

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

# **НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК МГТУ ГА**

**№ 198 (12)**

Издается с 1998 г.

**Москва  
2013**

*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 -** заслуженный юрист РФ, д-р юрид. наук, д-р техн. наук, проф. Б.П. Елисеев (МГТУ ГА)

**Зам. главного редактора -** д-р техн. наук, проф. В.В. Воробьев (МГТУ ГА)

**Ответственный секретарь главной редакции -** д-р техн. наук, доц. О.Г. Феоктистова (МГТУ ГА)

**Члены главной редакции -** почетный работник науки и техники, д-р филос. наук, проф. О.Д. Гаранина (МГТУ ГА);  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
д-р физ.-мат. наук, проф. А.И. Козлов (МГТУ ГА);  
заслуженный деятель науки РФ,  
д-р техн. наук, проф. В.Г. Ципенко (МГТУ ГА);  
д-р техн. наук, проф. В.Т. Калугин (МГТУ им. Н.Э. Баумана);  
заслуженный деятель науки РФ,  
д-р физ.-мат. наук, проф. Д.С. Лукин (МФТИ);  
заслуженный работник транспорта РФ,  
д-р техн. наук, проф. В.С. Шапкин (ГосНИИ ГА);  
заместитель декана факультета Национальной школы гражданской авиации (ENAC) Бруно Ламискарре (Тулуза, Франция);  
директор Межведомственного Центра промышленных исследований в авиации Франко Персиани (Болонский университет, Италия);  
профессор кафедры аэрокосмической техники  
Университета Севильи Дамиан Ривас (Испания)

### **Редакционная коллегия выпуска**

**Ответственный редактор выпуска** - д-р техн. наук, проф. Е.Е. Нечаев (МГТУ ГА)

**Ответственный секретарь выпуска** - д-р техн. наук О.Г. Феоктистова (МГТУ ГА)

E-mail: e.nechaev@mstuca.aero

тел. +7 (499) 457-70-59

ISBN 978-5-86311-904-5

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

---

---

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

---

---

№ 198 (12)

2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Глухов Ю.Е., Бобина А.Д.</b> Повышение эффективности организации воздушного движения в Московском узловом диспетчерском районе.....	5
<b>Нечаев Е.Е., Баталюк Д.А., Рябков П.В.</b> Ориентация воздушного судна путем использования сигналов спутниковых радионавигационных систем.....	13
<b>Горбачёв О.А., Иванов В.Б., Хазанов Д.В., Холмогоров А.А.</b> Временные вариации ошибок позиционирования в спутниковой навигационной системе GPS.....	23
<b>Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е.Е.</b> Алгоритм назначения приоритетной очередности случайно расположенным в пространстве воздушным судам для выхода на стандартный маршрут прибытия.....	31
<b>Малыгин В.Б., Тин Пхон Чжо.</b> Задача бесприоритетного обслуживания самолётов при их попадании в тромбон во время захода на посадку.....	37
<b>Малыгин В.Б., Тин Пхон Чжо, Турков А.Н.</b> Методика определения технологических возможностей диспетчера по управлению группой воздушных судов.....	41
<b>Зайцев А.В., Михайлин Д.А., Тин Пхон Чжо.</b> Система приоритетного обслуживания при внедрении автоматизированного управления прилетом в воздушном пространстве Московского аэроузла.....	45
<b>Ву Суан Хыонг, Зайцев А.В., Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо.</b> Автоматический контроль безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов....	51
<b>Платонова Е.С., Рудельсон Л.Е., Степанова А.И.</b> Метод ускорения поиска данных в системе управления аэронавигационной информацией.....	60
<b>Агафонова И.Ю., Рудельсон Л.Е.</b> Алгоритмы манипулирования аэронавигационными данными на компьютерных информационных образах.....	68
<b>Пунт В.А.</b> Особенности моделирования статических и динамических объектов тренажера диспетчерского персонала.....	76
<b>Филин А.Д.</b> Метод расчета шага дискретизации функционирования моделей в тренажерно-моделирующих комплексах операторов радиолокационного контроля.....	80
<b>Затучный Д.А.</b> Оценка вероятности безотказной работы при передаче информации.....	88
<b>Вайс С.Н.</b> Особенности адаптивной пространственно-временной обработки сигналов в самолетных станциях дальнего радиолокационного обнаружения.....	91
<b>Кобылкин Ю.И., Сосновский М.Ю.</b> Об ориентации осей чувствительности датчиков избыточных бесплатформенных инерциальных систем.....	97
<b>Гаглов Э.П.</b> Проблемы функционирования системы управления воздушным движением...	103

<b>Гаглов Э.П., Юркин Ю.А.</b> Метод случайных фрагментов деятельности в профессиональной подготовке персонала служб управления воздушным движением.....	108
<b>Губенко С.В., Юркин Ю.А.</b> Методология подготовки диспетчерского персонала в гражданской авиации.....	113
<b>Коновалов А.Е., Юркин Ю.А.</b> Средства поддержки принятия решения диспетчерами управления воздушным движением.....	118
<b>Горбачев М.В., Горбачев В.И.</b> Инновации в авиационной промышленности и на транспорте....	124
<b>Иванов А.Ю., Астапов К.А., Плясовских А.П.</b> Некоторые вопросы построения систем голосового управления в тренажерных комплексах управления воздушным движением гражданской авиации.....	129
<b>Шахтарин Б.И., Вельтищев В.В., Асланов Т.Г.</b> Имитационное моделирование систем фазовой автоподстройки.....	136

УДК 656.7.052

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ В МОСКОВСКОМ УЗЛОВОМ ДИСПЕТЧЕРСКОМ РАЙОНЕ\*

Ю.Е. ГЛУХОВ, А.Д. БОБИНА

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

Рассматриваются проблемы московского узлового диспетчерского района и предлагаются пути их решения, а также снижение степени их влияния на эффективность ОВД.

**Ключевые слова:** планирование, структура, QNH, arrival/departure, point merge, OFFSET RNAV, RNP, AMAN/DMAN, АЗН-В, согласование.

### 1. Актуальные проблемы

На сегодняшний день работа диспетчера РЛУ и ПК Московского АДЦ может быть характеризована следующими усложняющими факторами (на примере Шереметьевского направления - секторов Москва-подход 1, 2, 9, Шереметьево-круг) [2]:

1) большая интенсивность и неравномерная плотность воздушного движения вследствие отсутствия эффективной борьбы с перегрузками на этапах планирования потоков ГЦ ЕС ОрВД. Периодическое их превышение над пропускной способностью секторов и аэродромов;

2) несовершенство структуры ВП и конфигурации площади маневрирования аэродромов. Полеты на основных аэродромах московского аэроузла по всем географическим направлениям при отсутствии бесконфликтных схем и маршрутов вылета и прилета в ограниченном ВП. Отсутствие скоростных РД и не достаточно эффективное использование двух ВПП на аэродромах МУДР;

3) отсутствие разделения секторов подхода на прибытие и отправление не позволяет одновременно эффективно обслуживать воздушное движение при постоянном разделении внимания для решения ПКС вылетающих ВС с прибывающими в одном потоке;

4) отсутствие единых методов формирования упорядоченного потока и, как следствие, почти абсолютное непредсказуемое (и неопубликованное) векторение на любом этапе полета в пределах МУДР. Негативный эффект векторения возникает при увеличении числа наводимых ВС – дефицит времени диспетчера на принятие решений и выдачу указаний заставляет создавать повышенные неоптимальные интервалы [1];

5) несовершенство нормативных документов: ограничения использования преимуществ хорошей погоды для достижения заявленной пропускной способности ВПП (таких как процедура «за бортом» [4]). Неопределенность с использованием зональной навигации;

6) использование морально и технически устаревшего оборудования АС УВД «TERCAS», отсутствие наземных средств обеспечения навигации при RNP1. Дешевые (по сравнению с локаторами) приемники информации АЗН-В до сих пор не обеспечивают диспетчеров важной для ОВД информацией (приборная скорость и другая информация от бортовой системы управления полетом FMS) [3];

7) отсутствие системы управления прилетом и вылетом AMAN/DMAN [3] не позволяет обеспечивать расчет времени предстоящей задержки и, соответственно, эффективно его тратить на земле – отложенным запуском двигателей без потери своей очереди, и в небе – скоростью на

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)

крейсерском эшелоне заранее в РЦ и в зонах ожидания, также сохраняя очередность. Отсюда получасовые задержки на предварительном старте и уход на запасной аэродром на пределе запаса топлива;

8) «испорченный телефон» в процессе согласования условий выполнения полетов с диспетчерами смежных направлений. Повышенное влияние человеческого фактора в условиях ограниченной информированности об обстановке и намерениях по управлению ею. Так диспетчер круга не видит, что происходит на площади маневрирования своего аэродрома и не знает, какой интервал будет оптимален в каждом конкретном случае. А диспетчера смежных подходов могут лишь догадываться об очередности ВС, заходящих через их сектор на смежный аэродром, и не могут эффективно обеспечивать задачу ускорения и поддержания упорядоченного потока управлением скоростями, спрямлениями и созданием продольных интервалов на выходе из своего сектора.

## 2. Предлагаемые пути решения

Возможные пути решения обозначенных выше проблем или снижения их влияния на эффективность ОВД в соответствующем порядке:

1) приоритет в формировании расписания отдавать регулярным рейсам авиакомпаний, базирующихся на своих аэродромах Шереметьево, Внуково и Домодедово. На остальные рейсы выдавать слоты в соответствии с государственными приоритетами ИВП [7], не допуская превышения пропускной способности аэродрома и секторов, опираясь на реальную статистику. Чтобы перевести статистические данные в инструмент расчета реальной пропускной способности следует определить влияние следующих взаимосвязанных факторов на интервалы между заходящими на посадку ВС: состояние и конфигурацию работы ВПП (время занятости ВПП на разных МПУ при разных значениях коэффициента сцепления и типах операций на одну или несколько ВПП), метеоусловия (от возможностей ВЗП «за бортом» до процедур ограниченной видимости), плотность и конфигурацию потока (прилет/вылет, сочетания типов весовых категорий). Данные критерии сейчас не учтены в предлагаемой методике расчета НПС [6]. В международной практике используется принцип переложения ответственности за нарушение правил ОВД в условиях перегрузки сектора с диспетчера на органы, допустившие эту перегрузку. Подобное нововведение у нас помогло бы сдвинуть с мертвой точки решение проблемы борьбы с перегрузками, само собой, обозначив для этого инструменты на разных этапах планирования. Как пример оперативного инструмента борьбы с методически повторяющимися перегрузками, кроме применяемых сегодня, можно предложить создание самостоятельных секторов управления в зонах ожидания с опубликованными границами ответственности. При отсутствии пересекающихся маршрутов НПС сектора ожидания может быть выше любого другого. Тогда диспетчеры ожидания смогут формировать необходимую интенсивность и плотность прибывающего потока в смежных секторах с помощью управления интервалами расчетного времени начала захода на посадку (Estimated Approach Time) [3]. Например, один из таких секторов может быть размещен в МУДР над Клином, точка ожидания - ЛАТБИ. А границы сектора могут быть определены следующими точками: NAMIN, SW, AR, OBELU. Сектор может разъединяться со смежным подходом М1 или М9 при необходимости (рис. 1) [5];

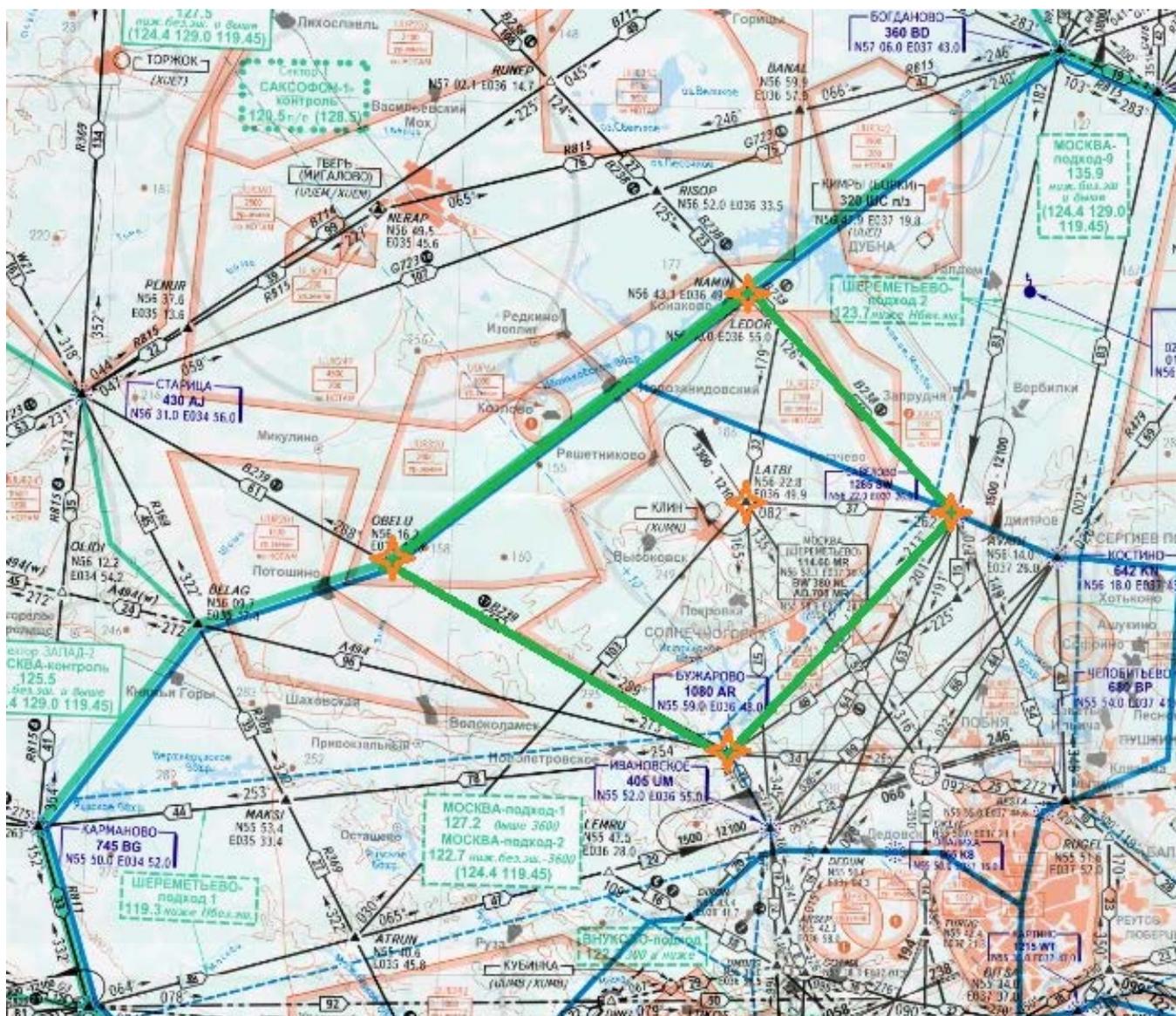
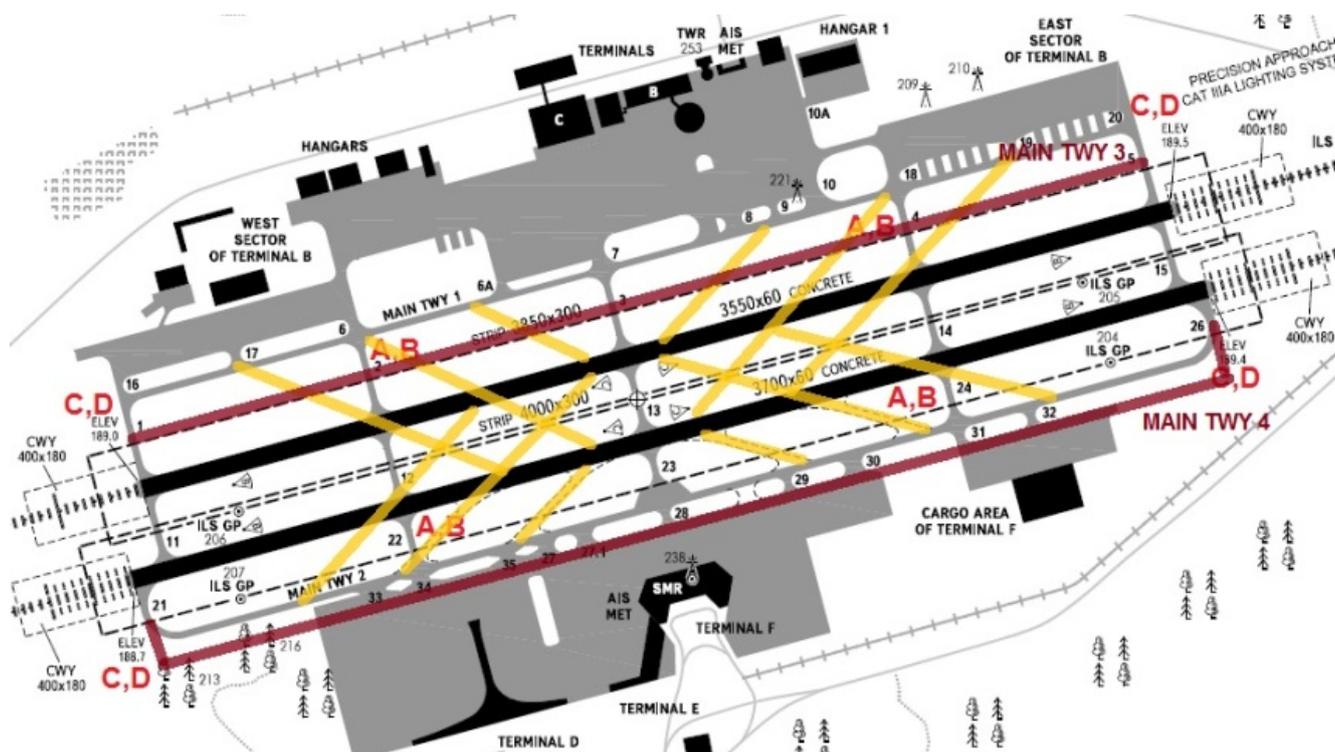


Рис. 1. Сектор ожидания над Клином

2) достаточно часто тяжелому самолету на предварительном или исполнительном старте не хватает интервала между плотно заходящими на посадку ВС как при работе одной, так и двух ВПП. При этом эти интервалы позволяют взлететь ВС меньшей категории ИКАО [4]. Для обеспечения принципа наименьшей средней задержки [4] целесообразно обеспечить меньшим ВС взлет, используя для них смещенный порог без снижения уровня безопасности, так как оставшаяся длина ВПП более 2500 м для них достаточно практически при любой взлетной массе и метеоусловиях (рис. 2). Второй способ решения этой проблемы – оперативное чередование левой и правой ВПП на посадку и, тем самым, увеличение времени на занятие исполнительного и взлет. Создание дублирующих магистральных РД позволит легко конфигурировать взлет ВС друг за другом по разным схемам, что является условием процедуры применения сокращенных минимумов эшелонирования на ВПП [4]. Когда на один и тот же предварительный старт можно будет попасть двумя путями, то по одному маршруту руления следует направлять ВС для одних схем выхода, а по второму – для других, и чередовать взлет. Необходима сеть скоростных РД на каждую ВПП (рис. 2).



**Рис. 2.** Перспективы Шереметьево: разделение стартов по категориям ИКАО, магистральные дублеры и скоростные рулежные дорожки [5]

В структуре ВП Шереметьевского направления МУДР смена направления полета западных маршрутов (FK-UM, AR-BG) на обратные позволит упростить воздушную обстановку исключив пересечения вылетов из ШРМ, ВНК и ДМД между собой и с прилетом в ШРМ со стороны основного северо-западного сектора [5]. Весь участок между маршрутами прилета с запада и севера работает только на прилет, открывая возможности для векторения на точки начала схем от AR или SW или схем RNAV в ключе концепции Point Merge [3]. Для обеспечения этой концепции слияния необходимо оставить не более двух направлений захода на посадку – от AR и от SW, исключив остальные схемы STAR. Для исключения точки пересечения в МУДР ВС следующих в классе «А» ВП транзитом запад/восток необходимо также изменить направления маршрутов Быковского направления МУДР на обратные, это также упростит работу прилета и вылета M7 и M8;

3) разделение подхода на прибытие и отправление возможно при предлагаемой выше структуре ВП [5]. Можно сохранить существующие рабочие места. ШК будет руководить в тех же границах, удлиненных на север до LATBI и на запад до LEMRU до единого в МУДР эшелона перехода FL100. При этом полеты на гражданские аэродромы московского аэроузла целесообразно производить только по QNH для обеспечения бесконфликтности взаимозависимых схем. Расширение географических границ ШК необходимо для обеспечения начала снижения по схеме сразу от границ сектора с эшелона перехода. M1 будет сектором прибытия Arrival только в классе ВП «С» ниже FL265 до FL100 в границах BG-AR-SW-BD-NAMIN-OBELU-BELAG-BG с зоной ожидания над LATBI или без нее (тогда она будет на M9). M2 будет отправлением Departure по северному (на NE и TIMIG) и западному (на FK) направлениям и над районом аэродрома выше FL100 до FL265 только в классе ВП «С». Маневры по обгону будут выполняться с помощью боковых попутных интервалов векторением или параллельным смещением OFFSET RNAV [4] к югу и востоку соответствующих маршрутов. M9 будет руководить транзитными бортами в географических границах всего

Шереметьевского направления выше FL265 и, при необходимости, еще в зоне ожидания над LATVI выше FL100 или без нее (тогда она будет на M1). Транзитный прилет во ВНК и ДМД возможен через M9 выше FL265 для соблюдения принципа бесконфликтности или при оперативном согласовании с сектором M2 и смежных направлений на более низких эшелонах. При малой интенсивности полетов сектора могут объединяться в различных конфигурациях в зависимости от преобладающих потоков движения. Прилет в ШРМ с юга и востока имеет меньший приоритет и будет выполняться по маршрутам входа AR-OBELU-NAMIN-LATVI-SW при работе с одним МПУ и SW-NAMIN-OBELU-LATVI-AR при работе с другим через сектор M9 выше FL265 и ниже, при оперативном согласовании с M2 Departure. Регулирование интервалов также осуществляется процедурой «прямо на» [4] точки этих маршрутов, а при необходимости и зоной ожидания над LATVI [5];

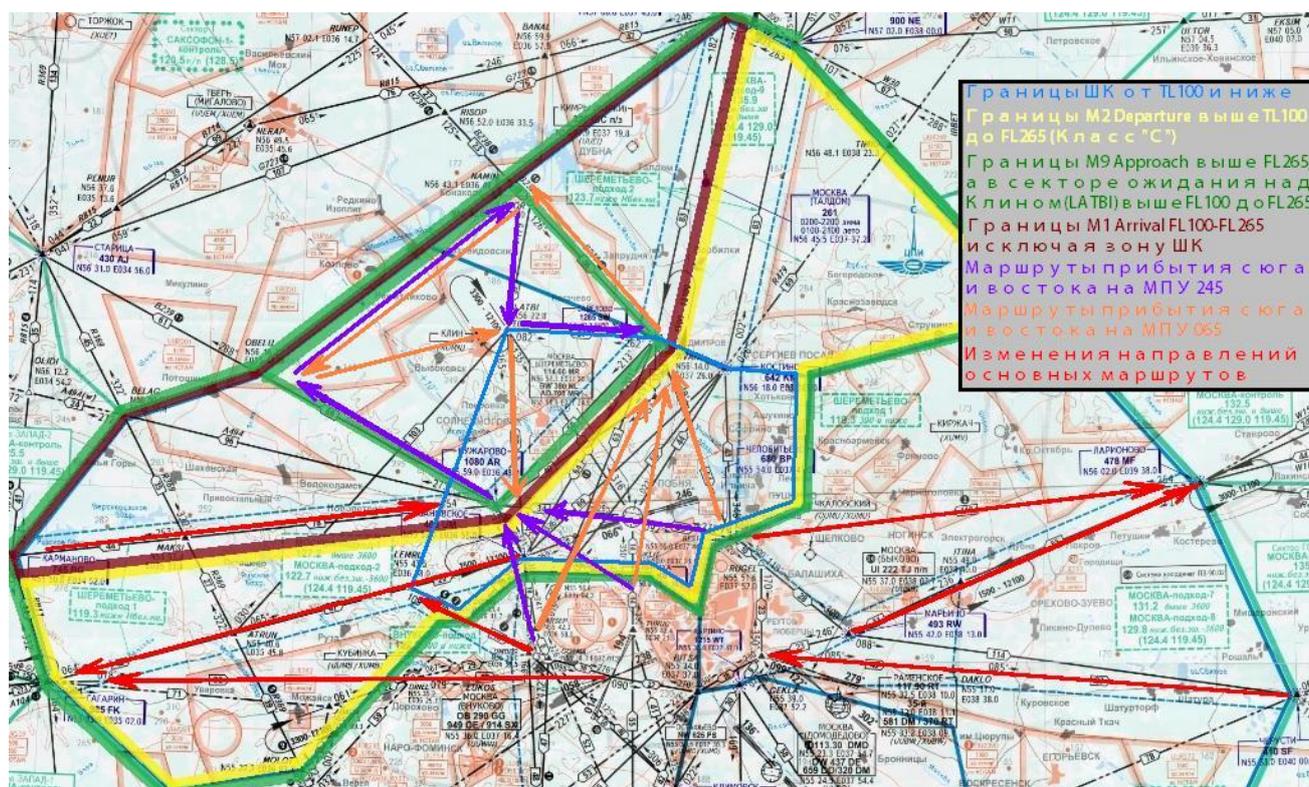


Рис. 3. Предлагаемые изменения направлений основных маршрутов и секторизации [5]

4) реализация предложенной выше структуры решит проблему глобального векторения прилета и вылета (рис. 3);

5) использование в предлагаемой структуре схем зональной навигации типа «веер» и «тромбон» [3] с опубликованными скоростями пролета точек позволит разгрузить диспетчеров по векторению и выровнять поток. Процедура разрешения посадки «за бортом» [4] позволит переложить ответственность по обеспечению эшелонирования на экипажи и уменьшить роль человеческого фактора при дефиците секунд на выдачу голосовой команды на опережение в нарушение существующих правил;

6) новая АС УВД должна максимально автоматизировать все операции голосового согласования - условия входа в свой сектор и запрос на изменение условий входа в смежный (эшелон, маршрут, схема, курс, спрямление, скорость, вертикальная и т.д., т.е. вся задаваемая информация в формуляре сопровождения). Пример: наблюдая относящееся к себе ВС в смежном

секторе (синий формуляр), диспетчер запрашивает у него другой необходимый эшелон, маршрут и скорость вместо запланированных, вводя эти данные в формуляр. Тот диспетчер, обнаружив в формуляре своего ВС запрашиваемые данные, выделенные соответствующим цветом, подтверждает их исполнение самостоятельным вводом. Подтверждение введенных параметров отображается у обоих диспетчеров – согласование проведено без голосовых процедур, не отвлекаясь от прослушивания радиообмена и повышая однозначность согласования, снизив вероятность недопонимания. Использование объединенной информации от локаторов о координатах ВС и АЗН-В, о параметрах полета позволит использовать минимальное количество приемников информации АЗН-В и повысить контроль правильности выдерживания экипажами задаваемых параметров [1] (прогноз траектории, заданной высоты, скоростей). Объединение информации возможно по совпадению позывных и кодов ответчика с приоритетом обнаружения координат от локаторов;

7) системы Arrival и Departure Management [3] даже при неэффективном планировании ГЦ ЕС ОрВД позволят наиболее эффективно реализовывать время задержки заранее с сохранением экипажами своих номеров на посадку и взлет. В расширенных или выделенных формулярах будет всегда отображаться динамическая информация о номере и времени необходимой задержки, которую диспетчеры и экипажи смогут реализовывать заранее оптимальным способом: прилетающие – скоростью и зонами ожидания на больших эшелонах, а вылетающие – отложенным запуском двигателей;

8) проблема «испорченного телефона» решается повышением уровня автоматизации АС УВД, описанного выше. Диспетчер круга в московском АДЦ не находится на вышке хоть и выполняет задачи аэродромного диспетчерского обслуживания [5]. И зачастую он не знает, что происходит на ВПП и в очереди на предварительном старте, и какие интервалы на посадку необходимы, в том числе для обеспечения взлета. Повышение осведомленности позволит повысить эффективность использования ВПП. Реализовать это можно, обеспечив на рабочих местах круга выносные мониторы видеонаблюдения ключевых участков площади маневрирования от соответствующих видеокамер на аэродроме, а также изображение с локатора обзора летного поля. Прописав в технологию работы диспетчеров обязанность обеспечивать на точку выхода из своего сектора РЦ и ДПП обязательный продольный интервал (согласованный в зависимости от сочетания факторов, влияющих на интервалы на заходе на посадку) между заходящими бортами на один и тот же аэродром не меньше минимального в километрах или минутах, можно достичь более комфортной среды ОВД. Это обеспечит возможность одновременного снижения по одному маршруту и слияния потоков в условиях постоянного сокращения интервала. Само собой, необходимо обеспечить для этого диспетчерские инструменты в ключе концепции Point Merge [3] – часть ВП, опубликованного в сборниках аэронавигационной информации для затягивания и спрямления на общую точку выхода векторением или маршрутами RNAV. Повысить эффективность слияния поможет подсистема АС УВД «CORA» на основе данных АЗН-В. Постоянно пересчитывая относительные скорости сближения соседних ВС, она будет рекомендовать максимальные допустимые приборные скорости IAS [1] (рассчитанные с учетом путевых и составляющих ветра на разных высотах и базой данных типов ВС «БАДА» [3]) для обеспечения назначенного интервала на посадку в секундах и км.

