,4 уч.-изд. л.

20,1 усл. печ. л.

Заказ № 217/112

Тираж 70 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 Респечати 84254
© Московский государственный
технический университет ГА, 2017