### **3. Список сокращений (по порядку в тексте)**

Диспетчер РЛУ и ПК МАДЦ – диспетчер радиолокационного управления и процедурного контроля московского аэроузлового диспетчерского центра;

АДЦ – аэроузловой диспетчерский центр;

ГЦ ЕС ОрВД – главный центр единой системы организации воздушного движения;

ВП – воздушное пространство;  
РД – рулежная дорожка;  
ВПП – взлетно-посадочная полоса;  
АД – аэродром;  
ПКС – потенциально конфликтная ситуация;  
ВС – воздушное судно;  
МУДР – московский узловой диспетчерский район;  
АС УВД «TERCAS» – автоматизированная система управления воздушным движением «Terminal and En-Route Control Automated System»;  
RNP1 – required navigation performance 1 mile (требуемые навигационные характеристики 1 морская миля);  
АЗН-В – автоматическое зависимое наблюдение вещательное;  
ОВД – обслуживание воздушного движения;  
FMS – flight management system (система управления полетом ВС);  
AMAN/DMAN – arrival management/departure management система управления прибытием/отправлением ВС;  
РЦ – районный (диспетчерский) центр;  
ИВП – использование воздушного пространства;  
МПУ – магнитный путевой угол (ВПП);  
ВЗП – визуальный заход на посадку;  
НПС – норматив пропускной способности;  
Estimated Approach Time – расчетное время захода на посадку (выхода из зоны ожидания через точку ожидания);  
М 1, 2, 9 – сектор Москва-подход 1, 2, 9;  
ИКАО – международная организация гражданской авиации (ICAO - International Civil Aviation Organization);  
ШРМ, ВНК, ДМД – аэродромы Шереметьево, Внуково, Домодедово;  
RNAV – зональная навигация;  
Point Merge – концепция слияния на оптимальных интервалах (в общих точках) заходящих на посадку потоков ВС, представленная организацией Евроконтроль;  
М 7, 8 – сектор Москва-подход 7, 8;  
ШК – сектор Шереметьево-круг;  
FL100 – flight level 100 (эшелон полета 10000 футов);  
QNH – давление на аэродроме, приведенное к уровню моря по стандартной атмосфере (Question/request Nautical Height);  
Arrival – сектор управления прибывающими бортами;  
Departure – сектор управления вылетающими (отправляющимися) бортами;  
OFFSET – функция параллельного смещения RNAV на ВС, имеющих FMS;  
TL100 – transition level (эшелон перехода 10000 футов в московском аэроузле);  
«веер» и «тромбон» – схемы слияния концепции Point Merge данного вида;  
«за бортом» – процедура визуальных метеоусловий на аэродроме;  
ДПП – диспетчерский пункт подхода;  
«CORA» – подсистема АС УВД, выдающая рекомендации диспетчеру на основе заложенных алгоритмов анализа динамики воздушного движения;  
IAS – Indicated Air Speed (приборная воздушная скорость);  
«БАДА» – статистическая база данных измеренных параметров полета разных типов ВС на разных высотах и этапах полета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов Ю.Е. Повышение эффективности УВД при заходе ВС на посадку на основе использования технологий АЗН-В // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2009. - № 139. - С. 103-108.
2. Малыгин В.Б. Основные принципы совершенствования ОрВД в Московской зоне ЕС ОрВД // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2008. - № 136. - С. 146-149.
3. <http://www.eurocontrol.int/>.
4. Организация воздушного движения в Российской Федерации: Федеральные авиационные правила // Минтранс России. - 2011. - № 293.
5. Сборник аэронавигационной информации РФ и стран содружества независимых государств // Служба аэронавигационной информации. - 2013.
6. Методика расчета НПС // Росавиация. - 2012. - № 757.
7. Воздушный кодекс Российской Федерации // ГД ФС РФ. - 1997. - № 60-ФЗ.

## THE INCREASE OF ATM EFFICIENCY AT MOSCOW TERMINAL MANEUVERING AREA

Glukhov Y.E.

Moscow TMA problems are considered and their solutions as well as decreasing of degree influence on ATM efficiency are submitted.

**Key words:** planning, air structure, QNH, arrival/departure, point merge, OFFSET RNAV, RNP, AMAN/DMAN, ADS-B, coordination.

## Сведения об авторе

**Глухов Юрий Евгеньевич**, 1985 г.р., окончил СПбГУ ГА (2007), старший преподаватель МГТУ ГА, авиадиспетчер МЦ АУВД, область научных интересов – организация системы УВД, технологическое развитие системы гражданской авиации, разработка принципов и внедрение новых технологических процедур в области взаимодействия между экипажами ВС и диспетчерами.

**Бобина Анна Дмитриевна**, окончила МГТУ ГА (2011), аспирантка МГТУ ГА, авиадиспетчер МЦ АУВД, область научных интересов – технологическое развитие систем гражданской авиации, организация системы УВД.

УДК 621.396.6: 629.7.05

## ОРИЕНТАЦИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ\*

Е.Е. НЕЧАЕВ, Д.А. БАТАЛЮК, П.В. РЯБКОВ

Представлено математическое обеспечение методики ориентации воздушного судна (ВС) посредством приема сигналов спутниковых радионавигационных систем на антенную решетку. С помощью синтезированного алгоритма получены количественные оценки параметров пространственной ориентации ВС по крену, курсу и тангажу, и оценки погрешности этих углов по уровню  $3\sigma$ .

**Ключевые слова:** спутниковые радионавигационные системы, ориентация ВС.

Определение пространственного положения летательного аппарата на всех этапах полета является одной из важнейших задач. От качества используемых датчиков ориентации в пространстве в конечном итоге может зависеть вся система управления ВС.

В настоящее время в качестве датчиков ориентации в пространстве на ВС устанавливаются приборы, в основе структуры которых применяется гироскоп. Гироскоп высокотехнологичное устройство. Для решения задачи ориентации разных объектов используются механические, вибрационные и оптические гироскопы. Каждому типу гироскопов присущи свои достоинства и недостатки. На ВС ГА устанавливаются механические роторные гироскопы, основным недостатком которых является большой вес и высокая себестоимость.

Следовательно, исследование новых принципов получения параметров ориентации ВС в воздушном пространстве является перспективной задачей. Определение положения ВС с использованием спутниковых навигационных приемников (СНП) может быть решена в том случае, если на борту ВС размещена антенная система, состоящая минимум из четырех антенных элементов. Задача определения углов ориентации объекта решается путем анализа принятых антенной решеткой СНП радионавигационных сигналов от видимых в настоящий момент времени навигационных космических аппаратов (НКА).

Для решения данной задачи наблюдение на входе приемника представим в виде [1; 2; 3]

$$\xi_{ij} = \tau_{ij}(\theta) + \delta\varphi_i + \psi_j + n_{ij}, \quad (1)$$

здесь  $i = \overline{1, M}$  – количество антенных элементов;  $j = \overline{1, N}$  – количество сигналов от навигационных спутников;  $\theta$  – параметр ориентации (для углов Эйлера  $\theta = \overline{1, 3}$ , для кватернионов  $\theta = \overline{1, 4}$ );  $\delta\varphi_i$ ,  $i = \overline{2, M}$  – разность набега фаз в каналах приемника относительно первого канала, в котором  $\delta\varphi_1 = 0$ , размерность вектора  $m-1$ ;  $\psi - N$  – вектор,  $\psi_j$ ,  $j = \overline{1, N}$  – фазы спутниковых сигналов в первом канале.

В матричном виде наблюдение запишется в виде

$$\xi = \tau(\theta) + \delta\varphi \cdot 1_N^T + 1_M \cdot \psi_N^T + n, \quad (2)$$

где  $1_N - N$  – вектор-столбец, состоящий из единиц;  $1_M - M$  – вектор-столбец, состоящий из единиц;  $\tau(\theta) - M \times N$  – матрица, набега фаз в элементах антенной решетки относительно первого элемента, зависящие от ориентации антенной решетки (АР)  $\theta$ .

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ № 13-08-00182

Значение  $\tau(\theta)$  можно записать через вектор положений антенных элементов (АЭ) антенной решетки (АР), зависящий от ориентации АР  $r(\theta)$  и волновые векторы  $k = \frac{2\pi}{\lambda}(e_1, e_2, \dots, e_N)$ , где  $e_N$  – единичный вектор в направлении на  $N$ -й спутник, который рассчитывается по формуле  $\tau(\theta) = r^T(\theta) \cdot K$  или же через матрицу поворота  $r(\theta) = T(\theta) \cdot r$ .

$$\tau(\theta) = r^T \cdot T(\theta) \cdot K_i,$$

где  $r = (r_1 \ r_2 \ r_M) - 3 \times M$  – матрица положений АЭ;  $K = (e_1 \ e_2 \ e_N) - 3 \times N$  – матрица единичных векторов в направлении на спутники;  $T(\theta) - 3 \times 3$  – ортогональная матрица ориентаций антенной решетки;  $n_{M \times N}$  – шум измерения фаз в каналах.

$$r = \begin{bmatrix} x_{1aэ} & y_{1aэ} & z_{1aэ} \\ x_{2aэ} & y_{2aэ} & z_{2aэ} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{Maэ} & y_{Maэ} & z_{Maэ} \end{bmatrix} - \text{матрица положений АЭ в связанной с антенной решеткой системе}$$

$$\text{координат; } e_{cck} = \begin{bmatrix} \overbrace{e_{x,1}}^{\text{Sat 1}} & \dots & \overbrace{e_{x,N}}^{\text{Sat N}} \\ e_{y,1} & \dots & e_{y,N} \\ e_{z,1} & \dots & e_{z,N} \end{bmatrix} - \text{матрица единичных векторов в направлении на спутни-}$$

ки;  $e_{cck}$  – матрица, столбцы которой представляют собой единичные векторы в направлении АР=>Sat в связанной с АР системе координат.

Проанализируем наблюдение на выходе АР. Как оказывается при любой размерности  $\xi$  (при любом соотношении количества спутников и АЭ) количество неизвестных определяемых параметров (углы ориентации  $\theta$ , набег фаз в каналах  $\varphi$ , фазы спутников  $\psi$ ) превосходит ранг матрицы  $\xi$  на 1, т.е. получить оценки (решить систему уравнений) в постановке (1) невозможно. С другой стороны, различить принадлежность постоянной составляющей фаз, обусловленных каналом распространения (фаза спутникового сигнала на входе АР) и набегом фаз на АЭ невозможно. Разрешить данные проблемы можно за счет уменьшения числа определяемых параметров и рассмотрения относительной фазы, например, относительно первого канала приема.

В результате число параметров, подлежащих оценке в (1), уменьшается на 1 и система уравнений (1) будет иметь решение. Рассмотрение относительных фаз приводит к новому виду наблюдения

$$\xi = \tau(\theta) + \begin{pmatrix} 0 \\ \delta\varphi_i \end{pmatrix} \cdot 1_N^T + 1_M \cdot \psi + n. \quad (3)$$

Отсюда  $\tau_{11} = 0$ . Как отмечалось ранее, при реализации алгоритмов АФЛ для выполнения электронной фокусировки ДН АР, требуется весьма точная юстировка амплитудных и особенно фазовых характеристик приемных каналов. В рассматриваемом алгоритме будем полагать, что юстировка амплитудных и фазовых характеристик приемных каналов была выполнена перед вылетом ЛА с аэродрома в процессе подготовки к полету. И, исходя из этого допущения, выражение наблюдения на выходе АР примет вид

$$\xi = \tau(\theta) + \mathbf{1}_M \cdot \psi + n \quad (4)$$

Здесь используется принятое обозначение  $\mathbf{1}_M$  – единичный вектор-столбец.

Представим процесс  $\tau_{ij}(\boldsymbol{\theta})$  в виде линейной модели и разложим в ряд. Тогда, для варианта использования в качестве параметров ориентации углов Эйлера, наблюдение (4) можно представить

$$\tilde{\xi} = \sum_{p=1}^3 \mathbf{B}_p (\theta_p - \theta_{0p}) + \mathbf{1}_M \cdot \psi^T, \quad (5)$$

где  $\mathbf{B}_p = \frac{\partial \tau(\theta_{0p})}{\partial \theta_p}$ ,  $p = \overline{1,3}$  частные производные по параметрам ориентации.

Так как теория оптимальной фильтрации разработана для случая, когда наблюдение векторное (не матричное), то для ее применения необходимо векторизовать наблюдение (4). Для этого введем векторное наблюдение путем векторизации наблюдения (4):

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \underbrace{\mathbf{A}}_{(M \cdot N) \times 1} \cdot \underbrace{d\boldsymbol{\theta}}_{(M \cdot N) \times 1} + \underbrace{\left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M \right)}_{(M \cdot N) \times N} \cdot \underbrace{\psi}_{N \times 1} + \underbrace{vec(\mathbf{n})}_{(M \cdot N) \times 1}; \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = vec \left( \begin{matrix} \tilde{\xi} \\ \psi \end{matrix} \right), \quad (7)$$

где  $\mathbf{I}_N$  – единичная матрица  $N \times N$ ;  $d\boldsymbol{\theta} = [d\theta_1, d\theta_2, d\theta_3]^T$  – приращения углов;  $\mathbf{A}$  – матрица частных производных по параметрам ориентации

$$\mathbf{A} = \underbrace{\left\{ \underbrace{vec(\mathbf{B}_1)}_{(M \cdot N) \times 1}, \underbrace{vec(\mathbf{B}_2)}_{(M \cdot N) \times 1}, \underbrace{vec(\mathbf{B}_3)}_{(M \cdot N) \times 1} \right\}}_{(M \cdot N) \times 3} = \underbrace{\left\{ \underbrace{\mathbf{A}_1}_{(M \cdot N) \times 1}, \underbrace{\mathbf{A}_2}_{(M \cdot N) \times 1}, \underbrace{\mathbf{A}_3}_{(M \cdot N) \times 1} \right\}}_{(M \cdot N) \times 3}. \quad (8)$$

Представление (6) является классическим видом уравнения наблюдения для теории оптимальной фильтрации [4; 5].

### Оценка параметров ориентации

Для анализа характеристик оцениваемых компонент  $\{d\boldsymbol{\theta}, \psi\}$  желательно получить такие соотношения для оценок, которые бы позволяли провести анализ без их взаимного влияния, т.е. необходимо разделить оценки  $d\boldsymbol{\theta}$  и  $\psi$ .

Для этого представим (6)

$$\tilde{\mathbf{Y}} = [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \cdot \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \psi \end{pmatrix} + vec(\mathbf{n}). \quad (9)$$

В этом случае, оценка  $d\boldsymbol{\theta}$  может быть определена согласно выражению

$$d\boldsymbol{\theta} = \left( \mathbf{A}^T \cdot \Pi_{\perp F} \cdot \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \cdot \Pi_{\perp F} \cdot \tilde{\mathbf{Y}}, \quad (10)$$

а ее точность (матрица ковариации ошибок)

$$\mathbf{R}_\theta = \left( \mathbf{A}^T \cdot \Pi_{\perp F} \cdot \mathbf{A} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Покажем справедливость выражений (10) и (11).

Выражение (09) можно представить

$$\tilde{\mathbf{Y}} = [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \cdot \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} + \text{vec}(\mathbf{n}), \quad (12)$$

где введено обозначение

$$\underset{(N \cdot M) \times 1}{\mathbf{F}} = \underset{N \times N}{\mathbf{I}_N} \otimes \underset{M \times 1}{\mathbf{1}_M}. \quad (13)$$

Найдем выражения для оценок векторов  $d\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\psi}$ :

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}, \mathbf{F}]^T \tilde{\mathbf{Y}} &= [\mathbf{A}, \mathbf{F}]^T [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \cdot \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} + \text{vec}(\mathbf{n}); \\ \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \cdot \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} + \text{vec}(\mathbf{n}); \\ \left( \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} &= \underbrace{\left( \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} [\mathbf{A}, \mathbf{F}]}_{\mathbf{I}} \cdot \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} + \text{vec}(\mathbf{n}); \\ \begin{pmatrix} d\boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\psi} \end{pmatrix} &= \left( \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} [\mathbf{A}, \mathbf{F}] \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}} + \text{vec}(\mathbf{n}). \end{aligned} \quad (14)$$

Фактически (14) представляет собой операцию псевдообращения, которую можно рассматривать как наилучшую аппроксимацию по методу наименьших квадратов решения соответствующей системы линейных уравнений (9). При этом матрица дисперсий будет иметь вид

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{F} \\ \mathbf{F}^T \mathbf{A} & \mathbf{F}^T \mathbf{F} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{R}_{XY} \\ \mathbf{R}_{YX} & \mathbf{R}_Y \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Рассмотрим более детально выражение (15). Воспользуемся формулой Фробениуса для обращения блочных матриц:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^{-1} & -(\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^{-1} \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \\ (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})^{-1} \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1} & (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})^{-1} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

и введем обозначения, соответствующие (15):  $\mathbf{R}_X = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^{-1}$ ;

$$\mathbf{R}_Y = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12})^{-1}; \quad \mathbf{R}_{XY} = -\mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1}; \quad \mathbf{R}_{YX} = -\mathbf{R}_Y \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1}.$$

Сравнивая выражения (15) и (16), получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_X &= \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{F} (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{A} \right)^{-1} = \left( \mathbf{A}^T \left( \mathbf{I} - \mathbf{F} (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \right) \mathbf{A} \right)^{-1} = \\ &= \left( \mathbf{A}^T \Pi_{\perp F} \mathbf{A} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\mathbf{R}_{XY} = -\mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{\Pi}_{\perp F} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F} \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} \right)^{-1}; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_Y &= \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{F}^T \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{F} \right)^{-1} = \left( \mathbf{F}^T \left( \mathbf{I} - \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \right) \mathbf{F} \right)^{-1} = \\ &= \left( \mathbf{F}^T \mathbf{\Pi}_{\perp A} \mathbf{F} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_{YX} = -\left( \mathbf{F}^T \mathbf{\Pi}_{\perp A} \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{A}_{21} \mathbf{A}_{11}^{-1} = -\left( \mathbf{F}^T \mathbf{\Pi}_{\perp A} \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $\mathbf{\Pi}_{\perp F} = \left( \mathbf{I} - \mathbf{F} \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \right)$  – оператор проектирования

на пространство F;  $\mathbf{\Pi}_{\perp A} = \left( \mathbf{I} - \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \right)$  – оператор проектирования на пространство A.

Учитывая, что:  $\left( \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{F}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{F} \end{bmatrix} \right)^{-1} = \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{F} \\ \mathbf{F}^T \mathbf{A} & \mathbf{F}^T \mathbf{F} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_X & \mathbf{R}_{XY} \\ \mathbf{R}_{YX} & \mathbf{R}_Y \end{pmatrix}$ , подставим

выражения (17) – (20) в (14) и получим соответствующие оценки:

$$\begin{aligned} d\hat{\boldsymbol{\theta}} &= \left( \mathbf{R}_X \mathbf{A}^T - \mathbf{R}_{XY} \mathbf{F}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \left( \mathbf{R}_X \mathbf{A}^T - \mathbf{R}_X \mathbf{A}^T \mathbf{F} \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \\ &= \mathbf{R}_X \mathbf{A}^T \left( \mathbf{I} - \mathbf{F} \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{\Pi}_{\perp F} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{\Pi}_{\perp F} \tilde{\mathbf{Y}}. \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\psi}} &= \left( \mathbf{R}_Y \mathbf{F}^T + \mathbf{R}_{YX} \mathbf{A}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \left( \mathbf{R}_Y \mathbf{F}^T - \mathbf{R}_Y \mathbf{F}^T \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \\ &= \mathbf{R}_Y \mathbf{F}^T \left( \mathbf{I} - \mathbf{A} \left( \mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \right) \tilde{\mathbf{Y}} = \left( \mathbf{F}^T \mathbf{\Pi}_{\perp A} \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{\Pi}_{\perp A} \tilde{\mathbf{Y}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Рассмотрим подробнее оператор проектирования  $\mathbf{\Pi}_{\perp F}$  с учетом (13)

$$\begin{aligned} \underbrace{\mathbf{\Pi}_{\perp F}}_{(N \cdot M) \times (N \cdot M)} &= \left( \mathbf{I}_{(N \cdot M)} - \mathbf{F} \left( \mathbf{F}^T \mathbf{F} \right)^{-1} \mathbf{F}^T \right) = \\ &= \left( \begin{array}{c} \underbrace{\mathbf{I}_{(N \cdot M)}}_{(N \cdot M) \times (N \cdot M)} - \underbrace{\left( \begin{array}{c} \underbrace{\mathbf{I}_N}_{N \times N} \otimes \underbrace{\mathbf{1}_M}_{M \times 1} \end{array} \right)}_{(N \cdot M) \times N} \left( \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M \right)^T \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M \right) \right)^{-1} \underbrace{\left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M \right)^T}_{N \times (N \cdot M)} \end{array} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Учитывая, что  $\mathbf{F}^T = \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M \right)^T = \left( \mathbf{I}_N^T \otimes \mathbf{1}_M^T \right) = \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T \right)$  и представив единичную матрицу соответствующей размерности  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_M$ , получим из (23):

$$\begin{aligned}
\underbrace{\mathbf{\Pi}_{\perp F}}_{(N \cdot M) \times (N \cdot M)} &= \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_M - (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M) \left( (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T) (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M) \right)^{-1} (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T) \right) = \\
&= \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_M - (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M) (\mathbf{I}_N \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T \mathbf{1}_M)^{-1} (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T) \right) = \\
&= \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_M - (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M) \left( \mathbf{I}_N \otimes (\mathbf{1}_M^T \mathbf{1}_M)^{-1} \right) (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{1}_M^T) \right) = \\
&= \left( \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_M - \mathbf{I}_N \otimes \left( \mathbf{1}_M (\mathbf{1}_M^T \mathbf{1}_M)^{-1} \mathbf{1}_M^T \right) \right) = \mathbf{I}_N \otimes \left( \mathbf{I}_M - \mathbf{1}_M (\mathbf{1}_M^T \mathbf{1}_M)^{-1} \mathbf{1}_M^T \right) = \\
&= \underbrace{\mathbf{I}_N}_{N \times N} \otimes \underbrace{\mathbf{\Pi}_{\perp M}}_{M \times M}.
\end{aligned} \tag{24}$$

Полученный в (24)  $\mathbf{\Pi}_{\perp M}$  представляет собой оператор проектирования на пространство  $\mathbf{1}_M$ .

Рассмотрим воздействие оператора проектирования  $\mathbf{\Pi}_{\perp F}$  на матрицу частных производных  $\mathbf{A}$  в выражении (21)

$$\tilde{\mathbf{A}}_{(N \cdot M) \times 3} = \underbrace{\mathbf{\Pi}_{\perp F}}_{(N \cdot M) \times (N \cdot M)} \underbrace{\mathbf{A}}_{(N \cdot M) \times 3} = \left( \mathbf{I}_N \otimes \left( \mathbf{I}_M - \mathbf{1}_M \frac{1}{m} \mathbf{1}_M^T \right) \right) \mathbf{A} = \left( \underbrace{\mathbf{I}_N}_{N \times N} \otimes \underbrace{\mathbf{\Pi}_{\perp M}}_{M \times M} \right) \underbrace{\mathbf{A}}_{(N \cdot M) \times 3}. \tag{25}$$

Используя известную формулу  $(\mathbf{C}^T \otimes \mathbf{D}) \text{vec}(\mathbf{G}) = \text{vec}(\mathbf{DGC})$  и применив ее к (8) с учетом (25), получим

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{A}} &= (\mathbf{I}_N \otimes \mathbf{\Pi}_{\perp M}) \underbrace{\left\{ \text{vec}(\mathbf{B}_1), \text{vec}(\mathbf{B}_2), \text{vec}(\mathbf{B}_3) \right\}}_{\mathbf{A}} = \\
&= \left\{ \text{vec}(\mathbf{\Pi}_{\perp M} \mathbf{B}_1), \text{vec}(\mathbf{\Pi}_{\perp M} \mathbf{B}_2), \text{vec}(\mathbf{\Pi}_{\perp M} \mathbf{B}_3) \right\} = \\
&= \left\{ \text{vec} \left( \overset{\circ}{\mathbf{B}}_1 \right), \text{vec} \left( \overset{\circ}{\mathbf{B}}_2 \right), \text{vec} \left( \overset{\circ}{\mathbf{B}}_3 \right) \right\}.
\end{aligned} \tag{26}$$

Произведение  $\overset{\circ}{\mathbf{B}}_p = \mathbf{\Pi}_{\perp M} \mathbf{B}_p$  математически означает, что у каждой строки  $\overset{\circ}{\mathbf{B}}_{pi}$  матрицы  $\overset{\circ}{\mathbf{B}}_p$  вычитается среднее арифметическое всех строк

$$\overset{\circ}{\mathbf{B}}_{pi} = \mathbf{B}_{pi} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^M \mathbf{B}_{pk}, \tag{27}$$

или более общее [6; 7; 8]:

$$\overset{\circ}{\boldsymbol{\tau}}_{pi} = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta})_{pi} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^M \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta})_{pk}. \tag{28}$$

Исследование характеристик точности, параметров определения пространственной ориентации AP проводилось на основе имитационного моделирования. Структурная схема математической модели представлена на рис. 1.

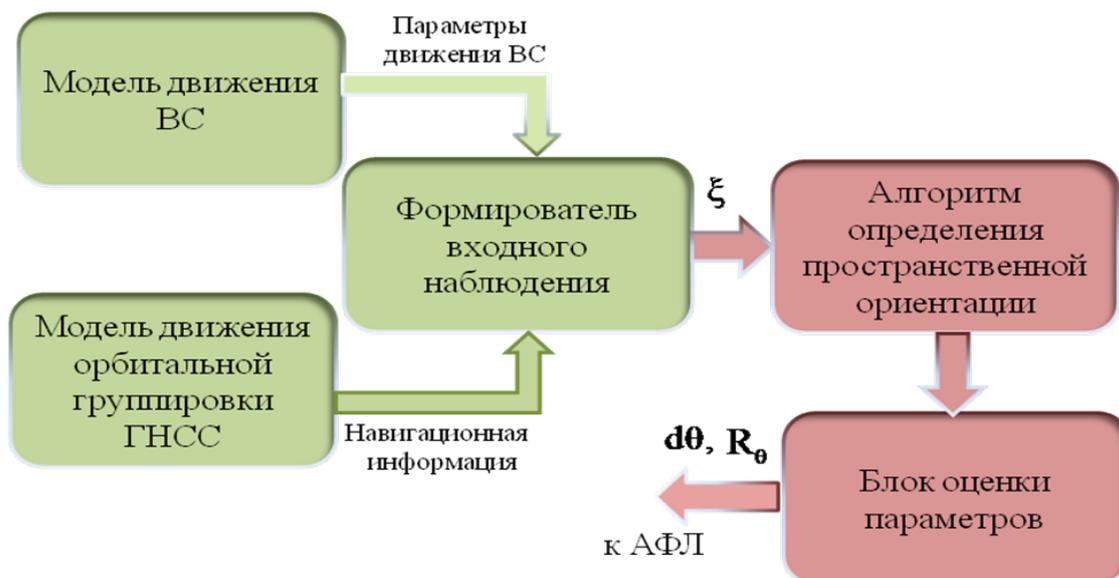


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели

В качестве описательной модели движения ВС использовался авиасимулятор FlightGear, позволяющий получить до шестнадцати параметров, описывающих движение самолета, в том числе и угловое положение ЛА, которое и использовалось для описания траектории движения. По результатам данных, полученных в авиасимуляторе, построена траектория для ВС класса Як-52 (рис. 2).

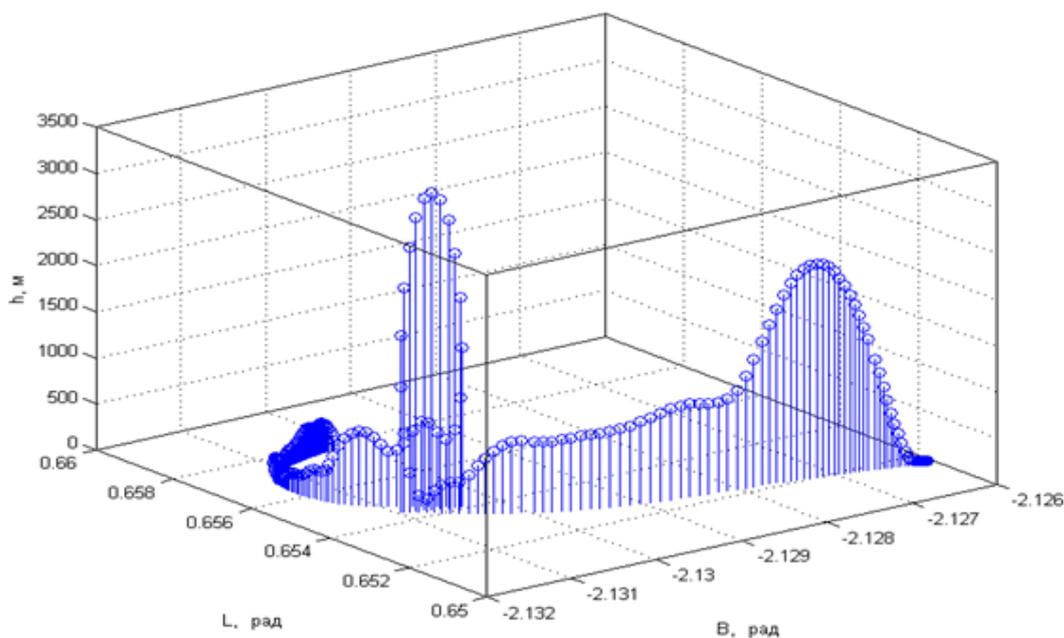


Рис. 2. Траектория движения ВС класса Як-52

Для моделирования траекторий движения НКА использовались приближенные уравнения возмущенного движения НКА глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС в геоцентрической подвижной системе координат ПЗ-90, описываемые следующими соотношениями [4; 9; 10]:

$$\frac{dX_{\text{HC}}}{dt} = V_X^{\text{HC}};$$

$$\begin{aligned} \frac{dY_{\text{HC}}}{dt} &= V_Y^{\text{HC}}; \\ \frac{dZ_{\text{HC}}}{dt} &= V_Z^{\text{HC}}; \\ \frac{dV_X^{\text{HC}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}X + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}X\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega_3^2 X + 2\omega_3 V_Y^{\text{HC}} + X_{\text{ЛС}}; \\ \frac{dV_Y^{\text{HC}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}Y + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}Y\left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega_3^2 X - 2\omega_3 V_Y^{\text{HC}} + Y_{\text{ЛС}}; \\ \frac{dV_Z^{\text{HC}}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}Z + \frac{3}{2}C_{20}\frac{\mu a_e^2}{r^5}Z\left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + Z_{\text{ЛС}}, \end{aligned}$$

где  $r = \sqrt{X_{\text{HC}}^2 + Y_{\text{HC}}^2 + Z_{\text{HC}}^2}$ ;  $\mu = 398600,44 \text{ км}^3 / \text{с}^2$  – константа гравитационного поля Земли;  $a_e = 6378,136 \text{ км}$  – экваториальный радиус Земли;  $C_{20} = -1082,63 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент при второй зональной гармонике разложения гeопотенциала в ряд по сферическим функциям;  $\omega_3$  – угловая скорость вращения Земли;  $X_{\text{ЛС}}, Y_{\text{ЛС}}, Z_{\text{ЛС}}$  – лунно-солнечные гравитационные ускорения. В результате моделирования синтезированного алгоритма для самолета класса Як-52 получены характеристики оценки параметров пространственной ориентации по крену, курсу и тангажу, представленные на рис. 3-5. Оценки погрешности этих углов по уровню  $3\sigma$  представлены на рис. 6-8.

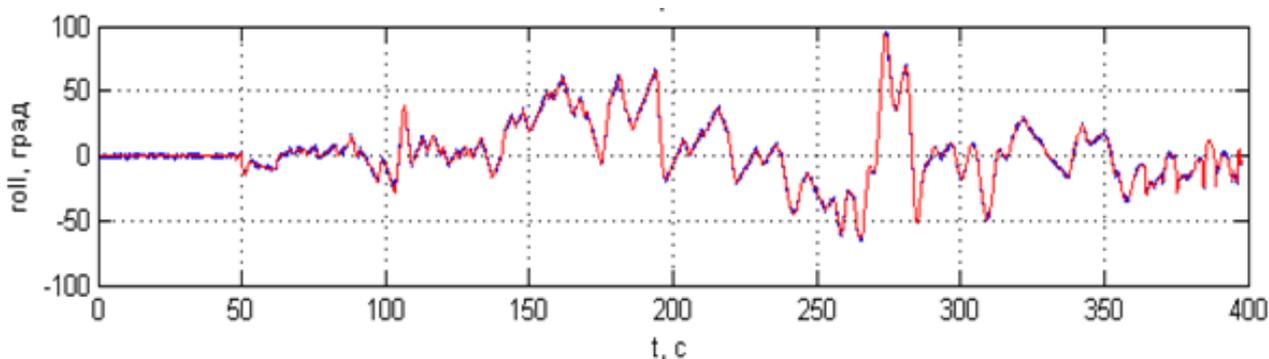


Рис. 3. Оценка угла крена

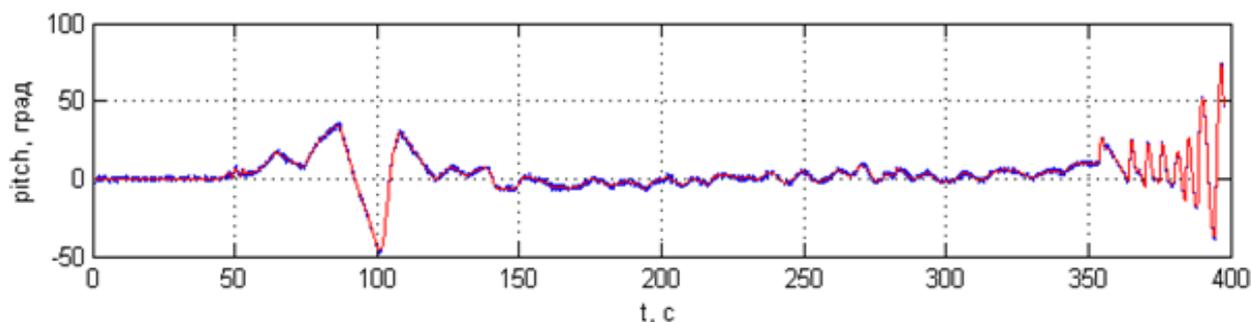
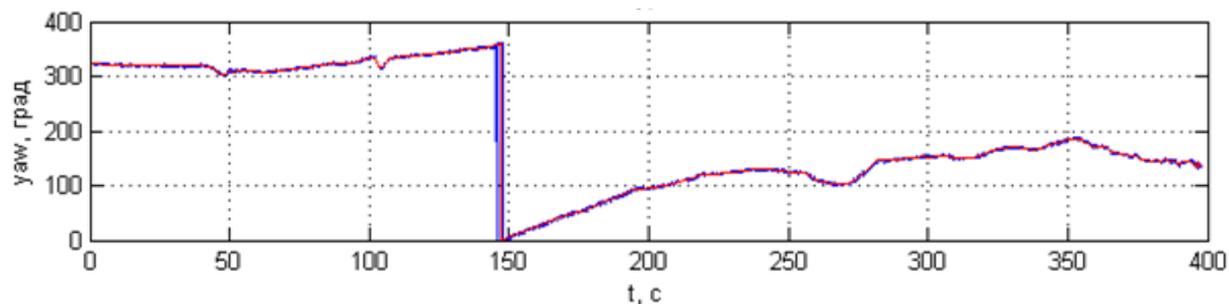
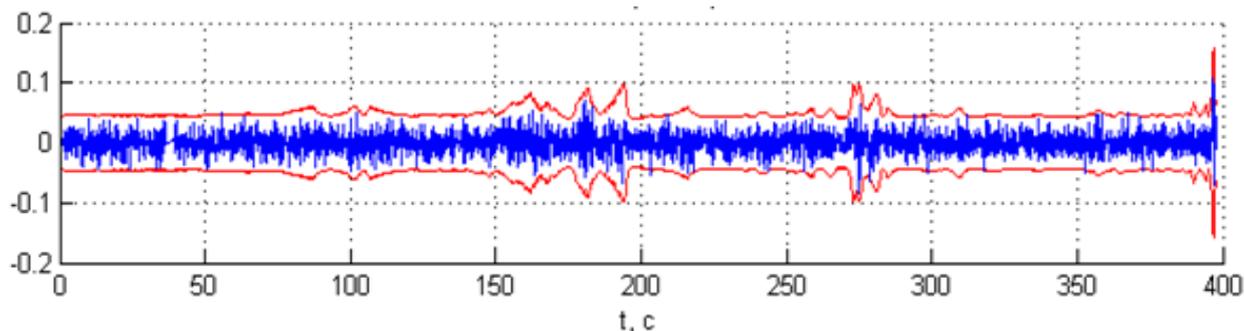
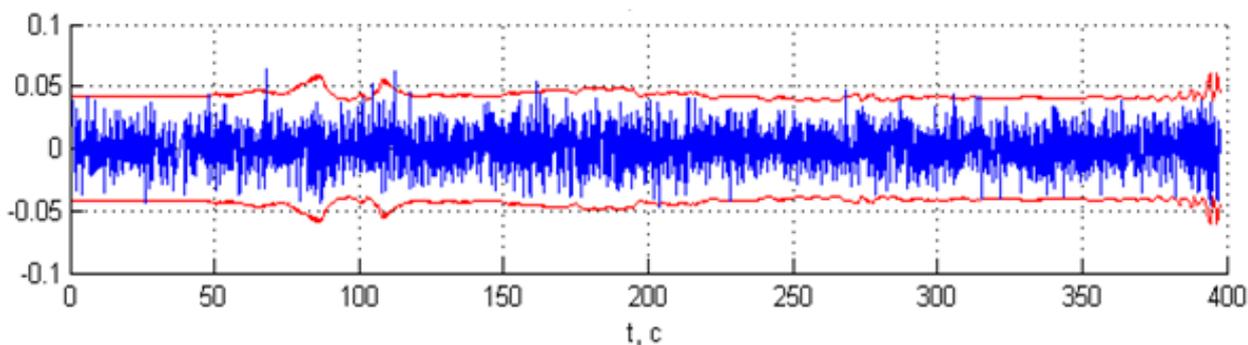
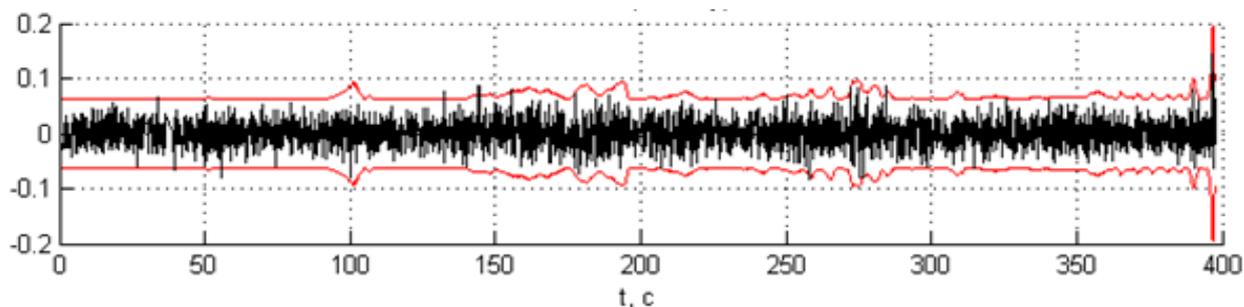


Рис. 4. Оценка угла тангажа

**Рис. 5.** Оценка угла курса**Рис. 6.** Погрешность оценки угла крена**Рис. 7.** Погрешность оценки угла тангажа**Рис. 8.** Погрешность оценки угла курса

Таким образом, на основе теории оптимальной пространственной фильтрации синтезирован алгоритм определения пространственной ориентации, позволяющий решать задачу определения пространственной ориентации антенной решетки навигационной аппаратуры пользователя как совместно с инерциальной навигационной аппаратурой, так и независимо от нее с точностью: по крену – 0,18 рад, по тангажу – 0,04 рад, по курсу – 0,2 рад.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ширман Я.Д., Манжос В.Н.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. - М.: Радио и связь, 1981.
2. **Монзиго Р.А., Миллер Т.У.** Адаптивные антенные решетки // Введение в теорию / пер. с англ. / под ред. В.А. Лексаченко. - М.: Радио и связь, 1986.
3. **Уидроу Б., Стирнс С.** Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1989.
4. Глобальная спутниковая радионавигационная система / под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова. - М.: Радиотехника, 2005.
5. **S.G. Carlson, C.A. Popeck, M.H. Stockmaster, C.E. McDowell.** Rockwell Collins Flexible Digital Anti-Jam Architecture. ION GPS/GNSS, 2003. - P.1843-1851.
6. **Ефименко В.С., Харисов В.Н.** Оптимальная фильтрация в задачах пространственно-временной обработки и ее характеристики. - М.: Радиотехника и электроника, 1987. - Т. 32. - № 8. - С. 1654-1662.
7. **Ефименко В.С., Харисов В.Н.** Адаптивная пространственно-временная фильтрация при многоканальном приеме. - М.: Радиотехника и электроника, 1987. - Т. 32. - № 9. - С. 1893-1901.
8. **Тихонов В.И., Харисов В.Н.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 2004.
9. **Ефименко В.С., Харисов В.Н.** Алгоритмы оптимальной фильтрации при пространственно-многоканальном приеме в условиях быстрых изменений сигнально-помеховой ситуации // Радиотехника (Приложение к журналу) Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи. - 1992. - С. 23-29.
10. **Ефименко В.С., Харисов В.Н.** Потенциальные характеристики адаптации пространственно-временной обработки для СРНС // Радиотехника. - 2002. - № 7. - С. 82-87.

## AIRCRAFT ORIENTATION BY USE OF RADIO NAVIGATIONAL SIGNALS OF GNSS

Nechaev E.E., Batalyuk D.A., Ryabkov P.V.

The technique software definition of spatial position of the aircraft by means of reception of signals of satellite radio navigational systems on an antenna lattice is presented. By means of the synthesized algorithm characteristics of an assessment of parameters of spatial orientation on a list, a course and pitch and estimates of an error of these corners on level 3 are received.

**Key words:** satellite radio navigational systems, aircraft orientation.

## Сведения об авторах

**Нечаев Евгений Евгеньевич**, 1952 г.р., окончил НЭТИ (1974), профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой УВД МГТУ ГА, автор более 180 научных работ, область научных интересов – теория УВД, радиолокация и радионавигация, теория и техника СВЧ измерений.

**Баталюк Денис Александрович**, 1984 г.р., окончил Тамбовское ВВАИУ РЭ (2006), кандидат технических наук, преподаватель кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи, автор 17 научных работ, область научных интересов – спутниковые радионавигационные системы.

**Рябков Павел Владимирович**, 1974 г.р., окончил Иркутское ВВАИУ (1996), кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры эксплуатации авиационного радиоэлектронного оборудования ВАИУ (г. Воронеж), автор 23 научных работ, область научных интересов – радионавигация, использование спутниковых технологий при ОрВД.

УДК 621.396.933:629.783

## ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ GPS\*

О.А. ГОРБАЧЁВ, В.Б. ИВАНОВ, Д.В. ХАЗАНОВ, А.А. ХОЛМОГОРОВ

Представлены результаты исследования временных вариаций ошибок позиционирования в одночастотной навигационной аппаратуре спутниковых навигационных систем (СНС). Показано, что имеется уверенно регистрируемая повторяемость в соседних сутках особенностей суточного хода ошибок. Указанная повторяемость может быть использована для повышения точности позиционирования СНС.

**Ключевые слова:** спутниковые навигационные системы, ошибки позиционирования, точности позиционирования СНС.

### Введение

Задача повышения точности позиционирования СНС является одной из важнейших проблем навигации. Состояние этой проблемы подробно описано в обзорной работе [1]. В данной статье мы представляем еще один способ повышения точности позиционирования СНС, связанный с описанной далее особенностью поведения во времени экспериментально наблюдаемых ошибок позиционирования. Особенность заключается в повторяемости в соседних сутках временного хода ошибок и, как показано в заключение, может быть использована в практических целях.

Типичные значения ошибок позиционирования СНС при использовании одночастотных навигационных приемников составляют несколько метров [2]. Использование высокоточных навигационных приборов и специальных методик решения навигационной задачи, включая применение нестандартных моделей ионосферного запаздывания сигналов (так называемая концепция PPP – precision point positioning), позволяет в одночастотном режиме выйти на дециметровый уровень точности. Соответствующие подходы описаны, например, в работе [3]. Однако такие методы не могут получить широкое применение в навигационном оборудовании, используемом на воздушных судах гражданской авиации. В этой связи представляет интерес использовать для повышения точности позиционирования указанную выше и детально описанную далее особенность.

В предыдущих экспериментальных исследованиях [4] был выявлен следующий интересный эффект. Измерения отклонений определяемых координат антенн навигационных приемников от их истинных значений имеет хорошо выраженную повторяемость в двух и более последовательных сутках. Эффект наиболее выражен во временных вариациях высоты антенны. Эффект не связан с суточным ходом полного электронного содержания в ионосфере с периодом в 24 часа. Речь идет о более короткопериодической флуктуации с характерными временами в десятки-тысячи секунд. Отметим, что измерения проводились на одночастотной навигационной аппаратуре. Поэтому сначала авторы предположили, что эффект связан с временными вариациями электронной концентрации в ионосфере. Однако приведенные ниже результаты это не подтверждают.

---

\*Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №8388)

## Результаты экспериментов

На рис. 1 представлен типичный временной ход определяемой навигационным приемником высоты антенны в двух соседних сутках. Данные получены на специализированном наблюдательном пункте Иркутского филиала МГТУ ГА в навигационной системе GPS. На этом и всех остальных рисунках по вертикальной оси отложены определяемые высоты антенн  $h$ . Нас интересуют только относительные вариации высот, поэтому на вертикальной оси показан только масштаб единицы измерений. Кривые, соответствующие двум суткам, изображены одна под другой с некоторым смещением по вертикали. По горизонтальной оси отложено мировое время UTC в сеансах наблюдений соседних суток. Хорошо видно, что во временном ходе присутствуют флуктуации различных временных масштабов. Выделим из них два класса: менее интенсивные короткопериодические флуктуации длительностью в десятки секунд и более интенсивные длиннопериодические вариации с характерными временами порядка тысяч секунд.

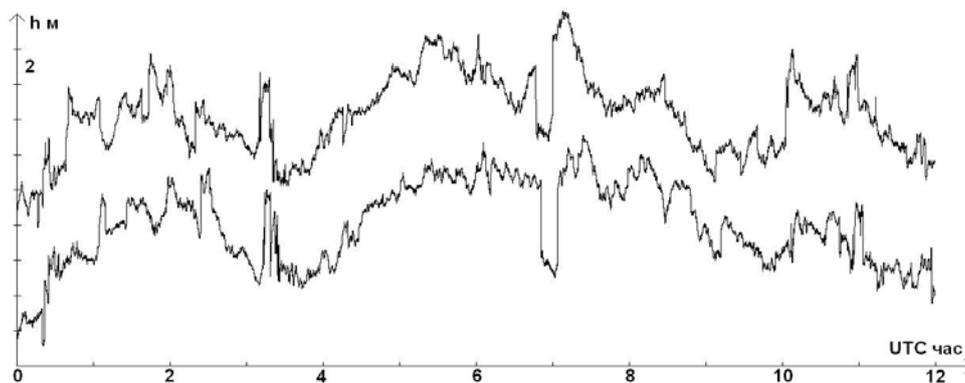


Рис. 1

Детальный анализ выявил важное свойство флуктуаций: их повторяемость в соседних сутках имеет сдвиг по времени, равный 4 минутам. На рис. 2 в увеличенном масштабе времени приведены фрагменты временных вариаций в соседних сутках с указанным сдвигом. По горизонтальной оси отложено время  $t$  в минутах относительно начала сеансов. Период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, поэтому указанный сдвиг может быть связан со сдвигом повторяемости расположения созвездия наблюдаемых спутников.

Первоначально мы интерпретировали повторяемость флуктуаций как проявление многолучевости, возникающей при отражении спутниковых сигналов от объектов ландшафта. Действительно, условия возникновения многолучевости при стационарном окружении зависят от конфигурации созвездия спутников и повторяемость в соседних сутках должна иметь временной сдвиг в 4 минуты.

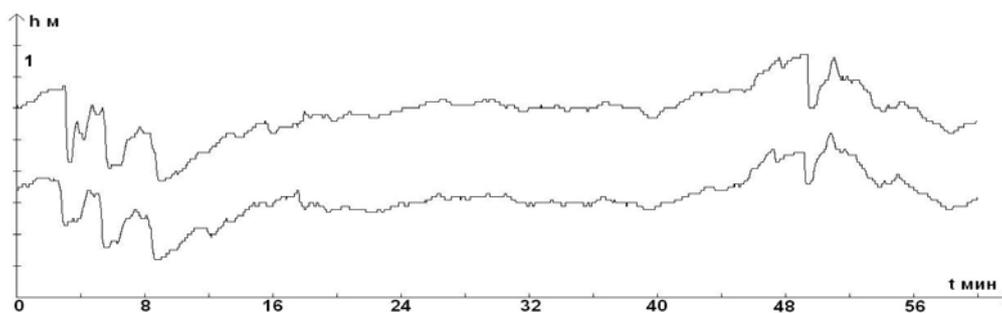


Рис. 2

Однако данная интерпретация была отвергнута после проведения синхронных наблюдений в двух пространственно разнесенных наблюдательных пунктах. На рис. 3 представлены вре-

менные вариации определяемых высот антенн в двух наблюдательных пунктах, разнесенных на расстояние около 4 километров. Таким образом, пункты находились в совершенно разной окружающей обстановке. Видно, что при разнесении пунктов в пространстве имеется хорошая корреляция длиннопериодических вариаций высот антенн. Короткопериодические флуктуации отсутствуют, откуда следует, что короткие и менее интенсивные флуктуации высот антенн действительно обусловлены многолучевостью. Вариации с характерными временами в тысячи секунд с многолучевостью не связаны.

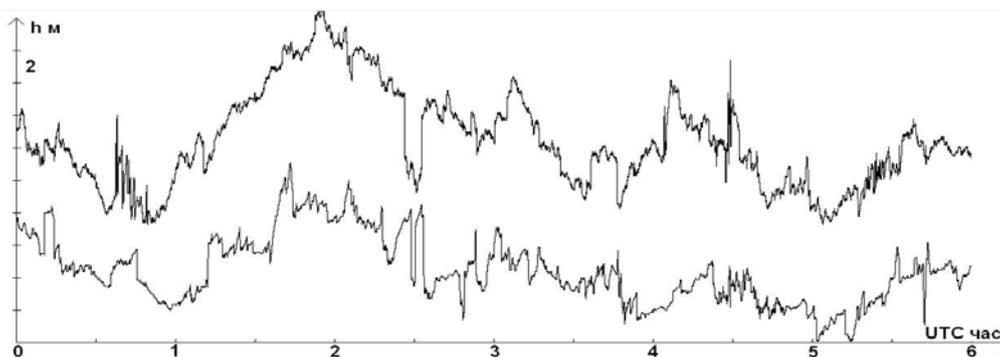


Рис. 3

Далее был проанализирован временной ход определяемой высоты антенны одной из станций слежения сети IGS. Были использованы данные, представленные в виде навигационных и наблюдательных RINEX-файлов. Навигационная задача решалась с использованием инструментария GPStk (программа RINEXPVT) [5; 6]. Рис. 4 сформирован аналогично рис. 1 для одной из среднеширотных станций сети IGS. Здесь также отчетливо видна повторяемость временных вариаций высоты антенны в соседних сутках. Таким образом, можно считать доказанным, что описываемая особенность имеет не локальный, а глобальный характер.

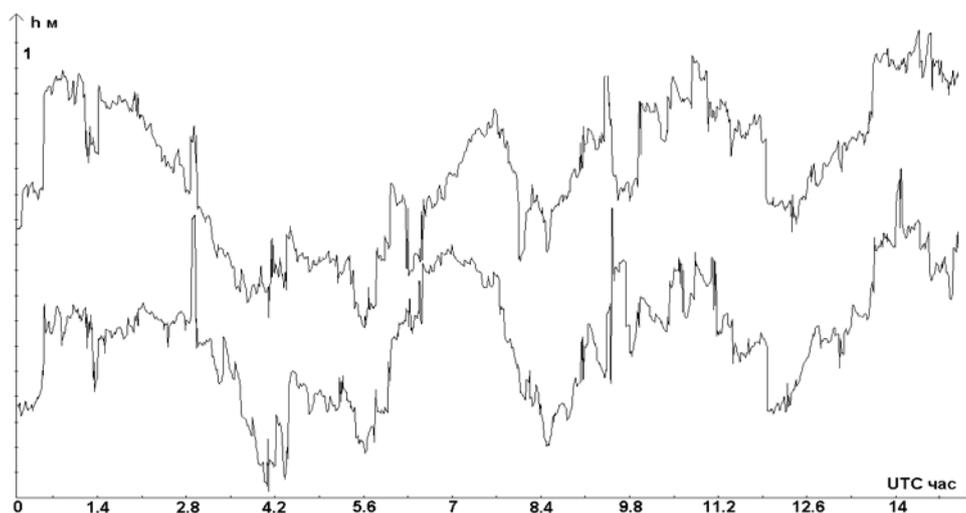


Рис. 4

Для объяснения выявленного эффекта авторы выдвинули предположение, что причина описываемого явления – повторяемость в соседних сутках ошибок определения эфемерид навигационных спутников. Для проверки этой гипотезы вновь была привлечена программа RINEXPVT. В этой программе навигационная задача может решаться с использованием стандартных навигационных RINEX-файлов и файлов уточненных эфемерид (файлы SP3). На рис. 5 представлены фрагменты суточного хода определяемой высоты в одном сеансе для станции системы IGS. Верхняя кривая получена с использованием стандартных навигационных RINEX-

файлов. Нижняя кривая получена с использованием файлов уточненных эфемерид. Видно, что использование уточненных эфемерид не устраняет рассматриваемые вариации, откуда следует, что они не связаны с ошибками эфемерид.

Использование данных станций сети IGS позволяет исследовать повторяемость ошибок позиционирования для точек наблюдений, разнесенных на значительные расстояния.

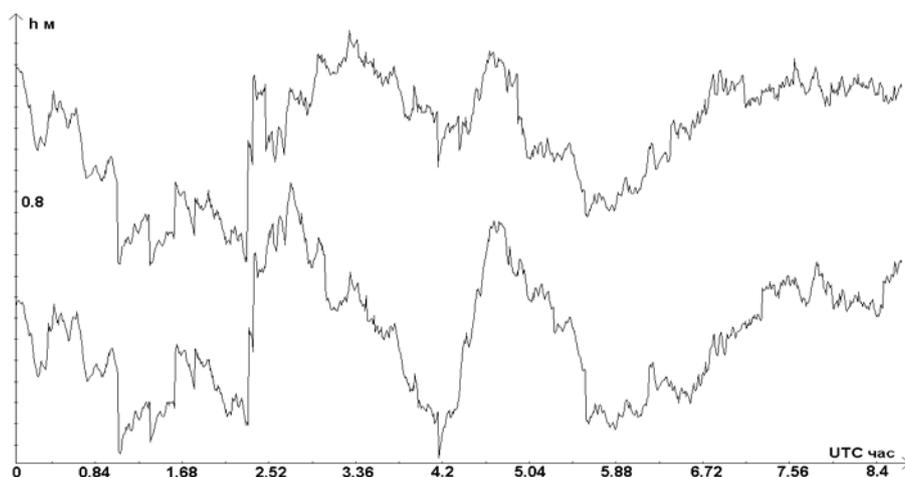


Рис. 5

На рис. 6 представлены временные вариации высот для двух среднеширотных станций сети IGS. Станции разнесены по долготе примерно на  $7^{\circ}$  ( $\sim 600$  км). Видно, что повторяемость ошибок позиционирования имеет место без заметного временного сдвига.

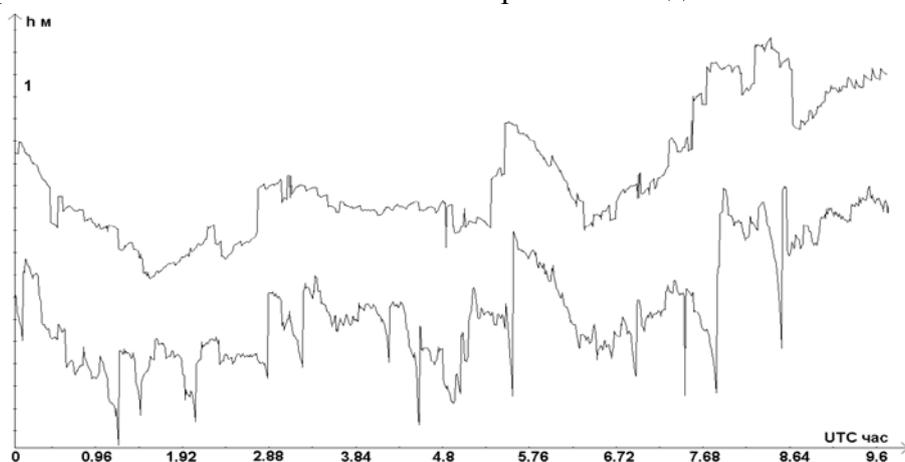


Рис. 6

Аналогичные результаты получены для двух среднеширотных станций IGS, разнесенных по широте. Расстояние между станциями также равнялось примерно  $7^{\circ}$ . Соответствующие результаты представлены на рис. 7.

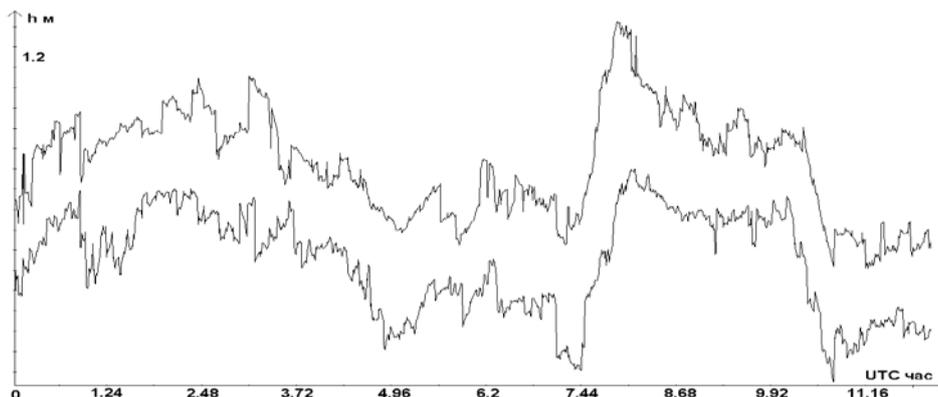


Рис. 7

Учитывая соотношение радиуса Земли и высоты орбит спутников, можно предположить, что участвующие в этом исследовании станции IGS используют для решения навигационной задачи одно и то же (или почти одно и то же) созвездие. Это позволяет сделать предположение о связи вариаций ошибок позиционирования с конфигурацией созвездия навигационных спутников, по которым решается навигационная задача.

Влияние конфигурации созвездий спутников на ошибку определения высоты антенны было исследовано следующим образом. Использовалось свойство еще одной программы PRSolve из пакета GPStk, которое позволяет выбрать для решения навигационной задачи конкретные спутники. В определенном сеансе наблюдений на одной из станций IGS проводились два расчета с различными созвездиями. Созвездия состояли из пяти спутников, один из которых был общим, но остальные четыре не повторялись. Результаты расчетов представлены на рис. 8. В верхней части показаны вариации определяемой высоты в двух соседних сутках для первого созвездия, в нижней части – для второго. Видно, что повторяемость в сутках имеет место, но характер вариаций для разных созвездий различен.

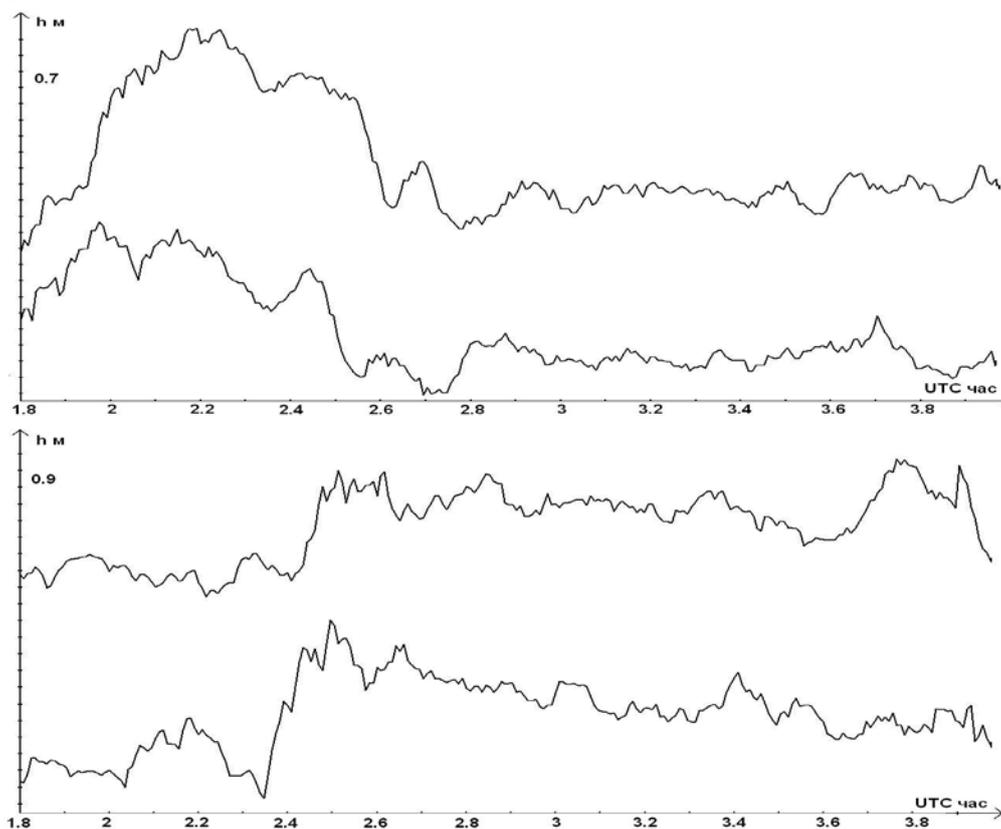


Рис. 8

В дополнение к последнему исследованию на специализированном наблюдательном пункте Иркутского филиала МГТУ ГА были проведены измерения, выполненные с использованием навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Результаты представлены на рис. 9. Здесь, аналогично предыдущему рисунку, представлены временные изменения определяемой высоты в двух соседних сутках. В верхней части рисунка показан результат для GPS, в нижней – для ГЛОНАСС. Здесь также имеется повторяемость временных вариаций высоты. И эта повторяемость также различна для двух систем. Для системы ГЛОНАСС временной ход в последующих сутках смещен относительно предыдущих на полтора часа, что соответствует периоду обращения спутников российской навигационной системы.

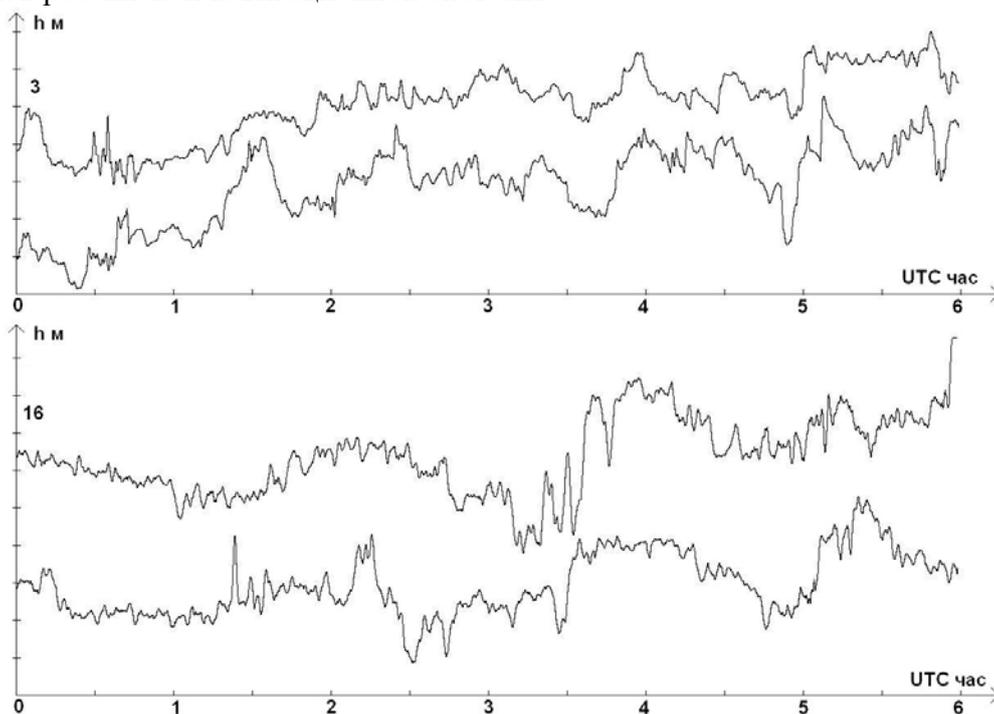


Рис. 9

Представляется интересным вопрос о том, как долго сохраняется рассматриваемая повторяемость. Для ответа на этот вопрос был подвергнут анализу непрерывный сеанс наблюдений на среднеширотной станции IGS в течение 192 часов - 8 суток. Временные вариации определяемой высоты в последовательных сутках представлены на рис. 10 (сверху вниз). Можно видеть, что повторяемость сохраняется достаточно стабильно, по крайней мере, в указанный интервал. Кроме того, из рисунка снова можно определить смещение на четыре минуты вперед каждые сутки.

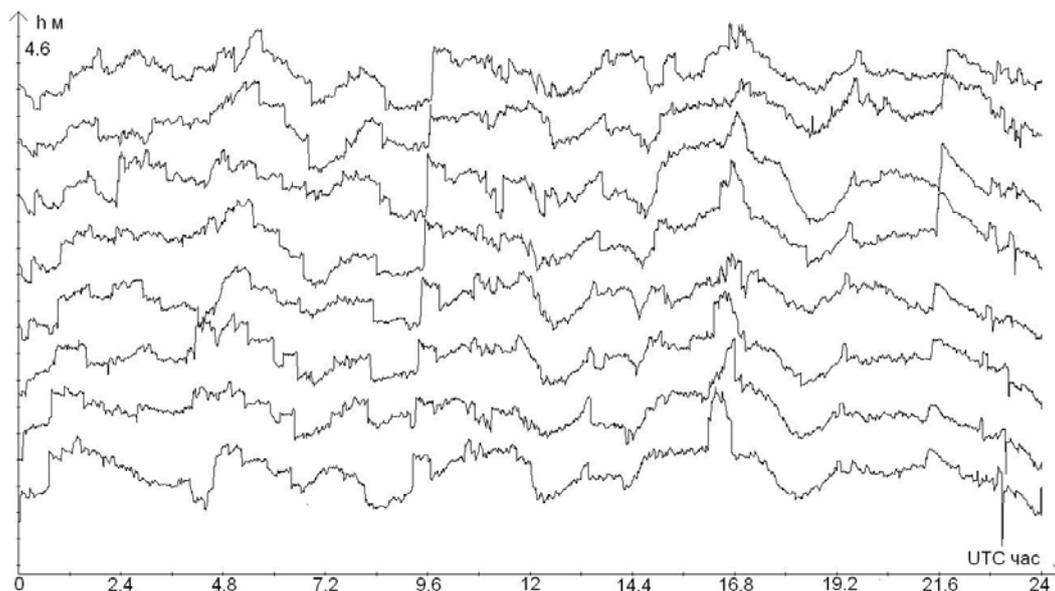


Рис. 10

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования уверенно показывают факт повторяемости в соседних сутках вариаций ошибок позиционирования с характерными временными масштабами от десятков до тысяч секунд. Происхождение повторяющихся вариаций связано с космическим сегментом спутниковых навигационных систем и не связано напрямую с аппаратурой навигационных приемников, их ландшафтным окружением и условиями распространения радиосигналов.

Авторы не могут в настоящее время выдвинуть разумные гипотезы происхождения описанных повторяющихся вариаций. Одной из целей данной статьи является привлечение внимания специалистов к поиску таких гипотез. Важность этой задачи очевидна, так как понимание причин повторяемости ошибок позиционирования открывает путь к их устранению.

Выявленная в данном исследовании особенность временных вариаций ошибок позиционирования может быть использована для повышения точности определения координат потребителя. Возникает аналогия с дифференциальным режимом работы системы GPS [7]. В этом режиме на базовой станции с известными координатами определяются текущие ошибки определения трех координат. Затем эти ошибки в качестве корректирующих параметров непрерывно передаются по специализированным наземным или спутниковым каналам связи потребителям в данном регионе.

Эффект повторяемости ошибок позиционирования в соседних сутках можно использовать для повышения точности позиционирования СНС при использовании одночастотной аппаратуры. Для этого на базовой станции необходимо записать суточный ход ошибок с применением сглаживания. Затем сформировать соответствующий файл числовых данных, выложить его в Интернет или передать оператору сотовой связи. В последующие сутки аппаратура потребителя в автоматическом режиме однократно загружает данный файл из сети Интернет, либо получает его по каналам сотовой связи. Затем в аппаратуре потребителя из текущих вычисленных координат вычитаются соответствующие ошибки. Таким образом, существенная часть ошибок текущего позиционирования будет скомпенсирована. Мы понимаем, что такой дифференциально-временной режим работы будет несколько менее эффективным по сравнению с дифференциальным режимом, однако он намного более прост и менее затратен. В этом случае отпадает необходимость использования специализированных радиоканалов и значительно сокращается суточный объем передаваемой информации. Наиболее удобным предлагаемый метод может

быть для потребителей, использующих мобильные устройства со встроенными навигационными приемниками, имеющими доступ к сотовой связи и сети Интернет. Именно для них наиболее просто организовать загрузку данных с корректирующей информацией.

Возможно использование предложенного авторами дифференциально-временного режима работы в пределах ограниченного пространства, например, территории аэропорта. В этом случае для передачи файла числовых данных с записью суточного хода ошибок необходимо использовать специализированные каналы связи между базовой станцией и потребителем. При этом можно добиться точности позиционирования, сравнимой с дифференциальным режимом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Thomas Grinte.** Precise Point Positioning: Where are we now? - International Global Navigation Satellite System Society IGNSS Symposium, 2011, [www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/grinter&roberts2011a.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/grinter&roberts2011a.pdf).

2. **Boubeker Belabbas, Achim Hornbostel, and Mohammed Z. Sadeque.** Error Analysis of Single Frequency GPS Measurements and Impact on Timing and Positioning Accuracy. - PROCEEDINGS OF THE 2nd WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION (WPNC'05) & 1st ULTRA-WIDEBAND EXPERT TALK (UET'05), 2011, pp. 81-86.

3. **Roel J.P. van Bree, Christian C.J.M. Tiberius.** Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment. - GPS Solution, 2012, 16:259-266.

4. **Былинин К.Е., Горбачев О.А., Иванов В.Б., Хазанов Д.В.** Сравнительная оценка точности позиционирования одночастотной аппаратуры систем ГЛОНАСС и GPS // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2011. - № 171. - С. 78-83.

5. **Brian Tolman, R. Benjamin Harris.** "The GPS Toolkit," Linux Journal, September, 2004, p. 72.

6. **R. Benjamin Harris, Richard G. Mach.** The GPSTk: an open source GPS toolkit. - GPS Solution, 2007, 11:145-150.

7. Global Positioning System: Theory and Applications. Edited by **B.W. Parkinson and J.J. Spilker Jr.** -Published by the American Institute of Aeronautics and Astronomics Inc., 1996.

#### TIME VARIATIONS OF POSITIONING ERRORS IN THE GPS SATELLITE NAVIGATION SYSTEM

**Gorbachev O.A., Ivanov V.B., Khazanov D.V., Kholmogorov A.A.**

The results of research of time variations of positioning errors in the single-frequency navigation equipment of satellite navigation systems (SNS) are represented. A clearly registered repetition of error day variation during adjacent days is shown. The repetition can be used to increase SNS positioning accuracy.

**Key words:** satellite navigation systems, positioning errors, SNS positioning accuracy

#### Сведения об авторах

**Горбачёв Олег Анатольевич**, 1959 г.р., окончил ИГУ (1982), доктор технических наук, доцент, директор Иркутского филиала МГТУ ГА, автор 50 научных работ, область научных интересов – радиофизика, спутниковые системы навигации.

**Иванов Всеволод Борисович**, 1948 г.р., окончил ИГУ (1972), доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики ИГУ, автор более 100 научных работ, область научных интересов – радиофизика.

**Хазанов Дмитрий Владимирович**, 1954 г.р., окончил ИГУ (1976), кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой ЕНД Иркутского филиала МГТУ ГА, автор 43 научных работ, область научных интересов – физика ионосферной плазмы.

**Холмогоров Андрей Александрович**, 1991 г.р., студент 4 курса физического факультета Иркутского государственного университета, автор одной научной работы, область научных интересов – радиофизика.

УДК 629.7.351

## АЛГОРИТМ НАЗНАЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТНОЙ ОЧЕРЕДНОСТИ СЛУЧАЙНО РАСПОЛОЖЕННЫМ В ПРОСТРАНСТВЕ ВОЗДУШНЫМ СУДАМ ДЛЯ ВЫХОДА НА СТАНДАРТНЫЙ МАРШРУТ ПРИБЫТИЯ\*

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ, В.Б. МАЛЫГИН, Е.Е. НЕЧАЕВ

В статье предлагается автоматизированное решение задачи построения очередности прилета случайно расположенных в пространстве воздушных судов с выходом на стандартный маршрут прибытия.

**Ключевые слова:** стандартный маршрут прибытия (STAR), определение очереди прилёта среди случайно расположенных в пространстве воздушных судов.

Подобного рода задачи часто возникают на практике перед авиадиспетчерами. Это может быть связано с воздушными и наземными ситуациями, не поддающимися планированию и оказывающими влияние на изменение плана полетов, как в воздухе, так и на земле. Как правило, это метеорологические условия, различного рода неисправности на земле и в воздухе, превышение интенсивности воздушного движения над пропускной способностью аэродромов и т.п. В большинстве случаев эти факторы оказывают влияние на множество воздушных судов, возникает ситуация, при которой группа воздушных судов вынуждена отказаться от первоначальных планов и действовать в зависимости от сложившихся обстоятельств.

В статье предлагается алгоритм для эффективного выхода из подобных ситуаций, который отыскивает решения для множества воздушных судов (прилетающих или вылетающих) и позволяет частично или полностью отказаться от действующего плана полета и перейти к новому.

В качестве прикладных условий задачи рассматривается внезапное изменение посадочного курса одного из аэродромов московского аэроузла (Внуково, Домодедово, Шереметьево) и связанный с этим событием отказ от ранее действующего стандартного маршрута STAR в пользу нового для группы воздушных судов.

### Постановка задачи

Задано:

1. Ограниченное число стандартных маршрутов прибытия в московском аэроузле (считаем, что в любой момент времени для каждого ВС можно задать курс в соответствии с требованием стандартного маршрута прибытия) ( $Y_{k(i)}^t$ ).

2. Количество воздушных судов, прибывающих на аэродромы московского аэроузла в соответствии с первоначальным планом ( $K_0$ ).

Ставится задача эффективного планирования очередности движения прибывающих воздушных судов при внезапном изменении условий посадки (технические, метеорологические и т.п.) хотя бы по одному аэродрому с выводом воздушных судов на новые стандартные маршруты прибытия.

3. Каждое воздушное судно характеризуется четырьмя координатами:

- высота ( $H_i$ );
- ближайшее расстояние до «нового» STAR ( $Z_i$ );
- расстояние от воздушного судна до (факт) конечной точки захода на посадку ( $X_i$ );
- курс полета ВС, отсчитываемый против часовой стрелки относительно  $Y_{k(i)}^t$  ( $\psi_i$ ).

4. Скорость полета ( $W_i$ ) воздушных судов для упрощения решения задачи считаем одинаковой, соответственно время достижения судном конечной цели определяем длиной пути до конечной точки  $X_i$ .

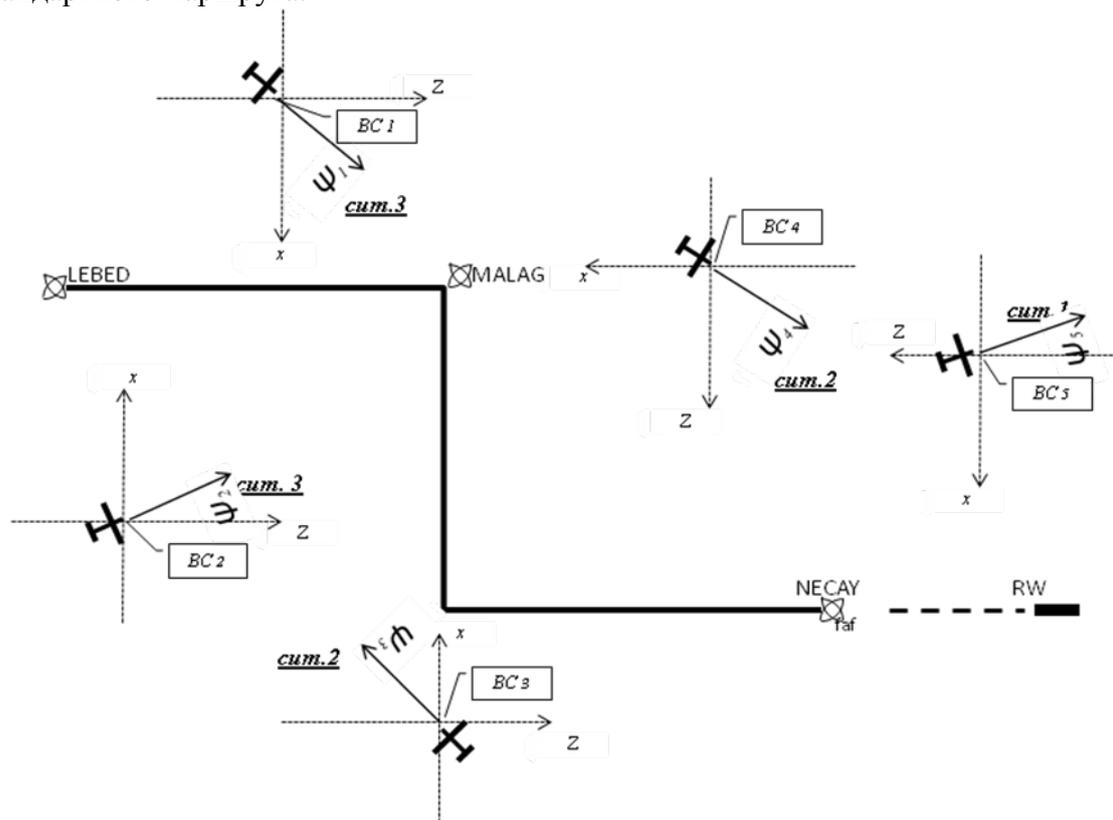
\*Работа выполнена при материальной поддержке проекта РФФИ № 13-08-00182

5. Значение безопасной дистанции между ВС ( $D$ ).
6. Минимальный радиус ( $r$ ) движения ВС в развороте.
7. Координата  $Y_i$  – выхода на «новый» STAR рассчитывается, но имеет ограничения  $0 < Y_i < X_i$ , т.е. ВС не должно двигаться в противоположную сторону от конечной точки посадки  $faf$ , в противном случае выполняется ожидание типа «вираж», с учетом расчетного времени ( $T_z$ ) ухода на запасной аэродром.
8. Учитывается оптимальный высотный режим для прилета на конкретный аэродром  $H_{min} < H_i < H_{max}$ .

Требуется:

- определить эффективную очередность захода на посадку группы ВС на «новые» STAR с соблюдением условия безопасности;
- в случае прогнозирования невыполнения ограничений составить список воздушных судов, которым необходимо рекомендовать уход на запасной аэродром до наступления расчетного времени ухода по каждому воздушному судну списка.

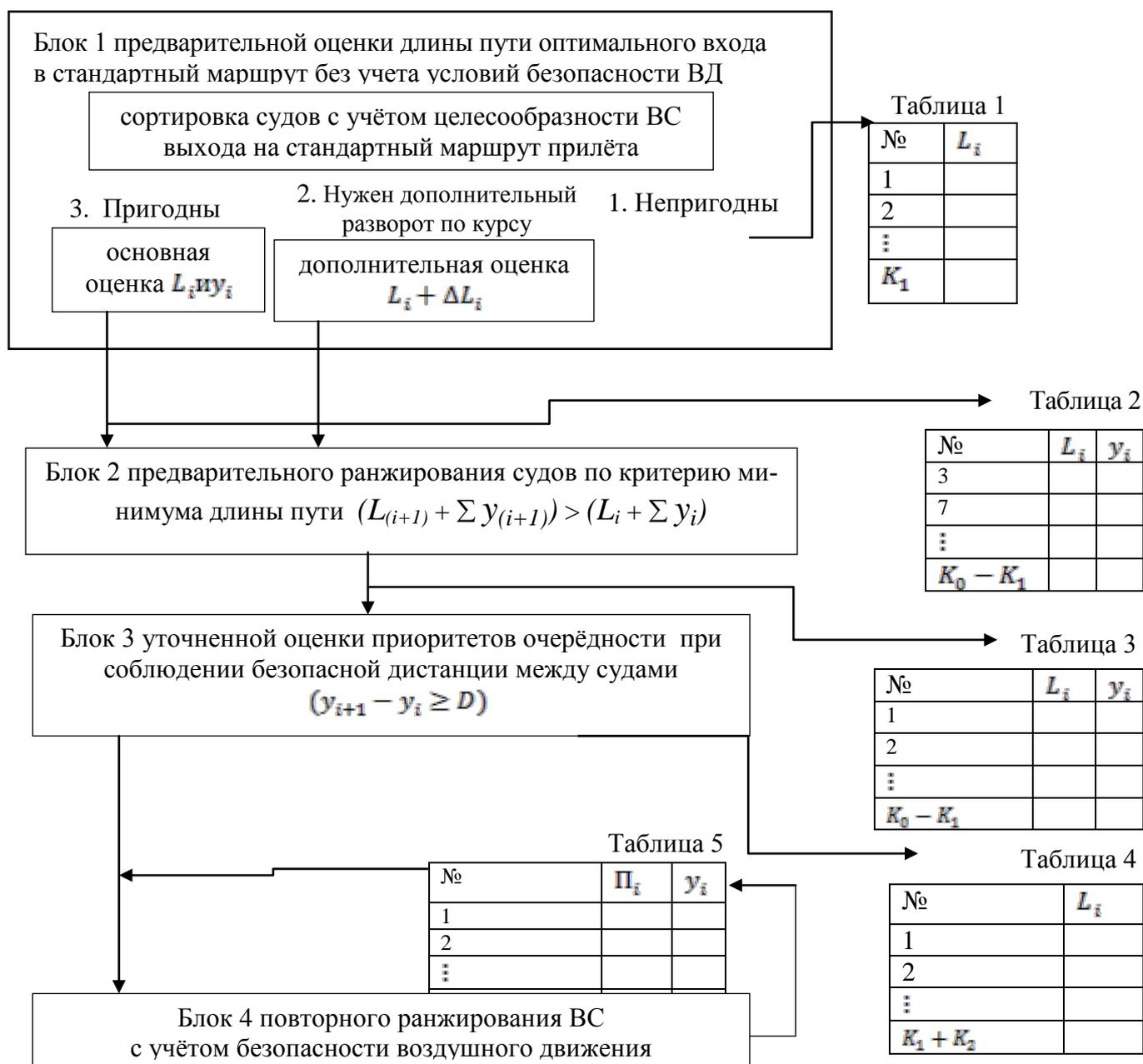
Считаем, что решив задачу для одного маршрута STAR, можно решить эту задачу для множества подобных маршрутов. В качестве иллюстрации на рис. 1 изображено множество из пяти случайно расположенных в пространстве воздушных судов. Каждое из них следует со случайным курсом  $\psi_i$ . Ось  $Z$  ориентирована по сторонам света (Север, Юг, Запад, Восток) и направлена в сторону  $faf$  ВПП. Аналогично ориентирована ось  $X$  и направлена в сторону ближайшей точки стандартного маршрута.



**Рис. 1.** Расположение воздушных судов в начальный момент времени  $t_0$  относительно STAR (LEBED, MALAG, NECAY)

Выход на стандартный маршрут производится путем предварительной оценки длины и необходимости маневрирования с соблюдением условий безопасности воздушного движения. На рис. 2 представлена укрупнённая блок-схема алгоритма определения очередности прилёта с выходом на стандартный маршрут.

В блоке 1 происходит предварительная оценка длины пути оптимального входа в стандартный маршрут без учета условий безопасности воздушного движения. Множество анализируемых воздушных судов сортируется по трём качествам – «пригодные ВС» (разворот по курсу следования меньше или равно  $30^0$  – сит. 3), «ВС, требующие дополнительной оценки» (разворот по курсу следования более  $30^0$  – сит. 2), «непригодные» (воздушные суда, не успевающие снизиться до приемлемой высоты или требующие разворота на угол более  $360^0$ , а также воздушные суда, не успевающие произвести посадку до наступления момента времени ухода на запасной аэродром). В блоке 2 производится предварительное ранжирование ВС по критерию минимума длины пути. В блоке 3 уточняется приоритет очередности при внесении условия соблюдения безопасных интервалов эшелонирования между ВС анализируемого множества, после чего также может возникнуть подмножество «непригодных» ВС. Блок 4 повторно ранжирует ВС с учётом безопасности воздушного движения и эффективности построения очереди прилетающих ВС.



**Рис. 2.** Укрупненная блок-схема алгоритма определения очередности прилёта с выходом на стандартный маршрут

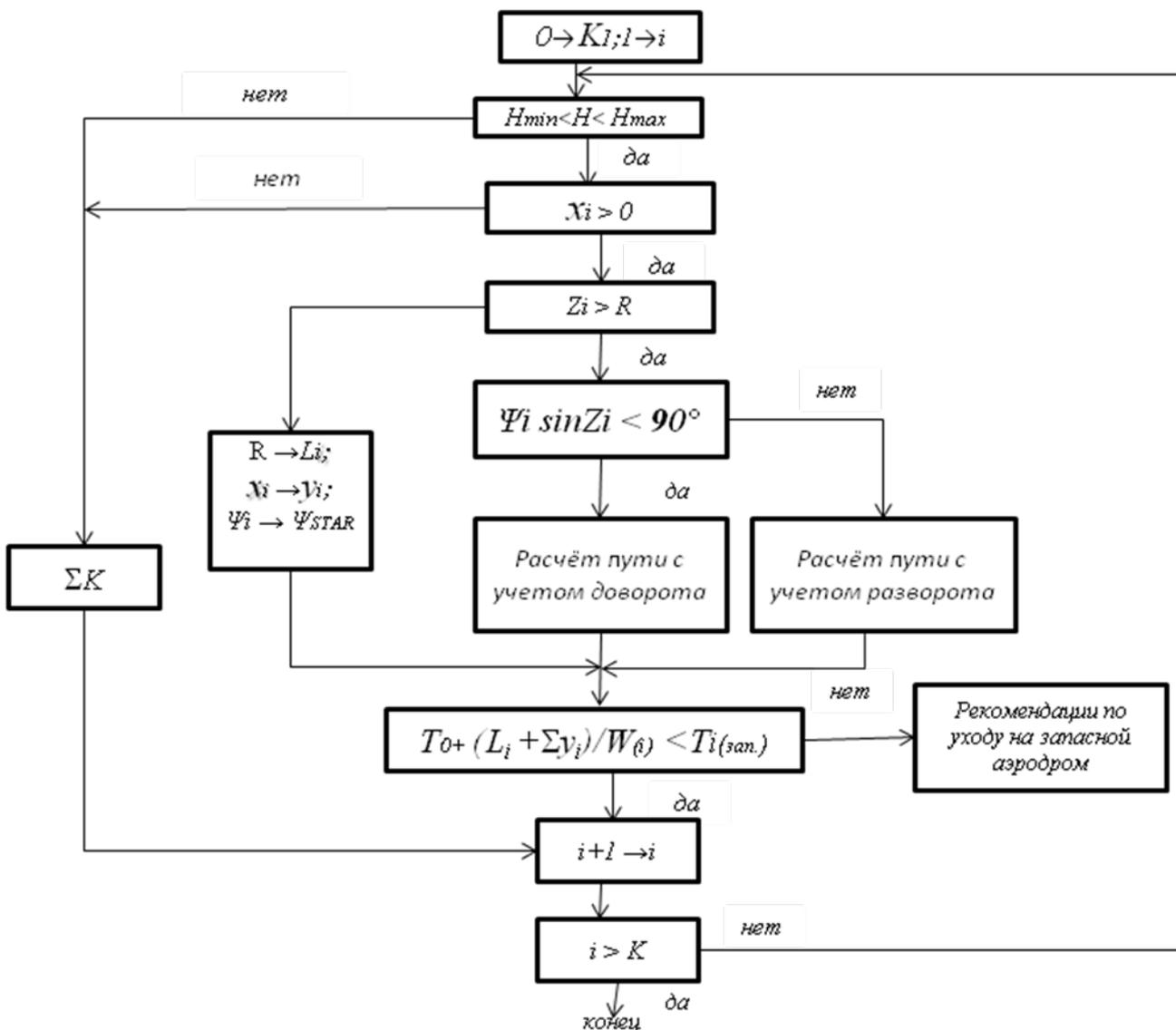
Группа ВС, характеризующаяся сит. 3 (рис. 1 ВС 1, ВС 2), способна выйти на STAR без существенного дополнительного маневра. Длина пути  $L_i$  каждого  $i$ -го ВС этой группы определяется прямолинейными отрезками, начиная с кратчайшего расстояния до STAR с прибавлением оставшейся части стандартного маршрута. В результате работы первого блока формируются две таблицы:

- табл. 1 (состоит из ВС, которым отказано в обслуживании);

- табл. 2 (состоит из ВС, характеризующихся сит. 3). В табл. 2 в случайном порядке располагаются номера ВС и соответствующие значения длины участка пути  $L_i$  и суммарной длины оставшегося пути отрезков стандартного маршрута  $\sum y_j$ .

Работа второго блока предварительно устанавливает очередь по критерию минимальной длины пути  $(L_{(i+1)} + \sum y_{(i+1)}) > (L_i + \sum y_j)$ . Результаты размещены в табл. 3.

В блоке 3 производится контроль и рассредоточение ВС на безопасную продольную дистанцию  $D$ . С учетом безопасности воздушного движения формируется табл. 4. При необходимости производится повторное ранжирование. В конечном счёте на выходе результат соответствует табл. 5 (рис. 2).



**Рис. 3.** Блок-схема предварительной оценки длины пути оптимального входа в стандартный маршрут без учета условий безопасности воздушного движения

На рис. 3 представлена предварительная оценка длины пути, затрачиваемого воздушным судном, для оптимального «встраивания» в стандартный маршрут прибытия и движения по данному маршруту до точки  $faf/fap$ . Оценка высоты полета производится с учетом типа воздушного судна, его тактико-технических характеристик и соответствующего расстояния до конечной точки маршрута. Значения высоты полета  $i$ -го ВС ( $H_i$ ) должно удовлетворять определенному интервалу рассчитанных высот. Далее рассматриваются три варианта встраивания воздушного судна в стандартный маршрут:

- воздушное судно уже находится на маршруте, или требуются незначительные маневры для встраивания в него;

- воздушному судну необходимо выполнить доворот на определенный угол для выхода на маршрут и доворот для встраивания в стандартный маршрут. Повороты не превышают  $30^0$ ;

- воздушному судну необходимо выполнить разворот для встраивания в стандартный маршрут.

В каждом конкретном случае вычисляются три слагаемых:

-  $L_1$  - путь или время дополнительного разворота по курсу;

-  $L_2$  - путь до достижения точки входа на стандартный маршрут;

-  $L_3$  - путь по стандартному маршруту до его конечной точки.

Алгоритм вычисления каждого из этих значений имеет ряд особенностей и в данной статье не рассматривается. Попутно со значением  $L_j$  вычисляются значения координаты ( $Y_i$ ) точки входа  $i$ -го ВС на STAR, которая используется для задания безопасной дистанции между воздушными судами.

Следующим этапом производится ранжирование воздушных судов по критерию минимума длины пути для определения очерёдности посадки. После сортировки данных обо всех ВС в верхней строке табл. 2 располагается воздушное судно, заходящее на посадку первым.

В блоке № 3 (рис. 2) уточняется длина пути каждого воздушного судна с учетом безопасной дистанции в горизонтальной и вертикальной плоскости относительно остальных ВС. В том случае, если безопасные интервалы горизонтального и вертикального эшелонирования между какими-либо двумя воздушными судами меньше допустимого  $\sum Li - \sum Li+1 < D_{без}$ , то длина пути ВС  $i+1$  увеличивается за счет отворота от оптимального курса в сторону от ВС  $i$  на угол  $30^0$ , после чего производится пересчет с учетом задержки времени разворота.

Влияние условий безопасности воздушного движения на очередность прилёта существенно. Поэтому после каждого пересчета производится повторное ранжирование воздушных судов в очереди прилёта.

На основании проделанных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложен алгоритм определения очерёдности прилета для случайно расположенных в пространстве воздушных судов с выходом на стандартный маршрут прилета STAR. Расчёт приоритетов ведется исходя из условий встраивания в стандартный маршрут с учетом предыдущего ВС.

2. Планирование очерёдности имеет два этапа: предварительная оценка длины пути до конечной точки маршрута без учёта безопасной дистанции между воздушными судами и конечное ранжирование с учетом безопасных интервалов и приоритетов.

3. Алгоритм позволяет ещё на начальном этапе движения ВС определить целесообразность его встраивания в прилётный поток с учетом времени ухода на запасной аэродром, что особенно актуально для сбойных ситуаций при УВД.

Предложенный алгоритм целесообразно расширить за счёт применения критерия экономичности встраивания в STAR независимо от точки встраивания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо. Оценка эффективности организации взаимопомощи в многоканальных компьютерных и человеко-машинных системах массового обслуживания // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: труды IX всероссийской науч.-техн. конф. - Тамбов, 2009.

**ALGORITHM PURPOSE PRIORITY ANOTHER ACCIDENT ARRANGED  
IN SPACE AIRCRAFTS TO EXIT AT STANDARD ARRIVAL ROUTE****Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E.**

The article presents the algorithm for insertion into a standard arrival route randomly distributed in space aircrafts with the priorities in the queue migratory flow. Also analyzes the feasibility of incorporating the STAR of care as an alternative to go to the alternate.

**Key words:** priority for landing, queue migratory flow, safety distances on landing, efficiency of a sequence, alternate airport.

**Сведения об авторах**

**Лебедев Георгий Николаевич**, 1936 г.р., окончил МИФИ (1959), заместитель заведующего кафедрой Московского авиационного института, автор 185 научных работ, область научных интересов - методы оптимального управления.

**Малыгин Вячеслав Борисович**, 1960 г.р., окончил УВАУ ГА (1988), доцент кафедры УВД МГТУ ГА, автор 7 научных работ, область научной деятельности – аэронавигационное обслуживание и использование воздушного пространства.

**Нечаев Евгений Евгеньевич**, 1952 г.р., окончил НЭТИ (1974), профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, автор более 180 научных работ, область научных интересов – теория УВД, радиолокация, радионавигация, теория и техника СВЧ измерений.

УДК-517.977

## ЗАДАЧА БЕСПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ САМОЛЁТОВ ПРИ ИХ ПОПАДАНИИ В ТРОМБОН ВО ВРЕМЯ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ\*

В.Б. МАЛЫГИН, ТИН ПХОН ЧЖО

Рассмотрена многоканальная система беспriorитетного обслуживания самолетов при заходе на посадку в разные аэродромы Московского аэроузла. Показана возможность достижения максимальной безопасности воздушного движения при малых запасах топлива на борту.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты.

### Введение

Одна из сложных задач управления комплексом самолетов – внезапная переориентация самолетов, находящихся в зонах ожидания и на круге, на посадку на удаленный запасной аэродром. При возникновении такой необходимости большая группа самолетов должна лететь с сохранением безопасных расстояний между ними, а значит, реконфигурирована в строй для перелета с последующим перестроением в эшелон ожидания посадки.

Схемы прилета в данной задаче имеют по одному стандартному маршруту (STAR) с каждого из 4-х направлений (Юг, Запад, Север, Восток) по каждому аэродрому и содержат в себе элементы «тонкого» регулирования потока типа «тромбон», которые изображены на рис. 1 в виде трех петель.

В данной работе предложена методика расчета вероятных характеристик обслуживания самолетов в тромбоне и оценка максимально допустимого их числа в очереди с использованием критерия максимальной экономичности полетов. При превышении этого числа подлетающий к трассе самолет должен пересечь ее и отправиться на другую трассу, и это должно быть оправдано из соображений экономичности полета всей группы самолетов. Ниже рассмотрен случай – беспriorитетного обслуживания самолетов при перелетах или попадании в один из тромбонов, показанных, в частности, на рис. 1.

### Случай беспriorитетного обслуживания самолетов, попавших в очередь

Вначале разберем многоканальную систему беспriorитетного обслуживания с очередью, также число мест в очереди примем равным максимальным числу самолетов, уже летящих в эшелоне.

Пусть на вход системе массового обслуживания (СМО) поступает поток беспriorитетных заявок с интенсивностью  $\lambda$ ; интенсивность обслуживания (для одного канала)  $\mu$ ; число мест  $n$ .

Состояние системы будем нумеровать по числу заявок, связанных с системой:

$X_0$  – оба канала свободны, система свободна от заявок;

$X_{1,0}$  – в системе обслуживается одна заявка;

$X_{2,0}$  – в системе обслуживаются 2 заявки;

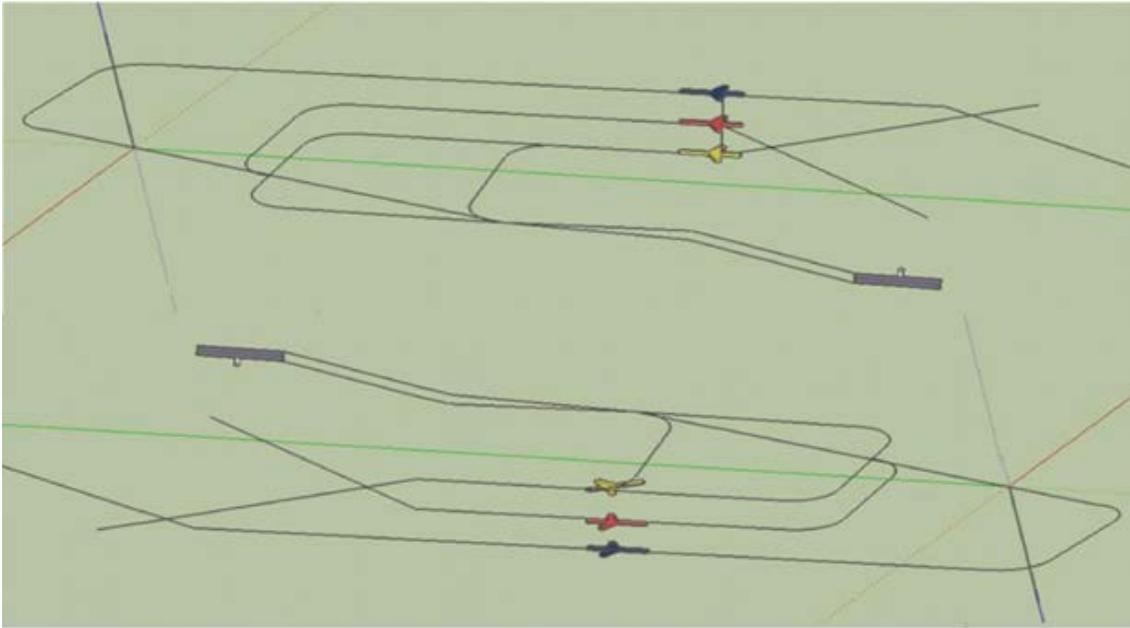
$X_{n,0}$  – в системе обслуживаются  $n$  заявок, и все  $n$  каналов заняты;

$X_{n,1}$  – заняты все  $n$  каналов, и одна заявка стоит в очереди;

$X_{n,2}$  – заняты все  $n$  каналов, и 2 заявки стоят в очереди;

$X_{n,n}$  – заняты все  $n$  каналов, и  $n$  заявок стоят в очереди, т.е. в очереди мест нет.

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)



**Рис. 1.** Схема захода на посадку по двум линиям пути с помощью тромбонов

Поток заявок вводится с интенсивностью  $\lambda$ , а поток обслуживания с интенсивностью, равной  $\mu$ , умноженной на число занятых каналов.

Напишем выражения для предельных вероятностей состояний, сразу же обозначая  $\lambda/\mu = \rho$ :

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \left[ 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho/n - \rho/n^{m+1}}{1 - \rho/n} \right]^{-1}; \\
 P_1 &= \frac{\rho}{1!} P_0; \\
 P_2 &= \frac{\rho^2}{2!} P_0; \\
 P_{n+1} &= \frac{\rho^n}{n * n!} P_0; \\
 P_{n+2} &= \frac{\rho^{n+2}}{n^2 * n!} P_0; \\
 P_{n+n} &= \frac{\rho^{n+n}}{n^n * n!} P_0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

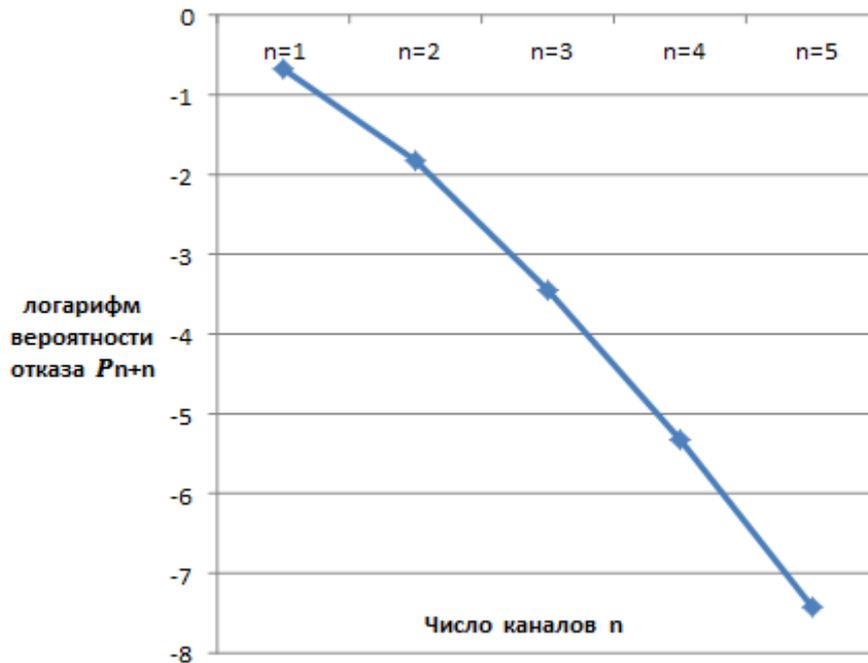
Подставляя заданное нам значение коэффициента загрузки, например, равного  $\rho=0,7$  для  $n$  каналов с длиной очереди  $n$ , получим:

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \left[ 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho/n - \rho/n^{m+1}}{1 - \rho/n} \right]^{-1}; \\
 P_0 &= \frac{1}{1 + 0,7 + \frac{0,7^2}{2!} + \frac{0,7^3}{3!} + \frac{0,7^3}{3!} \frac{0,7/3 - 0,7/3^{3+1}}{1 - 0,7/3}} = 0,495.
 \end{aligned}$$

Подставляя  $P_0$  в формулу (1), можем получить остальные вероятностные состояния  $n$  канальной СМО с ожиданием, в том числе интересующую нас вероятность отказа  $P_{n+n}$  в обслуживании

$$P_{n+n} = \frac{\rho^{n+n}}{n^n * n!} P_0. \tag{2}$$

Теперь можно построить график логарифмической зависимости вероятности отказа в обслуживании тромбоном от допустимого числа самолетов  $n$ . Этой зависимости соответствует график на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость вероятности отказа от числа каналов в беспriorитетном обслуживании в логарифмическом масштабе

Выражения (1) и (2) для беспriorитетного обслуживания известны как формулы Эрланга [1], но они приведены для методического анализа и получения новых соотношений, приведенных ниже, для расчета оптимальной длины очереди самолётов в тромбоне.

### Расчет оптимального числа самолётов в очереди в тромбоне

Как уже отмечалось выше, длина очереди самолетов в тромбоне обычно ограничена как по экологическим причинам при его расположении над крупным населенным пунктом, так и по экономическим соображениям. Рассмотрим последнее обстоятельство более подробно при следующей постановке задачи.

Пусть при попадании самолетов в очередь, существующую в тромбоне, самолет должен дополнительно пролетать некоторый путь до выхода на трассу, пропорциональный имеющемуся числу ( $k$ ) впереди летящих самолетов. Пусть безопасное расстояние ( $l$ ) между ними задано и примерно равно 20 км. Это означает, что при скорости 400 км/ч эти самолеты будут приземляться друг за другом в аэропорту через время  $l/v = 200$  с, т.е. примерно через три минуты. Этому времени соответствуют лишние затраты топлива  $R$ , а общие затраты в тромбоне при очереди длиной  $k$  будут равны  $kR_1$ .

Пусть у самолета есть другая возможность перелетать на соседнюю трассу, минуя тромбон, преодолев другой путь, длина которого равна в среднем расстоянию между соседними трассами. При имеющейся конфигурации Московского аэроузла с кругом радиуса 100 км примерная оценка длины этого пути 80 км, что определяет дополнительные затраты  $R_2$  топлива

$$R_2 = kR_1, \quad \text{где } k = 4.$$

Ставится задача выбора такой оптимальной величины ( $n$ ) допустимого числа самолетов в тромбоне, при котором затраты топлива  $R_0$  для всех самолетов будут минимальны.

С учетом вероятностного состояния ( $n$ ) - канальной системы обслуживания можно записать следующий параметрический критерий оптимальности

$$R_0 = R_1 \sum_{i=1}^n iP_i + R_2 P_n = R_1 \sum_{i=1}^{n-1} iP_i + P_n(n + R_1 + R_2) = R_1 \left[ \sum_{i=1}^{n-1} iP_i + P_n(n + k) \right] \rightarrow \min \cdot (3)$$

Выражение в квадратных скобках дает возможность выбрать нужное значение (n), если для определения вероятностей  $P_i, i = 1 \dots n$  воспользоваться формулами Эрланга для беспriorитетного обслуживания. Так как средняя скорость обслуживания самолетов в тромбоне выше скорости их поступления, т.е.  $\rho < 1$ , зададимся значением  $\rho = 0,7$ . Расчеты показали, что при  $k = 4$  минимум  $R_0$  обеспечивается при  $n = 5$ , т.е. расчетная длина тромбона не превышает 100 км.

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что при беспriorитетном обслуживании самолётов без учета оставшегося на борту топлива, малая вероятность отказа при заходе в заданный эшелон требует использования тромбона значительного размера, который ограничен другими факторами.

2. Показана возможность выбора оптимального числа самолетов в очереди в тромбоне, при котором в среднем обеспечивается максимальная экономичность полетов группы подлетающих к Москве самолетов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. - М.: Сов. радио, 1972.
2. Клейрок Л. Вычислительные системы с очередями. - М.: Мир, 1979.
3. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо Оценка эффективности организации взаимопомощи в многоканальных компьютерных и человеко-машинных системах массового обслуживания // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: труды IX всеросс. науч.-техн. конф. - Тамбов, 2009.

### PROBLEM OF WITHOUT PRIORITY SERVICE OF PASSENGER AIRCRAFT WHEN THEY ENTER TO THE TROMBONE DURING ARRIVAL

Malygin V.B., Tin Phone Kyaw

Considered multichannel system without priority maintenance of aircraft during landing in different airfields of Moscow air complex. Demonstrated the possibility of achieving maximum security who-stuffy movement with small reserves of fuel on Board.

**Key words:** queuing system, security control, optimal control, aircraft.

### Сведения об авторах

**Малыгин Вячеслав Борисович**, 1960 г.р., окончил УВАУ ГА (1988), доцент кафедры УВД МГТУ ГА, автор 7 научных работ, область научных интересов – аэронавигационное обслуживание и использование воздушного пространства.

**Тин Пхон Чжо**, 1978 г.р., окончил МАИ (2007), кандидат технических наук, докторант МАИ, автор 18 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

УДК 629.7.351

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДИСПЕТЧЕРА ПО УПРАВЛЕНИЮ ГРУППОЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ\*

В.Б. МАЛЫГИН, ТИН ПХОН ЧЖО, А.Н. ТУРКОВ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

Рассматривается метод, связанный с определением максимального количества воздушных судов, находящихся одновременно на связи у диспетчера, с учетом обеспечения безопасности полетов.

**Ключевые слова:** загруженность диспетчера, нормативно-пропускная способность, интенсивность воздушного движения.

Воздушное пространство (ВП) Московской зоны, включающее Московский район Единой системы организации воздушного движения (МР ЕС ОрВД) и Московский узловой диспетчерский район (МУДР), является наиболее загруженным и наиболее проблематичным ВП Российской Федерации. Загруженность ВП обусловлена тем, что маршруты большей части полётов, выполняемых над территорией Российской Федерации, проходят через воздушное пространство Московского района ЕС ОрВД, а большая часть взлётов и посадок, выполняемых на аэродромах Российской Федерации, выполняется на аэродромах Московской воздушной зоны. Наиболее проблематичное потому, что ВП МЗ ЕС ОрВД находится в сфере интересов большого количества заинтересованных ведомств и организаций, при этом координация этих интересов не соответствует динамичным процессам изменений деятельности и интересов самих организаций и ведомств. Особенно проблематичным в последние годы становится использование воздушного пространства Московской воздушной зоны для полётов воздушных судов гражданской авиации. В связи с этим стали не редкими случаи задержек с вылетом из аэропортов ВС ГА и увеличения времени маневрирования заходящими на посадку ВС ГА. Существующая структура ВП МР ЕС ОрВД и МВЗ не позволяет осуществлять равномерность загрузки диспетчерского состава, что приводит к возникновению случаев превышения ее допустимых нормативных значений [3].

Превышение нормативно-пропускной способности в аэропортах московского узлового диспетчерского района чаще всего происходит в утренние и вечерние часы. Снизить эту нагрузку возможно совершенствованием системы планирования.

### Загруженность диспетчера УВД

В настоящее время загруженность диспетчера УВД рассчитывают, основываясь на учете среднестатистического уровня загруженности диспетчеров управления воздушным движением (далее - диспетчер УВД), осуществляющих диспетчерское обслуживание в установленных для них зонах (районах) ответственности.

Пропускная способность для диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения выражается количеством воздушных судов в час, которые обслуживаются в данном воздушном пространстве. Расчет норматива пропускной способности (далее - НПС) диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения проводится для условной работы диспетчера УВД, которые рассматриваются как типичные или усредненные для данного диспетчерского пункта (сектора), на основе учета факторов, включенных в Методику. При этом за типичные условия работы принимаются факторы, изложенные в подпункте 2.3.4 Федеральных авиационных правил «Организация воздушного движения в Российской Федерации» [2].

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)

Уровень загруженности диспетчера ОВД, выполняющего обслуживание воздушного движения на конкретном рабочем месте, характеризуется значением его показателя загруженности ( $K_3$ ).

Показатель загруженности диспетчера представляет собой отношение времени, затрачиваемого диспетчером на непосредственное обслуживание воздушного движения, к интервалу времени, в течение которого выполняется оценка загруженности диспетчера.

Величина показателя загруженности диспетчера определяется по графику  $K_3 = 0,55$  (ИВД/НПС) (рис. 1), который был получен на основе экспериментальных исследований загруженности диспетчеров ОВД, степени их функциональной напряженности и психофизиологических возможностей человека применительно к конкретному диспетчерскому пункту (сектору) конкретного органа обслуживания воздушного движения.

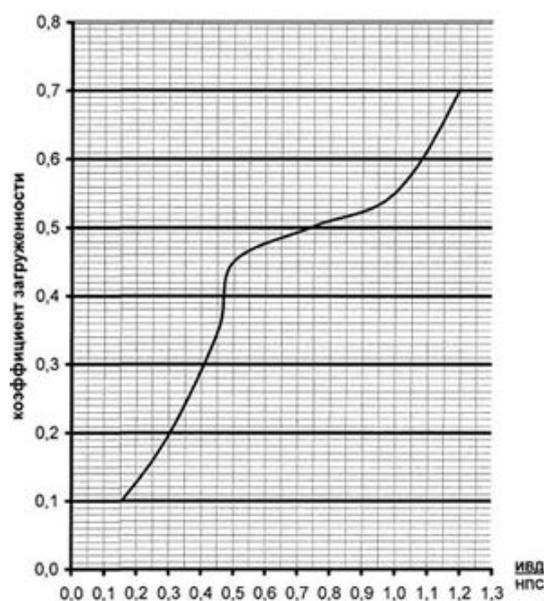


Рис. 1. Показатель загруженности диспетчера

Нормативы пропускной способности (НПС) рабочих мест диспетчерских пунктов ОВД ГА определяют значения интенсивности воздушного движения (ИВД), соответствующие допустимому уровню загруженности диспетчера ОВД. За норматив (нормативное значение) пропускной способности диспетчера принимается интенсивность воздушного движения, при которой показатель загруженности диспетчера  $K_3 = 0,55$ .

Для расчета пропускной способности диспетчерского сектора используют значение типовых НПС, которые берутся из таблиц для расчета. Типовые НПС выбираются в зависимости от структуры зоны и  $T_{ср. вэв}$ . В настоящей методике расчета предлагается определить НПС с учетом работы диспетчеров в конкретном секторе, их психофизиологических возможностей, для этого необходимо определить максимальное количество воздушных судов, которое может одновременно находиться на связи у диспетчера. Для определения этого значения воспользуемся некоторыми параметрами оценивающими работу диспетчера:

1. Частый переспрос позывных.
2. Пауза перед ответом экипажу.
3. Передача УВД нарушена (не передал ВС на частоту соседнего сектора).
4. Неэффективное УВД (не успевает своевременно передавать команды экипажу).
5. Интервал между заходящими на посадку ВС очень большой.
6. Уход ВС на второй круг.

При выявлении небольших ошибок в работе фиксируется количество ВС, находящихся на связи у диспетчера. С помощью экспериментальных данных для одного из секторов подхода было определено максимальное количество ВС для нормальной работы диспетчера.

С помощью закона Пуассона (1) можно определить вероятность нахождения  $m$  ВС в секторе управления при определенной НПС:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (m=0,1,\dots); \quad (1)$$

$$a = \frac{tk}{60}, \quad (2)$$

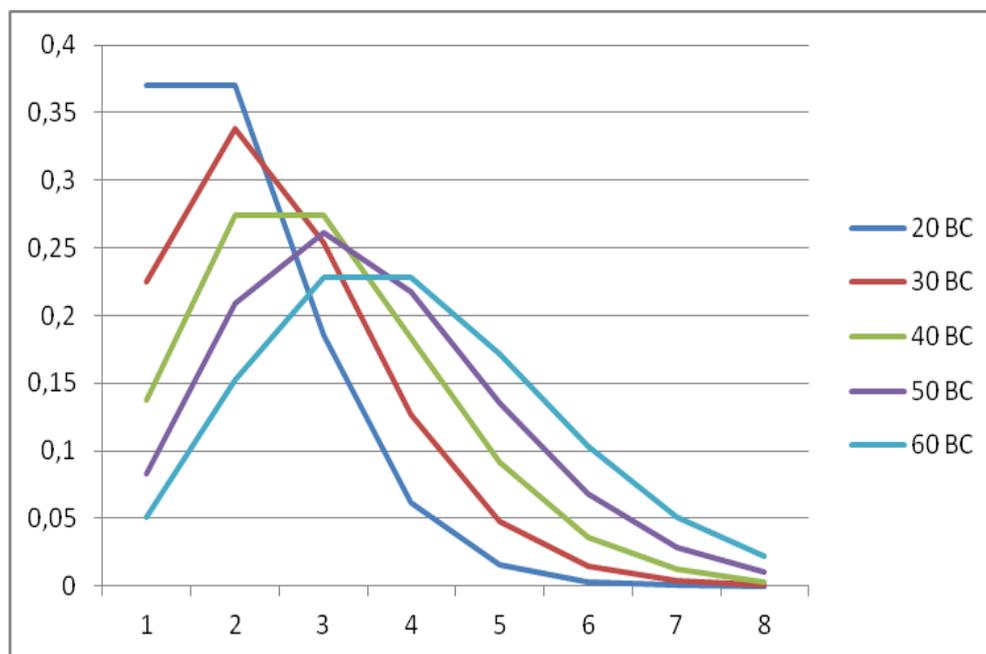
где  $K$  – количество ВС за 1 час (НПС);  $m$  – количество ВС одновременно на связи у диспетчера;  $T$  – средневзвешенное время.

Средневзвешенное время нахождения воздушного судна в зоне ответственности ( $T_{\text{ср.взв.}}$ ) можно определить по формуле

$$(3) \quad T_{\text{ср.взв.}} = \frac{(m_1 * t_1 + m_2 * t_2 + \dots + m_i * t_i)}{100} \quad \text{мин,}$$

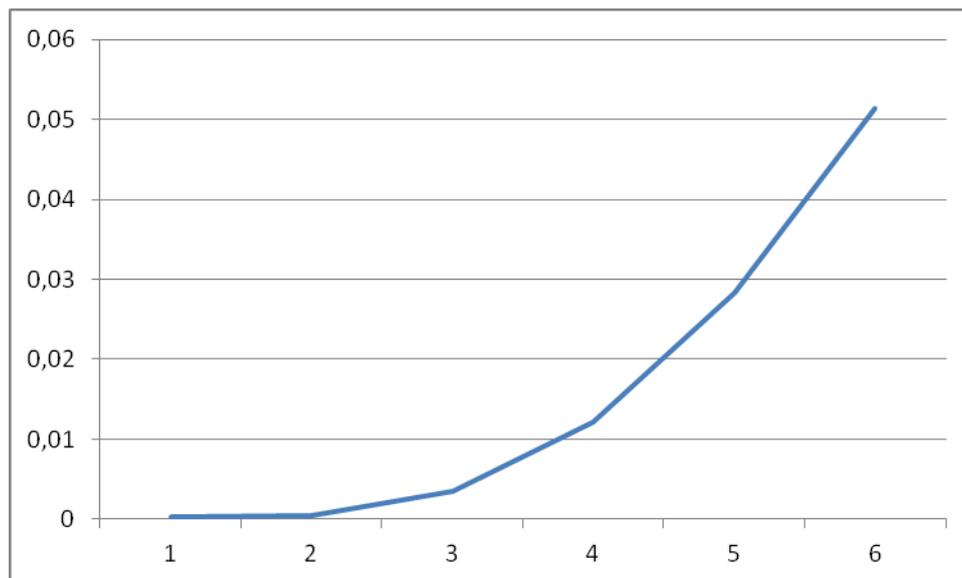
где  $m_1, m_2, \dots, m_i$  – относительное количество полетов воздушных судов по типам, %;  $t_1, t_2, \dots, t_i$  – среднее время нахождения ВС 1-го, 2-го, ...  $i$ -го типа в зоне обслуживания воздушного движения, мин;  $i$  – количество типов ВС [1].

С помощью полученных результатов был построен график (рис. 2), который показал, что наибольшая вероятность того, что на связи у диспетчера будет не более 6-и ВС, равна значению НПС=38 ВС в час, хотя остается вероятность того, что на связи окажется более 6-и ВС, которая составляет 5 %.



**Рис. 2.** График вероятности для различных НПС нахождения  $m$  ВС на связи у диспетчера одновременно

При увеличении потока ВС вероятность того, что на связи у диспетчера будет находиться  $m$  ВС, возрастает (рис. 3), то есть возрастает вероятность ошибки диспетчера.



**Рис. 3.** Вероятность нахождения одновременно на связи у диспетчера  $m$  ВС

Этот метод можно использовать и для расчета пропускной способности STAR, схем, объединяющих потоки ВС “тромбон” и “веер”, то есть найти вероятность того, что ВС пойдут в зоны ожидания, а, зная вместимость схем и зон ожидания, найти вероятность того, что диспетчерский район или один из его секторов будут перегружены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подольских В.В., Сосновский М.Ю. Организация воздушного движения. - М.: МГТУ ГА, 2007.
2. Логвин А.И. Организация воздушного движения: пособие к изучению дисциплины и контрольное задание. - М.: МГТУ ГА, 2004.
3. Алешин В.И., Дарымов Ю.П., Крыжановский Г.А. и др. Организация управления воздушным движением / под ред. Г.А. Крыжановского. - М.: Транспорт, 1988.

#### THE METHODOLOGY OF DETERMINING THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF AN AIR TRAFFIC CONTROLLER TO MANAGE A GROUP OF AIRCRAFT

Malygin V.B., Tin Phone Kyaw, Turkov A.N.

In the article considers a method that is associated with the determination of the maximum number of aircraft being simultaneously on communication in the air traffic controller to ensure safety.

**Key words:** workload air traffic controller, regulatory capacity, the intensity of air traffic.

#### Сведения об авторах

**Малыгин Вячеслав Борисович**, 1960 г.р., окончил УВАУ ГА (1988), доцент кафедры УВД МГТУ ГА, автор 7 научных работ, область научных интересов – аэронавигационное обслуживание и использование воздушного пространства.

**Тин Пхон Чжо**, 1978 г.р., окончил МАИ (2007), докторант МАИ, кандидат технических наук, автор 18 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

**Турков Алексей Николаевич**, 1989 г.р., окончил МГТУ ГА (2011), аспирант МГТУ ГА, автор одной научной работы, область научных интересов - аэронавигационное обслуживание и использование воздушного пространства.

УДК-517.977

## СИСТЕМА ПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТОМ В ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МОСКОВСКОГО АЭРОУЗЛА\*

А.В. ЗАЙЦЕВ, Д.А. МИХАЙЛИН, ТИН ПХОН ЧЖО

Рассмотрена многоканальная система приоритетного обслуживания самолетов при заходе на посадку в разные аэродромы Московского аэроузла. Показана возможность достижения максимальной безопасности воздушного движения при малых запасах топлива на борту.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты.

### Введение

Существуют ситуации, когда летящие произвольным курсом самолеты должны попасть на заданную линию пути или в заданный строй. К таким случаям относится, в частности, ситуация внезапного изменения условий посадки на различные ВПП по метеорологическим или техническим причинам.

Задача автоматизации управления оперативным планированием прилета на аэродромы Внуково, Домодедово, Шереметьево, а также организации оптимального и эффективного процесса выпуска воздушных судов с этих трех аэродромов уже сегодня является актуальной. Основная проблема заключается в несовершенстве структуры воздушного пространства Московского узлового диспетчерского района (МУДР), которая может существенно меняться с изменением хотя бы одного посадочного курса, которых всего 8 (по два на каждую ВПП или параллельные ВПП). Всего получается  $2^4$  вариантов структуры воздушного пространства. Так, для конфигурации посадочных курсов 194,316,065 структура маршрутов вылета и прилета в МУДР представлена на рис. 1.

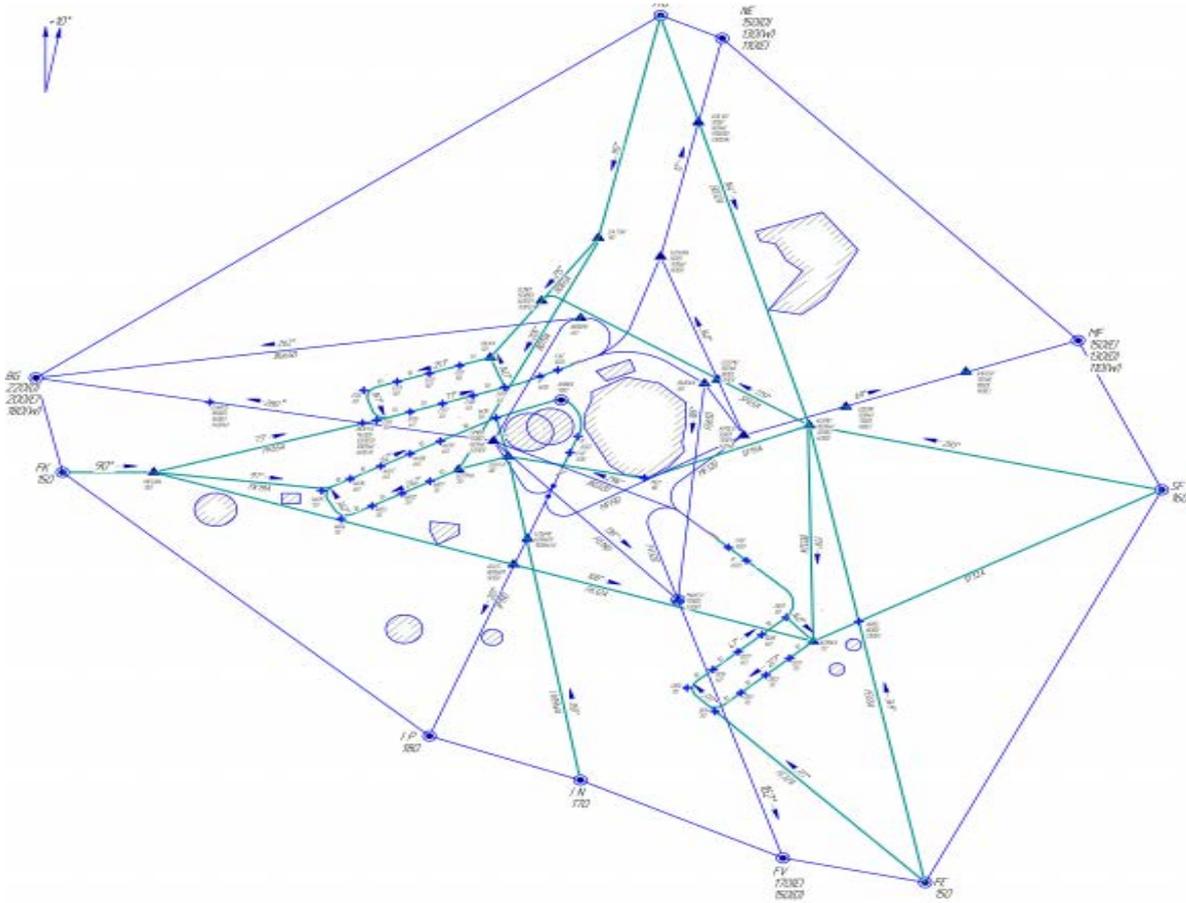
Схемы прилета в данном варианте имеют по одному стандартному маршруту (STAR) с каждого из 4-х направлений (Юг, Запад, Север, Восток) по каждому аэродрому и содержат в себе элементы «тонкого» регулирования потока типа «тромбон», которые изображены на рис. 1 в виде трех петель.

В процессе приоритетного обслуживания аварийный самолет с малым запасом топлива попадает на трассу вне очереди и не будет перелетать на другую трассу, а значит, будет спасен. Другие самолеты в этом случае будут иметь малую вероятность задержки в обслуживании.

Ниже рассмотрен случай приоритетного обслуживания самолетов при перелетах или посадки в один из тромбонов.

---

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)



**Рис. 1.** Организация прилета-вылета для конфигурации посадочных курсов 194/316/065 (А)

### Случай приоритетного обслуживания с ожиданием для $n=2$ без наличия очереди

Считая формулы Эрланга для беспriorитетного обслуживания известными, запишем формулы для приоритетных СМО  $n > 1$ . Рассмотрим частный, но типичный случай для  $n=2$  без очереди:

При нахождении формул вероятностного состояния СМО будем исходить из следующих положений:

1. Формируется полная группа событий, сумма вероятностей которых равна 1.
2. Вносится специальное обозначение для этих вероятностей:
  - для беспriorитетных заявок -  $P_i(t)$ ;
  - для приоритетных заявок - вероятность того, что в системе присутствует важная заявка -  $\xi_i(t)$ , а вероятность того, что в системе обыкновенная заявка -  $Z_i(t)$ .

3. Составляется разностное уравнение, а потом дифференциальное уравнение перехода из одного состояния в соседнее, при  $L = n$ :

$x_0$  – система свободна от заявок;  $x_{1,0}$  – в системе обслуживается одна простая заявка;  
 $x_{2,0}$  – в системе обслуживаются две заявки, т.е. все каналы заняты;  $x_{0,1}$  – в канале обслуживается одна важная заявка;  $x_{1,1}$  – в канале обслуживается одна важная заявка, а другая простая.

При рассмотрении ситуации с очередями нужно учесть, что все каналы заняты простыми заявками:

- $X_{2,0,1,0}$  – в канале обслуживаются две простые заявки, а в очереди стоит одна простая заявка;
- $X_{2,0,2,0}$  – в канале обслуживаются две простые заявки, а в очереди стоят две простые заявки;
- $X_{2,0,0,1}$  – в канале обслуживаются две простые заявки, а в очереди стоит одна важная;
- $X_{2,0,1,1}$  – канал занят простыми заявками, а в очереди стоит одна важная, одна простая.

Рассмотрим состояние, когда в канале обслуживается одна важная заявка. Тогда в очереди не должно быть ни одной важной заявки, потому что в системе может присутствовать только одна заявка: либо в канале, либо в очереди. Поэтому для двухканальной системы  $n=2$  с ожиданием получаются следующие вероятности состояний, при  $l = n$ :

$X_{1,1,1,0}$  – в системе обслуживается одна важная и одна простая заявки, а в очереди стоит одна простая заявка;  $X_{1,1,2,0}$  – в системе обслуживается одна важная и одна простая заявки, а в очереди стоят две простые.

Приступим к составлению уравнений вероятностного перехода с одного состояния в другое. Очевидно, что эти состояния должны быть соседними, т.е. они отличаются на одну заявку, больше или меньше (в канале или в очереди).

Расчет вероятности начнем с оценки вероятности  $P_0$  того, что система свободна в следующий момент  $(k+1)$ , пользуясь формулами из [1; 2], можно изобразить следующую схему

$$P_0(k+1) \begin{cases} \rightarrow P_0(k) [1 - (\lambda_1 + \lambda_2) \Delta t] \\ \rightarrow P_{1,0} v \Delta t \\ \rightarrow P_{1,1} v \Delta t. \end{cases}$$

В этой схеме есть 3 слагаемых: первое слагаемое – состояние, когда ни одна заявка не пришла в систему; второе слагаемое – состояние, когда в канале имеется обычная заявка, которую успели обслужить за время  $\Delta t$ ; третье слагаемое – состояние, когда в канале имеется важная заявка, которую успели обслужить. Далее рассматриваются последующие события для  $P_{1,0}(k+1), P_{2,0}(k+1), P_{0,1}(k+1), P_{1,1}(k+1)$  аналогичным образом.

### Случай приоритетного обслуживания при наличии очереди

Теперь рассмотрим вероятностные состояния в очереди.

Рассмотрим следующее событие, относящееся к вероятности состояния  $P_{0,0}$ , т.е. канал занят заявками, а в очереди нет ни одной заявки.

Для начала рассмотрим очередь, когда система занята только простыми заявками  $P_{2,0,x,y}$ . Для удобства мы опустим первые два индекса, так как они указывают на состояние в канале, а мы рассматриваем очередь, то примем, что ниже используемые два индекса  $x,y$  ( $P_{2,0,x,y}$ ) – это состояние в очереди

$$P_{0,0}(k+1) \begin{cases} \rightarrow P_{0,0}(k) [1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu + sv) \Delta t] \\ \rightarrow P_{1,0} (2\mu + (s+1)) \Delta t \\ \rightarrow P_{0,1} (2\mu + (s+1)) \Delta t. \end{cases}$$

Первое слагаемое описывает состояние, когда ни одна из заявок не пришла в очередь и ни одна не была обслужена, т.е. как были в канале обслуживания две простые заявки, так и остались в момент времени  $k$ ; второе слагаемое описывает, когда в канале обслуживалась одна из простых заявок, и из очереди пришла одна простая заявка; третье слагаемое – когда в канале обслужилась одна из простых заявок, и из очереди пришла одна важная заявка.

Рассмотрим следующее событие, относящееся к вероятности состояния  $P_{1,0}$ , т.е. канал занят простыми заявками, а в очереди находится одна простая заявка

$$P_{1,0}(k+1) \begin{cases} \rightarrow P_{1,0}(k) [1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu + sv) \Delta t] \\ \rightarrow P_0 (2\mu + (s+1)) \Delta t \\ \rightarrow P_{1+1,0} (2\mu + (s+1)) \Delta t. \end{cases}$$

Первое слагаемое описывает состояние, когда ни одна заявка не пришла в очередь и ни одна не обслужилась из нее, т.е. как были в канале обслуживания две простых заявки и в очереди одна простая заявка, так и остались в момент времени  $k$ ; второе слагаемое описывает случай, когда в очередь пришла одна простая заявка; третье слагаемое – когда из очереди ушла простая заявка, и сразу же пришла одна простая заявка.

Рассмотрим следующее событие, относящееся к вероятности состояния  $P_{2,0}$ , т.е. канал занят простыми заявками, и очередь занята простыми заявками

$$P_{2,0}(k+1) \begin{cases} \rightarrow P_{2,0}(k) [1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + 2\mu + s\nu)\Delta t] \\ \rightarrow P_1 \lambda_2 \Delta t \\ \rightarrow P_{2+1,0}(2\mu + (s+1)) \Delta t. \end{cases}$$

Первое слагаемое описывает состояние, когда ни одна заявка не пришла в очередь, и ни одна не обслужилась из нее, т.е. как были в канале обслуживания две простые заявки, так и остались в момент времени  $k$ ; второе слагаемое описывает случай, когда в очередь пришла одна простая заявка, т.е. была одна, и пришла вторая простая заявка; третье слагаемое описывает случай, когда из очереди ушла простая заявка, и на место ее пришла новая простая заявка.

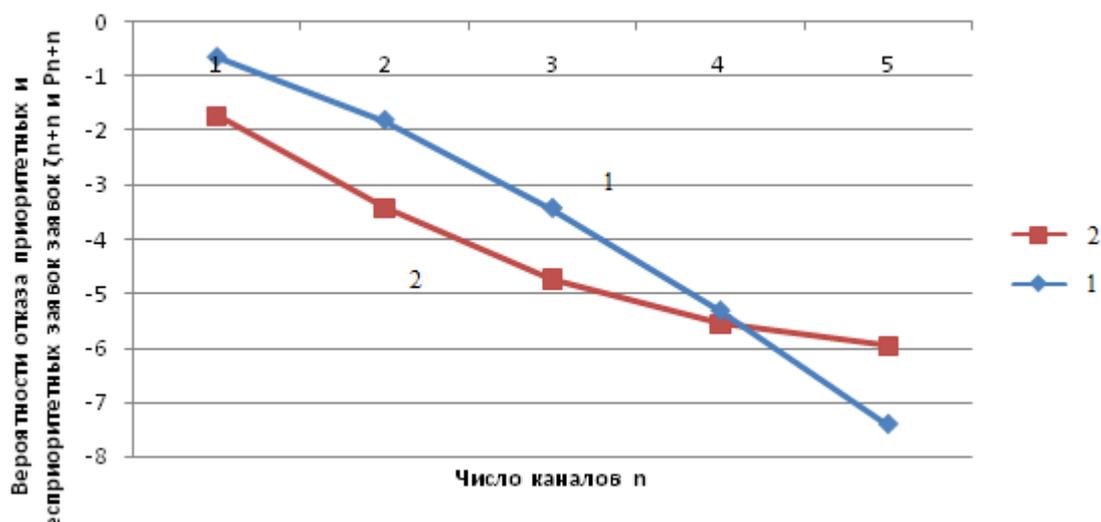
Таким образом, для оставшихся вероятностных состояний можно получить следующую группу новых формул, необходимую для расчета приоритетной СМО:

$$\left. \begin{aligned} B &= n - 1 + \frac{p_1}{2p_2} \frac{n^{n-1} (1 + n + n^n)}{(n+1)!} \\ \zeta_1 &= p_1 P_0 \left[ 1 + \frac{(p_1 + p_2)^{n-1}}{n!(1+p_2)} \frac{B}{B + p_1} \right] \\ \sigma &= \frac{(p_1 + p_2)^{n-1}}{n!} \frac{B}{B + p_1} p_1 P_0 = (\zeta - p_1 P_0)(1 + p_2) \\ \theta &= \frac{(p_1 + p_2)^{n-1}}{n!} p_1 P_0 \\ Z_{n+1} &= \frac{n^{z_{i-1}} (1 + l + l^2)(\theta - \sigma)}{(l+1)! \prod_{m=1}^l (n-1 + n * m)} \\ \zeta_{n+1} &= \frac{(n + 2p_1)\sigma - n\theta}{2n - 1} \\ \zeta_{n+1} &= \frac{2n' [(l-1 + \frac{p_1 l}{n})\sigma - (l-1)\theta]}{\prod_{m=1}^l (n-1 + m * n)} \end{aligned} \right\} (1)$$

По формулам (1) при  $l = n$  можно вычислить интересующие нас вероятности отказа в обслуживании  $Z_{n+n}$  и  $\zeta_{n+n}$ .

Приведем результаты расчета при  $\rho_1 = 0,1$ ,  $\rho_2 = 0,7$ . Зная  $P_0$  можно определить окончательно значения вероятностей  $Z_{2+1}, Z_{2+2}, \zeta_{2+1}, \zeta_{2+2}$  и т.д. и установить выигрыш в отказе обслуживания важных и обычных заявок, учитывая вероятности отказа в обслуживании, показанные на рис. 1.

$$\left. \begin{aligned} Z_{2+1} &= 0,003 * 0,47 = 1,41 * 10^{-3} \\ Z_{2+2} &= 1,867 * 10^{-3} * 0,47 = 0,877 * 10^{-3} \\ \zeta_{2+1} &= 0,467 * 10^{-3} * 0,47 = 0,219 * 10^{-3} \\ \zeta_{2+2} &= 0,373 * 10^{-3} * 0,47 = 0,175 * 10^{-3} \end{aligned} \right\} (2)$$



**Рис. 2.** Зависимость вероятности отказа от числа каналов:  
1 – в бесприоритетном обслуживании; 2 – в приоритетном обслуживании

Сравнивая графики 1 и 2 на рис. 2, можно убедиться, что вероятность отказа в обслуживании посадки по заданной линии пути для аварийного самолета в 10 ÷ 15 раз ниже при приоритетном обслуживании, чем в бесприоритетном. Значит, этим достигается максимальная безопасность воздушного движения при малых запасах топлива на борту перед самой посадкой.

### Заключение

Вероятность отказа в обслуживании и отправки на другой аэродром аварийных самолетов с малым запасом топлива в приоритетной системе обслуживания в 10 раз меньше по сравнению с бесприоритетной системой обслуживания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. - М.: Сов. Радио, 1972.
2. Клейрок Л. Вычислительные системы с очередями. - М.: Мир, 1979.
3. Лебедев Г.Н, Тин Пхон Чжо Оценка эффективности организации взаимопомощи в многоканальных компьютерных и человеко-машинных системах массового обслуживания // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: труды IX всеросс. науч.-техн. конф. - Тамбов, 2009.

### THE PRIORITY SERVICE SYSTEM BY THE IMPLEMENTATION OF PASSENGER AIRCRAFTS WHEN FLYING IN THE AIRSPACE OF MOSCOW TMA

Zaytcev A.V., Mikhaylin D.A., Tin Phone Kyaw

Considered multichannel system of the priority service aircraft during landing in different airfields of Moscow air complex. Demonstrated the possibility of achieving the maximum safety of air traffic in small reserves of fuel on Board.

**Key words:** queuing system, security control, optimal control, aircraft.

**Сведения об авторах**

**Зайцев Александр Владимирович**, 1956 г.р., окончил Серпуховское высшее военное командное училище (1979), доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления МАИ, автор более 60 научных работ, область научных интересов – система управления летательных аппаратов и системы искусственного интеллекта.

**Михайлин Денис Александрович**, 1984 г.р., окончил МАИ (2007), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн Вега», автор 17 научных работ, область научных интересов – системы управления летательных аппаратов и системы искусственного интеллекта.

**Тин Пхон Чжо**, 1978 г.р., окончил МАИ (2007), докторант МАИ, кандидат технических наук, автор 18 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

УДК-517.977

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ СБЛИЖЕНИЯ ДВУХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ИХ МАРШРУТОВ\*

ВУ СУАН ХЫОНГ, А.В. ЗАЙЦЕВ, ЗО МИН ТАЙК, ТИН ПХОН ЧЖО

Сформулирована задача автоматического контроля сближения судов на пересекающихся маршрутах. Предложен метод вычисления функции риска столкновения судов на основе динамического программирования, что позволяет сформировать сигналы тревоги для принятия предупредительных мер по безопасному управлению боковым и продольным движением.

**Ключевые слова:** контроль безопасности, оптимальное управление, летательные аппараты, динамическое программирование, функция риска.

### Введение

При пересечении запланированных маршрутов движения воздушных судов (ВС) возникает острая необходимость автоматического контроля безопасности их сближения. Особенно это важно, когда разница в моментах времени их попадания в точку пересечения заданных линий пути незначительна. Необходимо заранее установить этот факт, сформировать с помощью прогноза сигнал тревоги и передать системе управления движением команду на принятие предупредительных мер по предотвращению аварийного сближения ВС.

В данной работе в качестве основной меры предлагается дополнительное боковое маневрирование ВС для уклонения от их столкновения, а если этого недостаточно - изменение скоростей поступательного движения (одно ВС тормозит, другое повышает скорость).

Для реализации этого подхода нужно количественно оценивать разную степень тревоги, а значит и разную степень риска приближения ВС друг к другу. С этой целью в данной работе используется метод динамического программирования в непрерывной форме [1], на основе которого функция риска вычисляется в виде правой части уравнения Беллмана в случае оптимального управления двумя ВС одновременно, при следующей постановке задачи.

### Постановка задачи

#### Дано:

1. Пусть движение первого ВС по заданной линии пути  $m_1$ , являющегося основным объектом, для управления которым осуществляется контроль безопасности, подчиняется следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -a_1 x_2 + b_1 u_1; \\ \dot{y}_3 &= V_1,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x_1$  - координата бокового движения;  $x_2$  - боковая скорость;  $a_1$  и  $b_1$  - заданные параметры первого ВС;  $y_3$  - координата поступательного движения с заданной постоянной скоростью  $V_1$ ;  $u_1$  - синтезируемый сигнал управления первым ВС.

---

\*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)

2. Пусть движение второго ВС по другой заданной линии пути  $m_2$ , пересекающейся с  $m_1$  (как это показано на рис. 1) под углом  $90^\circ$ , подчиняется своим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= -a_2 y_2 + b_2 u_2; \\ \dot{x}_3 &= V_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $y_1$  - координата бокового движения второго ВС;  $y_2$  - его боковая скорость;  $x_3$  - координата поступательного движения с заданной постоянной скоростью  $V_2$ , равной  $(-V_1)$ , если сближение с первым ВС осуществляется слева от него (рис. 1), либо равной  $V_1$ , если сближение происходит справа;  $u_2$  - синтезируемый сигнал управления вторым ВС.

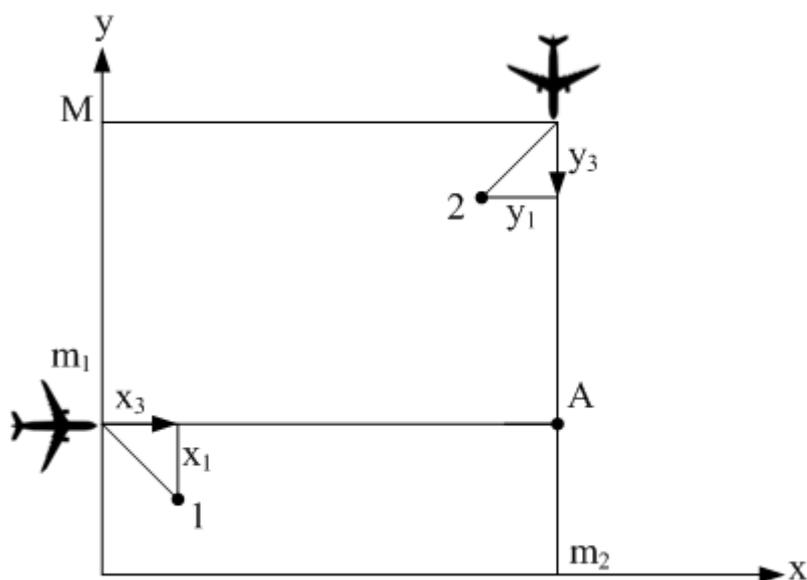


Рис. 1. Картина сближения ВС при их поперечном движении

3. Задан интегральный минимизируемый функционал  $J$  качества управления

$$J = \int_0^T \left[ \frac{\tau_0}{2} (u_1^2 + u_2^2) + \frac{\tau_1}{2} [(x_1 - m_1)^2 + (y_1 - m_2)^2] + \frac{\tau_2}{2} (x_2^2 + y_2^2) + \frac{\tau_3}{1 + (x_1 + x_3 + d)^2 k + k(y_1 + y_3 + d)^2} \right] dt, \quad (3)$$

где  $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$  - весовые коэффициенты значимости штрафов соответственно за расходимую мощность, отклонения от заданных линий пути, отклонения по боковой скорости и штрафа за опасное сближение по сравнению с заданной величиной  $d$  безопасной дистанции.

Последнее слагаемое в подынтегральном выражении  $f_0$  в формуле (3) определяет растущий риск столкновения по мере приближения судов друг к другу.

3. Начальные условия движения судов таковы, что при  $M - m_1 = m_2$  и равных по модулю скоростях попутного движения, они столкнутся в точке встречи А, вследствие чего система контроля должна своевременно сформировать сигнал о необходимости совершить дополнительное маневрирование во избежание аварийного сближения.

#### Требуется:

- синтезировать алгоритмы оптимального управления боковым движением судов для увеличения минимальной дистанции между ними при их сближении;
- сформировать функцию риска опасного сближения судов, прогнозирующую в аналитическом виде зависимость возможного ущерба от значений координат движения двух судов в текущий момент времени.

Как было показано в [4], поставленным требованиям полностью удовлетворяет динамическое программирование в непрерывной форме [1], т.к. правая часть уравнения Беллмана в частных производных учитывает динамику управляемых объектов и по определению является функцией текущего риска, а оптимальное управление по текущему состоянию зависит от вектора координат движения. Как показано ниже, это позволило получить нужные результаты в аналитическом виде, что удобно для технической реализации.

### Синтез оптимального управления боковым движением двух судов при их сближении

Прежде чем приступить к аналитическому синтезу, необходимо остановиться на координированном выборе направления бокового движения обеих судов. Ранее в [5] было показано, что оба судна должны поворачивать вправо, если одно из них движется навстречу другому слева (рис. 1), или – влево, если встречное движение одного из них происходит справа.

Согласно теории оптимального управления [1; 2], условию оптимальности соответствует уравнение Беллмана

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_{u_1, u_2} \{ f_0(\bar{x}, u_1, u_2) + \sum_{i=1}^n \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_i} \dot{x}_i(u_1, u_2) \}, \quad (4)$$

а функцию Беллмана  $\varepsilon$  нужно представить степенным полиномом

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 y_1 + \beta_4 y_2 + 0,5\gamma_1 x_1^2 + 0,5\gamma_2 x_2^2 + 0,5\gamma_3 y_1^2 + 0,5\gamma_4 y_2^2 + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 y_1 + \psi_{14} x_1 y_2 \\ & + \psi_{23} x_2 y_1 + \psi_{24} x_2 y_2 + \psi_{34} y_1 y_2 \end{aligned}$$

После чего уравнение Беллмана (4), в том числе её правую часть  $F(\bar{x}, \bar{y})$ , являющуюся функцией текущего риска, можно представить в виде

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \min_{u_1, u_2} \{ f_0(\bar{x}, \bar{y}, u_1, u_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} y_1 + \psi_{14} y_2) x_2 + (\beta_3 + \gamma_3 y_1 + \psi_{34} y_2 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) y_2 \\ & + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2)(b_1 u_1 - a_1 x_2) + (\beta_4 + \gamma_4 y_2 + \psi_{34} y_1 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)(b_2 u_2 - a_2 y_2) \} \\ = & \min_{u_1, u_2} \{ F(x_1, x_2, y_1, y_2, u_1, u_2) \} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $f_0$  - подынтегральное выражение (3) минимизируемого функционала;  $F(x_1, x_2, y_1, y_2, u_1, u_2)$  - минимизируемая функция текущего риска, используемая для контроля безопасности движения. Согласно принятой методике аналитического конструирования оптимальных регуляторов [3] с учетом квадратичной зависимости  $f_0$  от управлений  $u_1$  и  $u_2$ , условию экстремума по  $u_1$  и  $u_2$  соответствуют при  $\tau_0 = 1$  следующие оптимальные управления

$$u_{1opt} = -b_1(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2) \quad u_{2opt} = -b_2(\beta_4 + \gamma_4 y_2 + \psi_{34} y_1 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2). \quad (6)$$

Таким образом, для окончательного определения найденного алгоритма линейного оптимального управления необходимо вычислить искомые коэффициенты  $\beta_2, \beta_4, \gamma_2, \gamma_4, \psi_{12}, \psi_{14}, \psi_{23}, \psi_{24}, \psi_{34}$  - всего 9 коэффициентов функции Беллмана  $\varepsilon$ .

Чтобы это сделать, нужно представить левую и правую части уравнения (5) степенным полиномом второго порядка относительно координат состояния. Для этого нужно, во-первых, избавиться от дробно рациональной функции штрафа за опасное сближение, входящей в состав подынтегрального выражения  $f_0$ , заменив дробь на степенной полином

$$\frac{\tau_3}{1 + k(x_1 + x_3 + d)^2 + k(y_1 + y_3 + d)^2} \approx \tau_3 - k\tau_3(x_1 + x_3 + d)^2 - k\tau_3(y_1 + y_3 + d)^2. \quad (7)$$

Во-вторых, необходимо подставить найденные значения (6) оптимального управления  $u_{1opt}$  и  $u_{2opt}$  в слагаемые правой части уравнения Беллмана (5), их содержащие, и которые при  $\tau_0 = 1$  равны

$$\begin{aligned} \frac{u_1^2}{2} + b_1 u_1 (\beta_2 + \psi_{12} x_1 + \gamma_2 x_2 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2) + \frac{u_2^2}{2} + b_2 u_2 (\beta_4 + \psi_{34} y_1 + \gamma_4 y_2 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2) = \\ -0,5b_1^2 (\beta_2 + \psi_{12} x_1 + \gamma_2 x_2 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2)^2 - 0,5b_2^2 (\beta_4 + \psi_{34} y_1 + \gamma_4 y_2 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя полученные выражения (7) и (8) в уравнение (5), можно получить степенной полином второго порядка, содержащий 14 слагаемых, имеющих при разных степенях  $x_i$  и  $y_i$  свои множители, нелинейно зависящие от 14 искомым коэффициентов функции Беллмана -  $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$ .

Для их нахождения необходимо согласно [3] использовать условие  $-\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} = 0$  для установившегося состояния, приравняв множители при одинаковых степенях полинома относительно координат системы  $x_1, x_2, y_1, y_2$  в левой и правой частях уравнения (5).

Тогда можно получить следующие 14 нелинейных алгебраических уравнений относительно всех неизвестных коэффициентов  $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$  и попробовать найти их приближенным путем.

1.  $\tau_1 m_1 + k\tau_3(x_3 + d) + b_1^2 \beta_2 \psi_{12} + q^2 b_2^2 \psi_{14} \beta_4 - \psi_{13} p = 0.$
2.  $\beta_1 - a_1 \beta_2 - b_1^2 \beta_2 \gamma_2 - q^2 b_2^2 \beta_4 \psi_{24} + \psi_{23} p = 0.$
3.  $\tau_1 - k\tau_3 - b_1^2 \psi_{12}^2 - q^2 b_2^2 \psi_{14}^2 = 0.$
4.  $0,5\tau_2 + \psi_{12} - a_1 \gamma_2 - 0,5b_1^2 \gamma_2^2 - 0,5q^2 b_2^2 \psi_{24}^2 = 0.$
5.  $\tau_1 m_2 + k\tau_3(y_3 + d) + b_1^2 \beta_2 \psi_{23} + q^2 b_2^2 \psi_{34} \beta_4 - \gamma_3 p = 0.$
6.  $\beta_3 - a_2 \beta_4 - b_1^2 \beta_2 \psi_{24} - q^2 b_2^2 \beta_4 \gamma_4 + \psi_{34} p = 0.$
7.  $\tau_1 - k\tau_3 - b_1^2 \psi_{23}^2 - q^2 b_2^2 \psi_{34}^2 = 0. \tag{9}$
8.  $0,5\tau_2 + \psi_{34} - a_2 \gamma_4 - 0,5b_1^2 \psi_{24}^2 - 0,5q^2 b_2^2 \gamma_4^2 = 0.$
9.  $\gamma_1 - a_1 \psi_{12} - b_1^2 \psi_{12} \gamma_2 - q^2 b_2^2 \psi_{14} \psi_{24} = 0.$
10.  $\gamma_3 - a_2 \psi_{34} - b_1^2 \psi_{23} \psi_{24} - q^2 b_2^2 \gamma_4 \psi_{34} = 0.$
11.  $b_1^2 \psi_{12} \psi_{23} + q^2 b_2^2 \psi_{14} \psi_{34} = 0.$
12.  $(a_1 + a_2) \psi_{24} + b_1^2 \gamma_2 \psi_{24} + q^2 b_2^2 \gamma_4 \psi_{24} \psi_{14} \psi_{23} = 0.$
13.  $\psi_{13} - (a_2 + b_2^2 \gamma_4) \psi_{14} - b_1^2 \psi_{12} \psi_{24} = 0.$
14.  $\psi_{13} - (a_1 + b_1^2 \gamma_2) \psi_{23} - q^2 b_2^2 \psi_{34} \psi_{24} = 0.$

Ясно, что найти строгое аналитическое решение для  $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$  в квадратурах невозможно, поэтому нужно принять ряд допущений. В качестве первого приближения допустим, что динамические свойства сближающихся ВС примерно одинаковы, т.е.  $a_1 = a_2, b_1 = b_2$ . Тогда внимательный анализ уравнений - 3, 7, 11, 13, 14 системы (9) показывает, что если принять  $\psi_{12} = \psi_{34}$ , то коэффициенты  $\psi_{14} = \psi_{23} = 0$ . Поэтому из уравнений 3,7 системы (9) получим

$$\psi_{12} = \psi_{34} = \frac{\sqrt{\tau_1 - k\tau_3}}{b_1} = N. \tag{10}$$

Это позволяет сразу найти из уравнений 1 и 5 коэффициенты  $\beta_2$  и  $\beta_4$ :

$$\beta_2 = -\frac{\tau_1 m_1 + k\tau_3(x_3 + d) - \psi_{13} p}{b_1^2 N} = 0, \quad \beta_4 = \frac{\tau_1 m_2 + k\tau_3(y_3 + d) - \gamma_3 p}{q b_1^2 N} = 0. \tag{11}$$

Осталось найти  $\gamma_2, \gamma_4$  и  $\psi_{24}$ , чтобы полностью определить параметры алгоритмов оптимального управления (6). Для этого требуется проанализировать уравнения 4, 8 и 12 системы (9). Ясно, что  $\gamma_2 = \gamma_4$ , а для нахождения  $\gamma_2$  и  $\psi_{24}$  нужно учесть уравнения 4 и 12:

4.  $0,5\tau_2 + \psi_{12} - a_1 \gamma_2 - 0,5b_1^2 \gamma_2^2 - 0,5q^2 b_2^2 \psi_{24}^2 = 0.$
12.  $(2a_1 + 2b_1^2 \gamma_2) \psi_{24} = 0.$

В первом случае, если  $\psi_{24} \neq 0$ , из уравнения 11 получим

$$\gamma_2 = -\frac{a_1}{b_1^2} < 0,$$

что противоречит физическому смыслу процесса управления. В частности, при управлении одним ВС знак  $\gamma_2$  положителен. Во втором случае, если предположить, что  $\psi_{24} = 0$ , для нахождения  $\gamma_2$  надо решить квадратное уравнение 4. Как показал анализ различных корней этого уравнения, при  $\frac{a_1}{b_1^2} \geq 0$  лучшим решением является приближенное

$$\gamma_2 = \gamma_4 \cong -\frac{a_1}{b_1^2} + \frac{\sqrt{\tau_2 + 2N}}{b_1}. \quad (12)$$

Полученных оценок (10-12) достаточно, чтобы сформировать оптимальное управление (6) в квадратурах, и главное - найти в квадратурах выражение для функции риска F.

$$u_{1opt} = b_1 N \left[ \frac{\tau_1 m_1 + k\tau_3(x_3 + d)}{b_1^2 N^2} - x_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) x_2;$$

$$u_{2opt} = b_1 N q \left[ \frac{\tau_1 m_2 + k\tau_3(y_3 + d) - N(a_1 + b_1^2 \gamma_2) p}{b_1^2 N^2} - y_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) y_2, \quad (13)$$

где  $N = \frac{\sqrt{\tau_1 - k\tau_3}}{b_1}$ . (14)

Формулы (13) отличаются двумя особенностями. Во-первых, вдали от места сближения ВС сигнал управления  $u_1$  должен содержать разность  $(m_1 - x_1)$ , а  $u_2$  - разность  $(m_2 - x_1)$ , чтобы стремиться к заданной линии пути. Значит  $\frac{\tau_1}{b_1^2 N^2} = \frac{\tau_1}{\tau_1 - k\tau_3} \rightarrow 1$ , а этому соответствует малое значение  $k\tau_3 \ll \tau_1$  при  $\tau_1 > 1$ . Например, для  $\tau_1 = 10$  можно взять величину  $k\tau_3 = 1$ . Однако, во-вторых, в месте сближения ВС весовой коэффициент при разностях  $(x_3 + d - x_1)$  и  $(y_3 + d - y_1)$ , гарантирующих безопасное уклонение, будет равен  $\frac{k\tau_3}{\tau_1 - k\tau_3} = \frac{1}{9}$  и окажется весьма мал. Это произошло потому, что дробная функция штрафа (7) была нестрого заменена на степенной полином. Чтобы избежать этого недостатка, можно воспользоваться удачным приемом, использованным в [4] при "возвращении" вида дробной функции самому управлению с переменным коэффициентом при разностях  $(x_3 + d - x_1)$  и  $(y_3 + d - y_1)$ , возрастающим по мере уменьшения расстояния  $R$  между ВС

$$R = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2}$$

Тогда алгоритм оптимального управления выглядит так

$$u_{1opt} = b_1 N \left[ \frac{\tau_1}{b_1^2 N^2} m_1 + \frac{k\tau_3 \zeta(x_3 + d)}{b_1^2 N^2 (1 + \theta \frac{R^{2n}}{d^{2n}})} - x_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) x_2;$$

$$u_{2opt} = b_1 N \left[ \frac{\tau_1}{b_1^2 N^2} m_2 + \frac{k\tau_3 \zeta(y_3 + d)}{b_1^2 N^2 (1 + \theta \frac{R^{2n}}{d^{2n}})} - y_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) y_2,$$

где  $\theta$  и  $n$  - параметры, подчеркивающие разницу в штрафе в зависимости от относительной дальности  $\frac{R}{d}$  между судами, при этом для  $\theta > 1$  и  $u > 1$  эта разница увеличивается;  $\zeta$  - коэффициент, повышающий значимость дополнительного штрафа в месте сближения ВС.

В частности, если взять  $\zeta$  равным величине

$$\zeta = \frac{b_1^2 N^2 (1 + \theta)}{k \tau_3},$$

то в месте сближения при  $R = d$  у сигнала управления  $u_1$  появится слагаемое  $(x_3 + d - x_1)$ , а у  $u_2$  - слагаемое  $(y_3 + d - y_1)$ . Поэтому окончательно сигналы управления имеют вид

$$\begin{aligned} u_{1onm} &= b_1 N \left[ \frac{\tau_1}{b_1^2 N^2} m_1 + \frac{(1 + \theta)(x_3 + d)}{1 + \theta \left( \frac{R^2}{d^2} \right)^n} - x_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) x_2; \\ u_{2onm} &= b_1 N \left[ \frac{\tau_1}{b_1^2 N^2} m_2 + \frac{(1 + \theta)(y_3 + d)}{1 + \theta \left( \frac{R^2}{d^2} \right)^n} - y_1 \right] - \left( \sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a_1}{b_1} \right) y_2. \end{aligned} \quad (15)$$

### Формирование текущей функции риска для контроля безопасности сближения судов на пересекающихся курсах

Как было сказано выше, воспользуемся правой частью уравнения Беллмана (5) для вычисления функции риска  $F$ , для чего, кроме 9 найденных коэффициентов, необходимо доопределить коэффициенты  $\gamma_1, \gamma_3, \psi_{13}, \beta_1, \beta_3$ . Согласно уравнениям 9, 10 системы (9) величины их равны

$$\gamma_1 = \gamma_3 = N(a_1 + b_1^2 \gamma_2), \quad (16)$$

а значения  $\psi_{13} = 0$  в соответствии с уравнениями 13 и 14. Значения  $\beta_1$  и  $\beta_3$  определяются из уравнений 2 и 6

$$\beta_1 = \beta_2(a_1 + b_1^2 \gamma_2); \quad \beta_3 = \beta_4(a_1 + b_1^2 \gamma_2). \quad (17)$$

Подставив все оценки коэффициентов (10-12) и (16-17) в формулу для правой части уравнения (5), можно получить

$$F = f_0^* + [\beta_2 \gamma_2 b_1^2 + N b_1^2 \gamma_2 x_1 + (N - a_1 \gamma_2) x_2] x_2 + [\beta_4 \gamma_2 b_1^2 + N b_1^2 \gamma_2 y_1 + (N - a_1 \gamma_2) y_2] y_2 - \frac{u_{1onm}}{2} - \frac{u_{2onm}}{2}, \quad (18)$$

где  $N$  определяется по формуле (14);  $\beta_2$  и  $\beta_4$  - по формулам (11);  $\gamma_2$  - по формуле (12); значения  $u_{1onm}$  и  $u_{2onm}$  - по формулам (15), а величина  $f_0^*$  в соответствии с выражением (3) равна

$$f_0^* = \frac{\tau_1}{2} [(x_1 - m_1)^2 + (y_1 - m_2)^2] + \frac{\tau_2}{2} (x_2^2 + y_2^2) + \frac{\tau_3}{1 + k(x_1 + x_3 + d)^2 + k(y_1 + y_3 + d)^2}. \quad (19)$$

При этом координаты системы  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$  определяются из дифференциальных уравнений (1) и (2). Таким образом, полученных формул достаточно, чтобы в квадратурах определить зависимость функции риска  $F$  от координат состояния системы.

Необходимо заметить, что в формуле (18) управления  $u_1$  и  $u_2$  возводятся в квадрат и входят в функцию риска  $F$  со знаком минус аддитивно. Это означает, что при отсутствии принятых мер при  $u_1 = u_2 = 0$  функция текущего риска максимальна, при  $u_1 = u_{1onm}$  и  $u_2 = 0$  или  $u_1 = 0$  и  $u_2 = u_{onm}$  она снижается, а минимум риска возникает при координированном управлении движением двух судов при  $u_1 = u_{1onm}$  и  $u_2 = u_{2onm}$ , что соответствует физическому смыслу решаемой задачи.

### Результаты моделирования процесса управляемого сближения двух ВС

С помощью уравнений движения (1) и (2), алгоритма (15) оптимального управления ими в среде Matlab проводилось моделирование процессов сближения двух судов на пересекающихся курсах, как показано на рис. 2.

Моделирование движения производилось при следующих исходных данных:

$$m_1 = 40; m_2 = 100; a_1 = a_2 = c_2 = d_2 = 0,5; b_1 = b_2 = 0,1;$$

$$\tau_1 = 0,001; \tau_2 = 2; \tau_3 = 0,001; k = 0,001; d = 30; \theta = 0,2; n = 2;$$

$$f_3 = 0,001; p = 10; q = 10.$$

Начальные условия движения таковы, что при отсутствии бокового маневрирования оба ВС столкнутся в точке А

$$x_1(0) = m_1 = 40; x_2(0) = 0; x_3(0) = M = 40; y_1(0) = m_2 = 100; y_2(0) = 0; y_3(0) = 100.$$

Кроме того, ввиду движения встречного ВС 2 слева по отношению к ВС 1, оба осуществляют боковое движение в одном направлении – вправо.

Одновременно с процессом движения вычислялась функция текущего риска  $F$  по формуле (19), как показано на рис. 3.

Моделировалось два случая сближения судов – при управлении боковым движением только ВС 1 и при управлении обоими ВС 1 и 2. При этом в обоих случаях вычисляемая функция текущего риска сравнивалась с двумя порогами -  $F_{\min}$  и  $F_{\max}$ , показанными на рис. 3. Если  $F < F_{\min}$ , то дополнительное боковое маневрирование ВС не применяется вообще. Если  $F_{\min} < F < F_{\max}$ , то используется боковое движение одного ВС, а в случае  $F > F_{\max}$  необходимо маневрировать обоим ВС, либо менять скорости попутного движения.

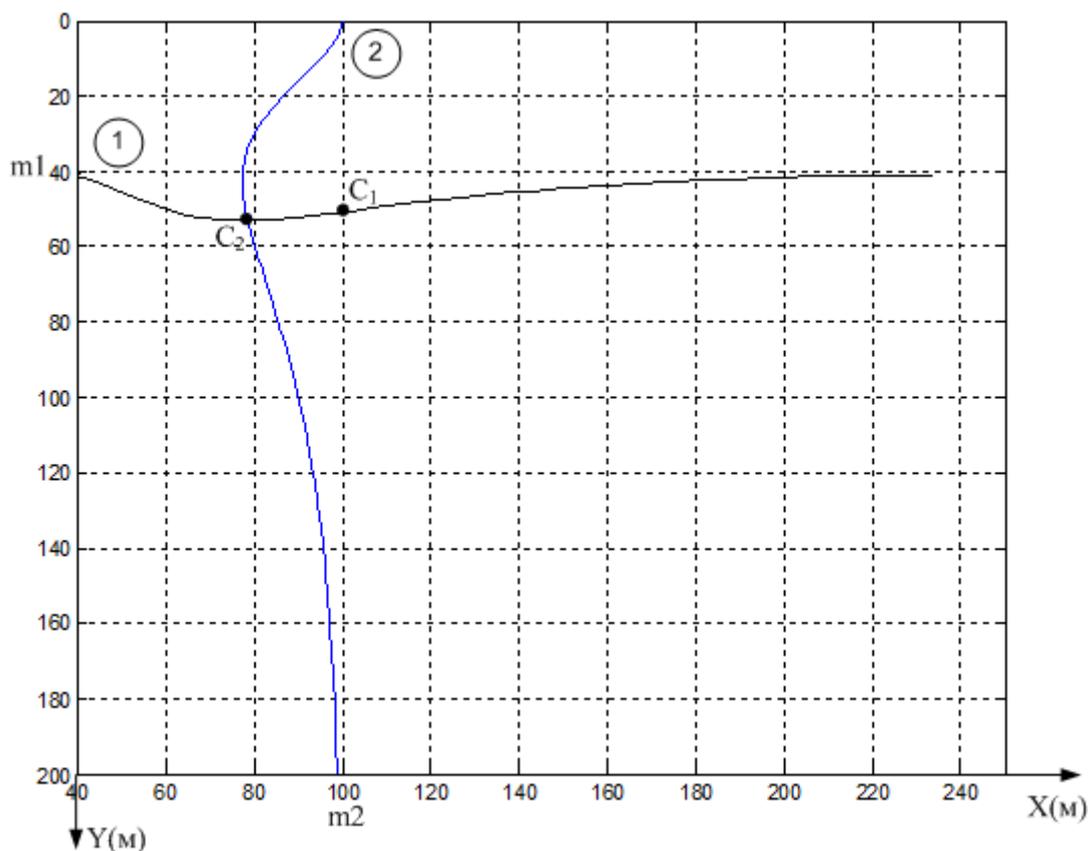
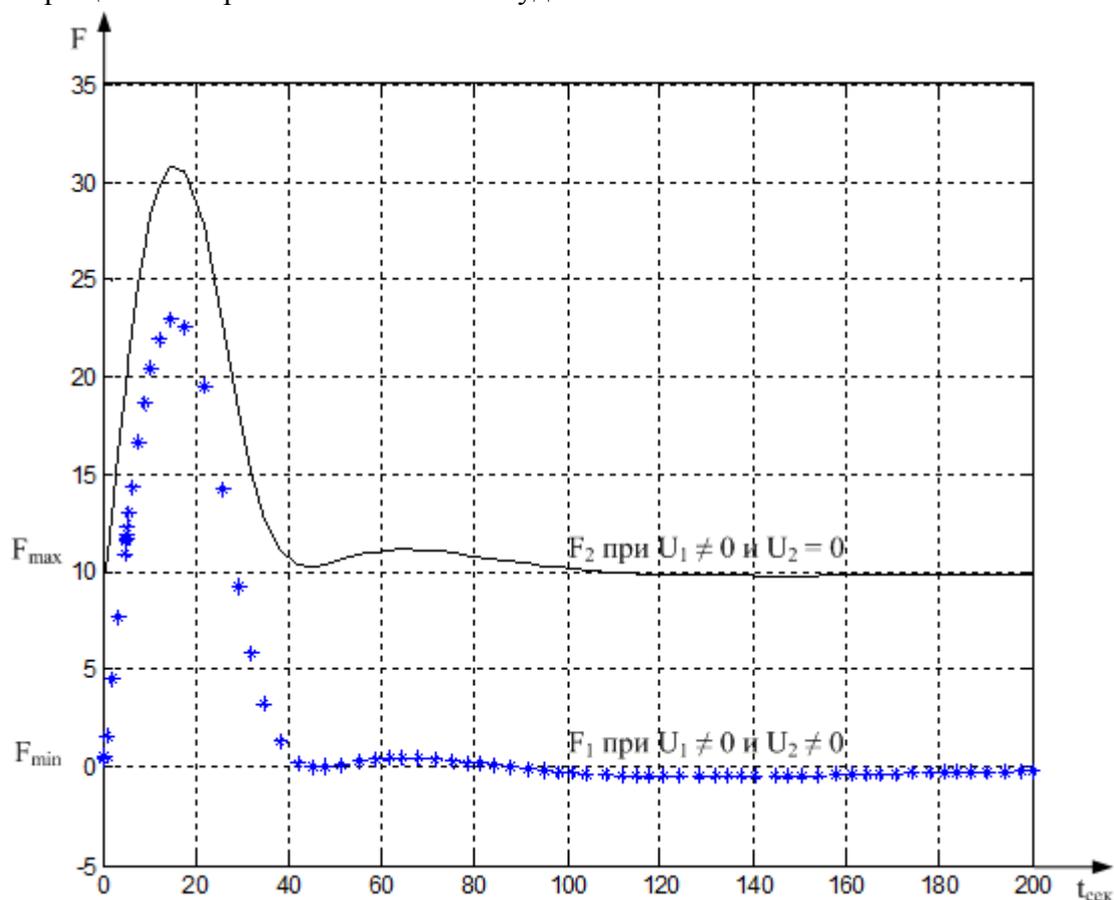


Рис. 2. Картина сближения двух ВС на пересекающихся под углом  $90^\circ$  курсах

В первом случае управления ВС 1 оказалось, что в новую точку встречи В воздушное судно 2 попадает в момент, когда ВС 1 находится в точке С, в результате чего расстояние между точками В и С получилось равным  $R = 15\text{ м}$ , что меньше заданной безопасной дистанции  $d = 30\text{ м}$ . Из графика соответствующей этому случаю функции риска  $F_1$  видно, что риск при  $t > t_2$  превышает порог  $F_{\max}$ , что также подтверждает необходимость принятия дополнительных мер обоими судами.

Во втором случае координированного управления боковым движением обоих ВС функция риска  $F_2$  превышает порог через время  $t = t_1$ , после чего оба ВС маневрируют вправо. В результате во вторую новую точку встречи D ВС 2 попадает в момент, когда ВС 1 находится в точке E. При этом расстояние между точками D и E получилось равным  $R = 35\text{ м} > d$ , что гарантирует безопасность движения.

Таким образом, контроль безопасности движения при сравнении функции риска  $F$  с различными порогами позволяет выбрать нужную альтернативу из каскада дополнительных мер по предотвращению аварийного сближения судов.



**Рис. 3.** Поведение функций текущего риска  $F_1$  и  $F_2$  при управлении одним ВС и двумя ВС при их сближении

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. С помощью оптимального синтеза сформирован алгоритм управления боковым движением двух ВС при их сближении на пересекающихся курсах. Показано, что в сигнале управления в качестве задающего воздействия по линейной координате бокового движения используется: вдали от места сближения - заданная линия пути, а в точке сближения – заданная безопасная дистанция между двумя ВС.

2. Найдено аналитическое выражение для вычисления функции текущего риска в виде степенного полинома второго порядка от координат движения и управляющих сигналов. Обнаружено прогнозируемое свойство снижения риска при увеличении числа дополнительных мер в зависимости от одновременного бокового маневрирования и изменения попутной скорости.

3. Сравнение вычисляемой функции риска с заданными порогами позволяет выбрать нужную группу предупредительных мер, гарантирующих безопасность сближения ВС.

4. При контроле безопасности использовалась модель бокового движения судна, описываемая системой дифференциальных уравнений второго порядка, однако при синтезе самого управления необходимо использовать в предстоящих исследованиях модель более высокого порядка.

5. Необходимо уточнить решение задачи безопасного управляемого движения двух ВС на пересекающихся курсах под углом, неравным  $90^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беллман Р. Динамическое программирование. - М.: ИИЛ, 1961.
2. Лебедев Г.Н. и др. Теория оптимальных систем. - М.: МАИ, 1993.
3. Лётов А.М. Динамика полета и управления. - М.: Наука, 1964.
4. Лебедев Г.Н., Чан Ван Туен, Китаев А.Н. Совместное управление и контроль безопасности полета воздушных судов при их сближении. - М.: МАИ, 2011. - Т. 18. - № 3. - С. 29-35.
5. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Чан Ван Туен Решение задачи динамического программирования при безопасном попутном движении воздушных судов // Труды МАИ. - 2012. - № 54.
6. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Хахулин Г.Ф., Малыгин В.Б. Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 12. - С. 50-55.

#### AUTOMATIC CONTROL OF THE SECURITY APPROACH OF TWO CONTROLLED AIR OR SEA VESSELS CROSSING THEIR ROUTES

Zaw Min Htike, Vu Xuan Huong, Zaitsev A.B., Tin Phone Kyaw

The problem of automatic control of convergence of vessels on crossing routes. A method for calculating the risk function of collision based on dynamic programming, which allows us to formulate alarms for taking precautionary measures to control the lateral and longitudinal movement.

**Key words:** security control, optimal control, aircraft, dynamic programming, the risk function.

#### Сведения об авторах

**Зо Мин Тайк**, 1985 г.р., окончил МАИ (2011), аспирант МАИ, автор 3 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

**Ву Суан Хыонг**, 1984 г.р., окончил МАИ (2011), аспирант МАИ, автор 3 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

**Зайцев Александр Владимирович**, 1956 г.р., окончил Серпуховское высшее военное командное училище (1979), доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления МАИ, автор более 60 научных работ, область научных интересов – система управления летательных аппаратов и системы искусственного интеллекта.

**Тин Пхон Чжо**, 1978 г.р., окончил МАИ (2007), кандидат технических наук, докторант МАИ, автор 18 научных работ, область научных интересов – методы оптимального управления.

УДК 629.735.015:681.3

## МЕТОД УСКОРЕНИЯ ПОИСКА ДАННЫХ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АЭРОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Е.С. ПЛАТОНОВА, Л.Е. РУДЕЛЬСОН, А.И. СТЕПАНОВА

Рассмотрен подход к задаче ускорения поиска аэронавигационной информации, основанный на известных механизмах образного мышления. Сформулировано понятие компьютерного информационного образа как совокупности характеристик (свойств) объекта поиска, объединяющей в своем составе все его ключевые параметры, оцениваемые или кодируемые количественно. Рассмотрена алгоритмическая схема метода многокритериального поиска данных на основе обсуждаемого подхода. Приведен пример использования.

**Ключевые слова:** аэронавигационная информация, информационный образ, записи базы данных.

### Введение

Одной из приоритетных задач реформирования Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) России признана [1-3] модернизация существующей структуры доступа к аэронавигационной информации (АНИ), переход от службы АНИ (САИ) к системе управления АНИ. Недостатки действующей САИ состоят в следующем [1]:

- существующие службы аэронавигационной информации разобщены по ведомственному принципу, что затрудняет оперативный доступ пользователей к требуемой аэронавигационной информации;
- практически отсутствует контроль качества предоставляемой АНИ;
- не организована сертификация в области сбора, обработки хранения и распространения АНИ, а также проведение экспертной оценки безопасности изменений, вносимых в структуру воздушного пространства;
- отсутствует единый государственный банк аэронавигационных данных;
- не обеспечен переход к технологии сбора, обработки, хранения и распространения АНИ в электронном виде.

С целью устранения перечисленных проблем намечены следующие мероприятия:

- сформировать единую структуру многоуровневой подсистемы обеспечения АНИ в России, предусматривающей создание государственных организаций, осуществляющих сбор, обработку, хранение и распространение АНИ на федеральном и региональном уровнях;
- разработать программное обеспечение (с последующей сертификацией) для автоматизированной системы сбора, обработки, хранения и распространения государственной АНИ, позволяющее потребителям работать в едином формате и осуществлять обмен ею в электронном виде; внедрить систему качества (менеджмента) в систему обработки АНИ, совершенствовать процедуры и процессы управления качеством на каждой функциональной стадии обработки аэронавигационных данных от аэропорта через предприятия, осуществляющие деятельность в области АНИ, до потребителя;
- создать корпоративную электронную сеть для функционирования автоматизированной системы сбора, обработки, хранения и распространения АНИ;
- создать федеральную электронную базу данных АНИ (БАИ);
- осуществлять контроль качества вносимых в структуру воздушного пространства изменений до их опубликования в государственных документах АНИ;
- совершенствовать порядок организации обеспечения АНИ пользователей воздушного пространства, с учетом Стандартов и Рекомендуемой практики ИКАО;
- разработать концепцию развития системы обеспечения аэронавигационной информацией в свете внедрения программы CNS/ATM в отечественную практику;

- разработать порядок обеспечения государственной аэронавигационной информацией пользователей воздушного пространства, осуществляющих свою деятельность при уведомительном порядке использования воздушного пространства;
- публиковать государственную аэронавигационную информацию в Сборнике аэронавигационной информации (АИП России) в формате, соответствующем Стандартам и Рекомендуемой практике ИКАО. При этом государственная аэронавигационная информация на региональном уровне должна публиковаться в соответствующих документах АНИ.

В технических проектах БАИ и автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства корпоративная сеть сбора, обработки, хранения и распространения АНИ сводится либо к схемам удаленного доступа, либо к принципам поиска данных в Интернете [4; 5]. Оба подхода характеризуются позитивными и негативными качествами. Общим недостатком является неоднозначность результатов поиска. В ответ на запрос предлагаются избыточные данные, разбираться в которых приходится пользователю. Обратимся в Интернет с запросом: *«нарезка секторов районного центра (РЦ) Иркутск»*. Яндекс выдаст нам 194 тысячи ответов, среди которых на первом месте не интересующая нас секторизация районного центра обслуживания воздушного движения, а *«Иркутский областной центр по профилактике и борьбе со СПИДом... диагностический центр, услуги и цены»*, *«о работе Иркутского областного комитета «Электропрофсоюз»*, *«Ремонт ноутбуков ASUS официальный сервисный центр Иркутск...»*, *«"Тойота центр Иркутск" – автосалон...»*.

Если же попытаться уточнить запрос, указывая дополнительные ключевые слова, например: *«нарезка секторов районного центра управления воздушным движением Иркутск»*, то мы достигнем обратной реакции, и число ответов возрастет до 270 тысяч, т.е. каждое уточнение критериев поиска не отсеивает ненужные данные, а наоборот, порождает лавину новой избыточности. Теперь в числе первых ответов получаем: *«Оборудование для захвата и трансляции сигналов VGA, DVI с радарных станций»*, *«ГС РЦ ЕС ОрВД – гражданский сектор районного центра Единой системы организации воздушного движения»*, *«Московский центр автоматизированного управления воздушным движением является крупнейшим в России...»*, *«Областное управление социальной защиты населения Иркутской обл...»*, *«Ленинский районный суд переехал по адресу: г. Иркутск, ул. Байкальская...»* и т.д.

Разработчики поисковых систем сознательно стремятся не пропустить информацию, хотя бы косвенно относящуюся к полученному запросу, и достигают негативный результат.

Для преодоления подобных затруднений в масштабах всемирной паутины предложена концепция «семантического веба» [6], которая основана на логико-лингвистическом анализе текста запроса. Сопоставление ключевых свойств, профессиональных интересов автора запроса и других характеристик позволяет исключить из поиска карты Иркутского центра ЕС ОрВД посторонние данные (о борьбе со СПИДом, автосалоне и т.д.) однако проблема не решается кардинально. Для человека не важно, выдают ему миллионы ответов или, например, 1440 (количество минут в сутках), потому что ни то, ни другое он не в состоянии воспринять в приемлемое в сложившейся ситуации время. Нужен новый подход к проблеме.

В данной статье обсуждается подход, основанный на известных [7] механизмах образного мышления, свойственного человеку и высшим животным. Согласно прогнозам аналитиков [8], быстродействие и объем памяти компьютеров достигнут уровня показателей человеческого мозга к тридцатым годам текущего столетия. Следует быть готовыми к использованию в компьютерных алгоритмах механизмов ассоциативной обработки информации, сосредоточенной в чувственных образах, и попытаться перенести их в информатику. Назовем компьютерным информационным образом (ИО) совокупность признаков (атрибутов) объекта поиска, объединяющую в своем составе все его ключевые параметры, оцениваемые (или кодируемые) количественно. Рассмотрим схему метода поиска на основе ИО.

## 1. Требования к компьютерному информационному образу и его реализация

Известно, что языки запросов к базам данных (БД) построены на законах аристотелевой логики и позволяют легко найти правильный ответ. Однако заимствовать их схему для общения с непрофессиональным пользователем информационной сети нерационально, потому что неподготовленный человек не умеет задавать вопросы однозначно. Наглядный пример, приведенный автором работы [7]: словосочетание «я встретил ее на поляне с цветами». Смысл фразы понятен только говорящему, он визуально представляет себе образ и преобразует его в слова. Слушатели заняты обратным преобразованием слов в мысленный образ. Ребенок увидит говорящего на пестрящей одуванчиками лужайке, мама представит собеседника с охапкой цветов, бабушка вспомнит аромат букетика в собственных руках. Поискковые машины устроены так, чтобы представить все возможные варианты толкования текста.

В разговоре, как правило, удается прийти к взаимопониманию, потому что человек учитывает контекст, интонации, мимику и свой опыт (информацию о предмете обсуждения и о стиле изложения рассказчика). Преобразование его речи в новое знание происходит с помощью ассоциативной обработки его высказываний, результаты которой фиксируются в виде чувственного образа – совокупности зрительных, слуховых и других ощущений и реакций, вызываемых ими. Еще недавно ограниченность быстродействия и памяти компьютера тормозили использование методов образного мышления и ассоциативной памяти, хотя оба термина (в компьютерной сфере) появились еще на заре вычислительной техники. Для построения и анализа ИО больших массивов данных у ЭВМ не хватало места и быстродействия.

В качестве хранилищ данных обычно используют файлы записей, а для доступа к ним – реляционные и сетевые ссылочные механизмы. Типичный запрос к БД: «*выбрать из таблицы все записи, удовлетворяющие значениям: ключ 1 в диапазоне Д1, ключ 2 в диапазоне Д2, ... , ключ N в диапазоне ДN*» преобразуют в процедуру просмотра всех записей с анализом значения каждого ключа, и все записи, удовлетворяющие заданным значениям ключей, выдают пользователю (например, список самолетов, для которых аэродром базирования расположен на территории Ростовского укрупненного центра ЕС ОрВД, имеющих крейсерскую скорость в пределах 800-1000 км/ч, крейсерский эшелон 8100-11000 м, налет 500-900 ч и т.д.).

Для реализации требуемых характеристик ИО (нарезки секторов Иркутского РЦ в примере, приведенном выше) необходимо располагать такими формами представления данных в компьютерной памяти, которые обеспечили бы своевременность их обновления по результатам обработки радионавигационных измерений, сообщений по управлению воздушным движением, метеорологической информации, вводов диспетчеров. Это вопросы сортировки и поиска, теории множеств, оптимального управления. Важнейшее качество метода поиска данных на основе ИО – единая схема локализации места в компьютерной памяти, в котором должна находиться искомая запись. В момент фиксации данных алгоритм сортировки преобразует содержимое ключевых полей вводимой записи в адрес, по которому она должна размещаться. Если в процессе деятельности БАИ накапливаются несколько записей с одинаковым адресом размещения, то они образуют сцепленный список синонимов, так как содержат одну и ту же ассоциацию с объектом хранения. Далее, в момент запроса пользователя к БАИ, алгоритм поиска преобразует (вычисляет) запрос в тот же самый адрес памяти и выдает пользователю все, что накоплено в БД по вычисленной ассоциации. Существо предложения состоит в том, чтобы не просматривать файлы записей в поисках совпадения ключевых слов запроса, а вычислять адрес, по которому только и можно отыскать нужные данные (или сцепленный список родственных данных). Нужна лишь подходящая форма представления ИО.

Такая форма существует в статистике. Это гистограмма распределения результатов наблюдений. Каждый элемент каждого столбца гистограммы говорит о частных особенностях элементов АНИ. Ее огибающая – функция распределения – описывает общие закономерности, создавая новые возможности поиска, предсказания и манипулирования данными.

## 2. Механизмы образного мышления

Перечисленные свойства проявляются как следствие ассоциативного характера внутренних связей предложенной формы представления. Рост количества записей о структуре и состоянии системы управления воздушным движением порождает новые качества, присущие большим массивам: информация приобретает частотные закономерности, повторяемость величин, позволяющие манипулировать данными на нижнем (числовом) уровне. На образы можно накладывать любую известную модель данных. Для нее элементы записей (атрибуты) представляются абстрактными номерами, расставленными в столбцы гистограмм распределения. Накопление статистики хорошо согласуется с физической природой задач навигации, планирования и обслуживания полетов, связанных с измерениями и прогнозами. Композиция частотных моделей (в частности, гистограмм распределения атрибутов), названная в [9] информационным образом полетных данных, аналогично чувственному образу (например, зрительному), может воспроизводить такие важные механизмы образного мышления [7], как:

- *конденсация*, или построение обобщенного, лишённого индивидуальных особенностей типового «портрета» объектов одного класса (образы моря, гор, расы, самолета);
- обратный механизм *карикатуры*, или подчеркивание особенностей конкретного экземпляра (двуглавая вершина, желтое море, чернокожий скандинав, аэробус);
- *смещение*, т.е. исключение из рассмотрения в процессе принятия решения моментов, имеющих отрицательную характеристику (количественный показатель или эмоциональную окраску – страх, стыд, другие социальные мотивы), либо придание чрезмерного веса положительно оцененным атрибутам;
- *классификация* или нахождение сходства и различия;
- *гармонизация* или обнаружение в совокупности данных симметрии (зеркальности), ритма (повторяемости величин), соразмерности частей целому и т.д.

В приложении к задачам управления данными и принятия решений эти механизмы обеспечиваются важнейшими процессами манипулирования:

- сортировкой – как средством создания и квазинепрерывного обновления информационного образа (ИО) в виде гистограмм прогнозов или результатов наблюдений;
- многомерным поиском – как средством нахождения индивидуальных черт, сходства и различия в столбцах, построенных и обновляемых гистограмм ИО;
- надстройкой над ИО рельефа правдоподобия, допускающего взвешивание составляющих, – как инструмента принятия решения при запросе по многим ключам;
- формированием поверхности невязки – как инструментом для выработки рекомендаций по направлению отбора данных;
- оперативным регулированием шага квантования числовой оси, лежащей в основании каждой гистограммы, – как средством:
  - изменения вида огибающей распределения при поиске повторяемости, симметрии, соразмерности элементов гистограммы;
  - управления достижимостью (длиной пути доступа) к данным – с помощью перераспределения между соседними столбцами гистограммы их содержимого.

Реализация механизмов образного мышления позволяет принимать решения на основе аналогий и сопоставления общих свойств анализируемого запроса. Соответственно она должна базироваться на использовании наиболее общих свойств числовой информации, важнейшее из которых – величина числа. Именно эта характеристика должна управлять обратной связью для оптимизации основных процессов манипулирования данными – сортировки и поиска. В существующих БД этот принцип используется лишь косвенно, без сопутствующих количественных (например, энтропийных) измерений. Известные схемы управления данными построены на моделях логического вывода. Для работы с ИО созданы дополняющие их технологии, позволяю-

щие отыскивать решения без прямого использования дедуктивных или индуктивных схем. Логические цепочки «вытесняются» в ассоциативную структуру упаковки данных, уже при формировании «выстроенных» по принципам «от целого к частному» или «от единичного к общему». Это позволяет свести итерационные процедуры выбора решений к одношаговым актам, поиск – к простому перечислению искомого, а потребности в компьютерных ресурсах – к заранее вычисляемому минимуму.

Достигается указанный эффект благодаря совместному использованию логики современных систем управления БД с механизмами принятия решений на ИО. Образы рассматриваются как частотные модели, все понятия которых (типы, структуры, ограничения, операции) интерпретируются терминами, предикатами и функциями нумерации; как эффективные инструменты управления данными и принятия решений; как адаптивные средства вывода знаний. Принципы работы с ИО опираются на очевидный факт: конечный результат всегда в том или ином виде заложен в исходной информации, всегда от нее зависит. Для его достижения в науке используется логический вывод (доказательство). Но если данные сгруппированы в адекватное задаче отображение, то решение (знание) можно извлечь единичным актом обнаружения. Абстрактные ИО, наследующие свойства чувственных образов, могут адаптироваться к приложениям инструментальными средствами, что повышает качество их сопровождения, расширяет класс процессов автоматизированного принятия решений и формирования опытного знания, распространяя его на задачи управления АНИ и ОрВД.

### 3. Пример реализации ассоциативного списка записей синонимов

Пусть таблица БД содержит сведения о воздушных судах (ВС), пролетающих над ПОД – бортовой номер, ведомственную принадлежность, тип ВС, высота пролета и т.п. (табл. 1). Каждая строка таблицы образует запись БД. Процесс формирования ассоциативной цепи синонимов рассмотрим на сортировке по атрибуту высоты (табл. 2). Пределы изменения величины составляют  $[0,9]$ . Следовательно, для сортировки достаточна ось, содержащая десять четырехразрядных двоичных чисел. На первом шаге образуются частичные цепи номеров записей, содержащих равновеликие атрибуты высоты пролета.

Таблица 1 Исходные записи базы данных примера							Таблица 2 Значения атрибута высоты в записях									
N п/п	№ борта	ГА или ВВС	Трасса следования	Расчетное время	Тип ВС	Высота (тыс.м.)										
1	85665	0	1	03:22	Ту-154	3										
2	42242	0	4	05:07	Як-42	1										
3	65902	0	3	05:12	Ту-134	4										
4	65112	0	4	05:47	Ту-134	1										
5	85412	0	2	06:06	Ту-154	5										
6	86145	1	5	07:34	Ил-86	9										
7	SAS124	0	1	08:20	Sesna	2										
8	BA443	0	2	08:24	A319	6										
9	96002	1	-	09:03	Ил-96	5										
10	85777	0	3	09:25	Ту-154	3										
11	65056	0	2	09:41	Ту-134	5										
12	42622	0	5	10:00	Як-42	8										
13	86584	0	5	10:06	Ил-86	9										
14	IRA232	0	2	11:19	B-707	7										
15	05	1	-	11:43	Ту-160	9										
16	GBNWX	0	1	11:59	A319	3										
17	64026	0	1	12:24	Ту-204	2										
18	76380	1	1	12:55	Ил-76	3										
19	VPBAY	0	5	13:33	B-737	8										
20	85604	0	3	14:41	Ту-154	4										
21	14003	1	2	15:29	Ан-140	6										
22	65177	0	1	18:12	Ту-134	2										
23	42442	0	2	18:46	Як-42	6										
24	85808	0	3	19:20	Ту-154	4										
25	85505	0	3	19:48	Ту-154	3										

номер записи	1	2	3	4	5	6	7														
значение высоты	3	1	4	1	5	9	2														
								7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
								2	6	5	3	5	8	9	7	9	3	2			
															19	20	21	22	23	24	25
															8	4	6	2	6	4	3

Ни одна запись не содержит нулевой высоты пролета. Соответственно, в результате сортировки не образована ни одна частичная цепь с нулевым значением высоты (рис. 1).

Ассоциативная цепь номеров записей с единичным значением высоты пролета начинается в первом (по адресу, равному единице) дискрете оси. Начальное звено частичной цепи единичного (1000 м) значения высоты пролета указывает на четвертую запись БД, содержащую в качестве атрибута единицу, и кроме того, адрес следующего звена частичной цепи, размещенный в поле указателя.

В приведенном примере содержимое поля указателя четвертой записи равно двум. Это означает, что единичное значение высоты, кроме четвертой, содержится и во второй записи. Содержимое поля указателя второй записи равно нулю. Следовательно, в БД больше нет записей, атрибут высоты которых равен единице.

Возвращаясь к просмотру числовой оси, производим обращение ко второму ее дискрету. Его содержимое равно 22. Очевидно, что начальное звено частичной цепи номеров записей, величина атрибута высоты пролета в которых равна двум, расположено в двадцать второй записи. Следующее звено адресует теперь полем указателя этой записи, содержащим число 17. Это значит, что в семнадцатой записи зафиксирован атрибут высоты, равный 2, а в поле указателя – адрес следующего звена частичной цепи, равный (рис. 1) семи. В седьмой записи (ср. с табл. 1, 2) также содержится атрибут высоты, равный двум. Однако поле указателя в ней не заполнено, что соответствует окончанию частичной цепи номеров записей, имеющих равные двум атрибутам высоты пролета.

Обращаясь к третьему дискрету числовой оси, алгоритм входит в ассоциативную цепь номеров записей, атрибуты высоты пролета которых равны трем. Начальное звено указывает на двадцать пятую запись. Из нее осуществляется переход в восемнадцатую, затем – в шестнадцатую (дальнейший путь на рис. 1 не помечен стрелками вследствие непланарности получаемого графа и прослеживается умозрительно), далее – в десятую и, наконец, в первую, поле указателя которой хранит нулевой адрес. Четвертый дискрет порождает элементарную ассоциативную цепь номеров записей, содержащих атрибут высоты, равный четырем, и включающий в себя (в порядке следования по цепи) номера двадцать четвертый, двадцатый и третий (последний путь не указан вследствие непланарности иллюстрации). Продолжение просмотра числовой оси (входного индекса) позволяет построить следующую совокупность частичных цепей, каждая из которых содержит в качестве звеньев указывающие один на другой номера записей, имеющих равные по величине атрибуты:

- с атрибутом, равным нулю – цепь отсутствует;
- с атрибутом, равным единице: 4→2;
- с атрибутом, равным двум: 22→17→7;
- с атрибутом, равным трем: 25→18→16→10→1;
- с атрибутом, равным четырем: 24→20→3;
- с атрибутом, равным пяти: 11→9→5;
- с атрибутом, равным шести: 23→21→8;
- с атрибутом, равным семи: 14 (однозвенная);
- с атрибутом, равным восьми: 19→12;
- с атрибутом, равным девяти: 15→13→6.

Как уже отмечено, начальные звенья цепи фиксируются в процессе сортировки на числовой оси в дискретах, номера которых равны по величине значению атрибута, по которому

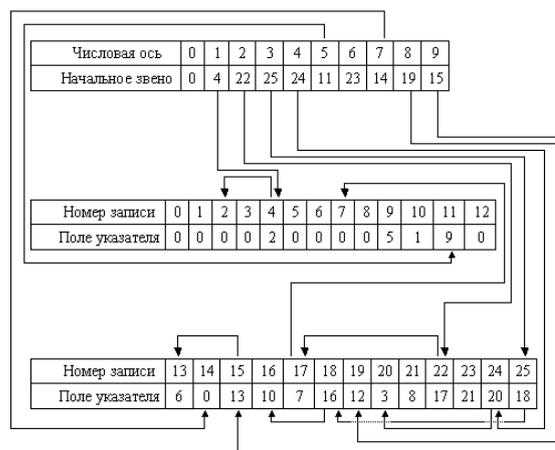
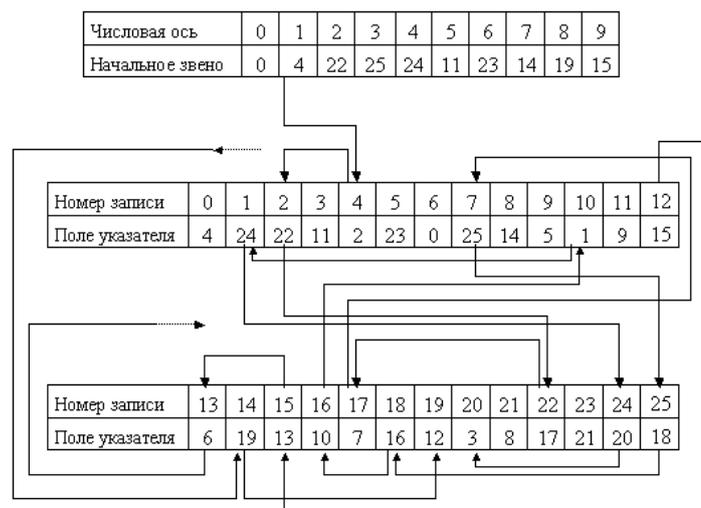


Рис. 1. Сцепленный список указателей адресов записей (ассоциация с высотой)

сформирована частичная цепь. Это обстоятельство и позволяет использовать ее в качестве входного индекса поиска номеров записей по заданным значениям атрибута. Для образования единой цепи номеров записей производится второй шаг, на котором заполняются разрывы между частичными цепями, соответствующие переходам от одной величины атрибута к другой. Начало единой цепи может либо выноситься в заголовок мультисписка, либо обнаруживаться программно как первый встреченный значащий дискрет индекса. Окончание цепи устанавливается фактом отсутствия значащих дискретов на оси. Другим ограничением служит количество записей базы данных.

Единая цепь построена на рис. 2. Вследствие непланарности, сформированный на ней граф представлен лишь подмножеством дуг, связывающих номера сцепленных записей.



**Рис. 2.** Ассоциативная цепь номеров записей, сортированных по неубыванию атрибутов

мере расстановки в полях указателей адресов, а на числовой оси с вводом каждого нового числа фиксируются их номера в порядке поступления записей, содержащих равновеликие атрибуты. В результате числовая ось становится входным индексом поиска, указывающим адреса частичных цепей равновеликих атрибутов, а частичные цепи, порождаемые дискретами индекса, последовательно адресуют поиск записей, содержащих такие равновеликие атрибуты. Процесс сцепления порядковых номеров записей, сортированных непосредственной расстановкой, протекает по обычной схеме.

Отметим, что сцепленные номера записей обладают двумя свойствами. Каждый из них является указателем адреса или порядкового номера исходной записи в информационном пространстве БД, атрибут которой согласно его величине должен находиться в данном месте сортированной последовательности. Одновременно он является указателем следующего звена цепи, которое, в свою очередь, становится ссылкой как на порядковый номер связанной с ней записи, атрибут которой соответствует очередному числу сортированной последовательности, так и на последующее звено цепи указателей. Этот эффект достигается за счет вынесения начального элемента цепи в дискрет входного индекса поиска и последующим сдвигом всей совокупности номеров записей в полях указателей адресов предшествующих звеньев. Аналогично каждая элементарная цепь:

- начинается номером записи, вынесенным в поле индекса, соответствующее величине атрибута, содержащегося в этой записи;
- продолжается номерами, зафиксированными в полях указателей записей, содержащих равновеликие атрибуты;
- заканчивается записью, в поле указателя которой сохранилось исходное нулевое (или специально оговоренное) значение.

Каждое звено сформированной цепи представляет собой номер записи в исходной последовательности, сортированной в порядке монотонного изменения неповторяющегося по величине атрибута. Если же несколько записей содержат равновеликие значения одноименных атрибутов, то возникает необходимость ввести в цепь несколько «одинаковых звеньев». Ассоциативная цепь номеров записей, содержащих равновеликие атрибуты, названа частичной, или элементарной цепью. Тогда единая (результатирующая) цепь образуется как совокупность частичных цепей, однозвенных и многозвенных. Операции формирования единой цепи производятся при вводе записей. Частичные цепи наращиваются по

Компьютерная реализация поиска на ИО использовалась в проекте КСА УВД.

### Заключение

Обсуждается метод поиска по многим ключам, основанный на известных механизмах образного мышления. Обработка запроса к БД начинается с построения компьютерного образа искомой записи как совокупности ее ключевых характеристик. Образ создается как хорошо зарекомендовавшая форма представления результатов исследования – гистограмма распределения измеренных данных. Столбцы гистограммы с максимальными значениями высоты рассматриваются как наиболее вероятные номера искомых записей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Аэронавигационного совета (Коллегии) № 2 от 12.09.07. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.svavia.ru/info/lib/fana1.html>.
2. О концепции федеральной целевой программы «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009 – 2015 годы): распоряжение Правительства РФ № 1974-р от 29.12.2007. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.referent.ru/1/116187>.
3. О Федеральной аэронавигационной службе: Указ Президента РФ от 05.09.2005 № 1049 (ред. от 12.05.2008). [Электронный ресурс]. URL: [www.referent.ru/1/111632](http://www.referent.ru/1/111632).
4. Габейдулин Р.Х., Горячев Д.И., Зубкова И.Ф., Мучинский А.В. Реализация дистанционной функции анализа данных по использованию воздушного пространства // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2012. - № 184.
5. ОАО «НТЦ «ПРОМТЕХАЭРО»: О ходе работ по созданию Единой системы планирования использования воздушного пространства РФ // Вестник авиации и космонавтики. - 2011. - № 5.
6. Шепелев В.А. Ахиллесова пята семантического веба // Компьютерра, № 25-26, 2008. [Электронный ресурс]. URL: <http://old.computerra.ru/Authors/192760/>
7. Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. - М.: Радио и связь, 1989.
8. Kurzweil R. Singularity is Near. - N-Y.: Viking Press, 2005.
9. Бабаева С.И., Привалов А.А., Рудельсон Л.Е. Элементы концепции централизованного планирования полетов // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2005. - № 5.

### ACCELERATION METHOD FOR DATA SEARCH IN A SYSTEM OF AERONAUTICAL INFORMATION MANAGEMENT

Platonova E.S., Rudelson L.E., Stepanova A.I.

An approach to the problem of accelerating the search aeronautical information, based on the known mechanisms of creative thinking is discussed. The notion «image of computer information» is defined as a set of characteristics (properties) of the object of search, which contains together all of its key parameters that are measured quantitatively or encoded. The algorithmic scheme for the multicriteria search data based on this approach is considered.

**Key words:** aeronautical information, image information, a database record.

### Сведения об авторах

**Платонова Екатерина Сергеевна**, окончила Ульяновское высшее авиационное училище (2004), аспирантка МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – методы планирования использования воздушного пространства.

**Рудельсон Лев Ефимович**, 1944 г.р., окончил МЭИ (1968), доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, автор более 170 научных работ, область научных интересов – программное обеспечение автоматизированных систем организации воздушного движения.

**Степанова Александра Илгизовна**, окончила МГТУ ГА (2012), аспирантка МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – методы планирования использования воздушного пространства.

УДК 629.735.015:681.3

## АЛГОРИТМЫ МАНИПУЛИРОВАНИЯ АЭРОНАВИГАЦИОННЫМИ ДАННЫМИ НА КОМПЬЮТЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗАХ

И.Ю. АГАФОНОВА, Л.Е. РУДЕЛЬСОН

Рассмотрены алгоритмы построения предиката поиска в системе управления аэронавигационной информацией. Сформулировано понятие компьютерного информационного образа как совокупности характеристик (свойств) объекта поиска, объединяющей в своем составе все его ключевые параметры, оцениваемые или кодируемые количественно. Рассмотрена алгоритмическая схема ввода, вызова и корректировки данных на основе обсуждаемого подхода. Приведен пример использования.

**Ключевые слова:** аэронавигационная информация, информационный образ, записи базы данных.

### Введение

Известно [1], что основными задачами управления БД являются ввод, индивидуальный или групповой вывод, внесение изменений и удаление записей. При сортировке на основе компьютерных информационных образов (ИО) [2] в качестве индексов поиска используются числовые оси, содержащие начальные элементы ассоциативных частичных цепей с порядковыми номерами записей-синонимов, имеющих равновеликие атрибуты. Дискреты числовых осей каждого атрибута (т.е. поля индексов поиска) своими значениями (начальными звеньями) порождают частичные цепи (ассоциации), которые объединяются с помощью переноса в конечное звено каждой частичной цепи начального звена последующей частичной цепи. В процессе формирования единой ассоциативной цепи сначала строятся частичные цепи. Затем в конечные звенья частичных цепей, сохраняющие нулевое содержимое, переносится с числовой оси, из ближайшего в направлении просмотра значащего дискрета, начальное звено последующей частичной цепи.

### 1. Постановка задачи

Отправным пунктом методики построения ИО полетной информации становится содержательная постановка задачи, для решения которой развертываются автоматизированные системы (АС) управления воздушным движением (УВД): обеспечение необходимого уровня безопасности полетов при ограничениях на их экономичность и регулярность [3]. Целевой критерий безопасности, как правило, представляется аддитивно-мультипликативным выражением, связывающим вероятности потери целостности наземного, самолетного и спутникового сегментов системы. Его величина устанавливается из рекомендаций международной организации гражданской авиации как допустимый уровень вероятности летного происшествия. Ограничения по регулярности и экономичности учитываются на этапах планирования использования воздушного пространства (ИВП) с учетом метеорологических прогнозов. В соответствии с назначением АС УВД, для программной поддержки технологии работы диспетчера УВД необходимо не только создать ИО полетной информации как композицию гистограмм распределения почасовой загрузки элементов ВП, но и обеспечить оперативный доступ к описаниям в базе данных (БД) каждого участника движения – воздушного судна (ВС). Это означает, что столбцы каждой гистограммы должны заполняться не просто «меткой» очередного ВС, затрагивающего данный элемент ВП, а меткой-указателем адреса хра-

нения информации о выполняемом рейсе. В результате ИО, помимо общего представления загрузки ВП, становится предикатом доступа к записям БД. Устанавливается обратная связь между характеристиками распределения загрузки ВП и подробным описанием каждого ВС. Основания гистограмм разделены на часовые интервалы в пределах суток, и нетрудно найти столбцы, соответствующие времени пролета любого элемента ВП. Несколько сложнее определить место метки ВС внутри столбца, упорядочивая хронологическую последовательность меток внутри выбранного часа.

Допустим для наглядности, что среди  $N$  сортируемых меток нет ни одной, принадлежащих одному часу суток в гистограмме любого элемента ВП. В дальнейшем это ограничение снимается. Тогда для установления обратной связи между ИО полетной информации и адресом хранения записи о ВС достаточно упаковывать в основания гистограмм порядковые номера записей в БД. По окончании ввода  $N$  описаний ВС будут сформированы совокупности ненулевых значений осей гистограмм тех элементов ВП, которые были затронуты рейсами  $N$  анализируемых ВС. Значение часовые интервалы, соответствующие наличию ВС, перемежаются нулевыми, соответствующими тем часам суток, в которые данный элемент ВП не затрагивался ни одним рейсом. Полученный результат позволяет по каждому элементу ВП – аэродромам, пунктам обязательных донесений (ПОД), секторам, районам, затрагиваемым рейсами, построить список порядковых номеров (меток ВС), сортированный по монотонному изменению значений времени пролета. Совокупность списков по всем элементам ВП образует мультисписок поиска записей в БД, который становится упорядоченным отображением этих записей и может использоваться в качестве составного индекса поиска любой записи (или группы записей) по значениям времени пролета и по именам элементов ВП.

Список порядковых номеров исходных записей формируется как линейная последовательность (например, как сцепление), все элементы (звенья) которого обладают двумя необходимыми свойствами. Во-первых, своими значениями они указывают на адрес записи в БД о том ВС, которое затрагивает данный элемент ВП в данном часе суток. Во-вторых, и это главное для формирования сцепленной структуры списка, своими значениями они одновременно указывают адрес следующего звена цепи в порядке монотонного изменения времени. Последний эффект достигается за счет вынесения начального элемента цепи (столбца гистограммы) непосредственно в разряды основания (оси гистограммы).

## 2. Алгоритмическая схема формирования информационного образа

Упрощенная блок-схема формирования ИО представлена на рис. 1. Для пояснений воспользуемся условным примером ввода диспетчером в систему информации по докладу пилота о пролете ПОД. На входе процедуры (блок «начало» на схеме) программное обеспечение (ПО) получает информацию о позывном номере борта, а также о наименовании, координатах, моменте времени и высоте пролета пункта. Позывной преобразуется в номер записи о ВС в БД. На рис. 1 не отражены предварительные операции, такие как пересчет плана полета, корректировка полей радиолокационного формуляра и списка бортов, оснащенных аппаратурой автоматического зависящего наблюдения. Эти действия вызывают удаление устаревшей информации об обслуживаемом ВС из ИО, после которого результаты диспетчерской корректировки фиксируются (возвращаются) в него как новые данные.

Первый шаг алгоритма состоит в адресации к гистограмме распределения моментов пролета того ПОД, по которому исполняется диспетчерский ввод. Поиск осуществляется по известному наименованию этого элемента ВП. Следующий шаг состоит в выборе столбца гистограммы, к которому нужно обратиться для присоединения к частичной цепи номеров

записей нового звена – номера записи ВС. Столбцы пронумерованы от нуля до двадцати трех в соответствии с часами суток. Необходимая информация извлекается ПО из поля «время» введенной в систему диспетчерской команды. Производится обращение к соответствующему по номеру разряду оси гистограммы. Анализируется, был ли ранее в процессе работы системы образован столбец гистограммы, или обслуживаемый рейс является первым внутри данного часа. Если столбца не существует, то система создает его, занося в выбранный разряд оси известный номер записи о ВС. В противном случае выполняется поиск места вводимого номера (звена) в частичной цепи номеров записей, порожденной найденным разрядом оси.

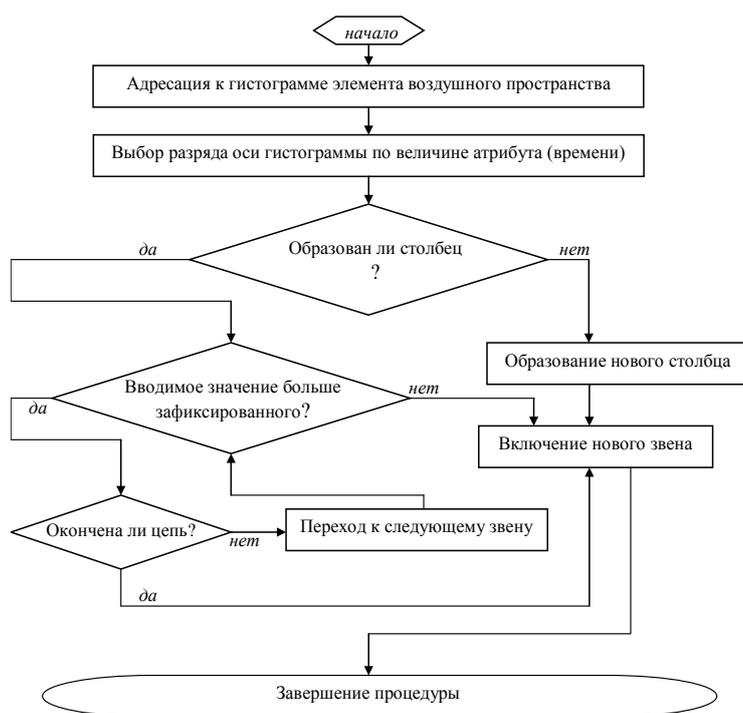


Рис. 1. Упрощенная блок-схема алгоритма

В случае если вводимое значение меньше величины, зафиксированной в основании столбца гистограммы (начального звена цепи), алгоритм «вытесняет» ранее введенное значение из оси в продолжение цепи, а на «освободившееся» место записывает новый номер ВС. Механизм такой переадресации прост, потому что каждое звено указывает своим значением одновременно и номер записи о ВС, и место следующего (в порядке неубывания значений момента времени пролета ПОД) звена цепи. Рассматриваемый случай замены лидирующего звена наиболее нагляден. В разряде оси гистограммы фиксируется вводимый номер, а в теле файла единой цепи, по адресу, равному тому же вводимому номеру, фиксируется «вытесненное» из основания столбца прежнее начальное звено. Каждый номер  $n = (\overline{1, N})$  уникален, что гарантирует неповторяемость адресных ссылок (здесь  $N$  – допустимое по замыслу системы число одновременно сопровождаемых АС УВД объектов). Присоединение вводимого номера к цепи внутри нее состоит в переадресации звена на месте вставки («вклинивания»). Последнее из «более ранних» звеньев содержит номер (адрес) первого из «более поздних» звеньев. Этот номер переносится в поле указателя вводимого рейса, фиксируя его место относительно продолжения цепи. В освободившийся указатель более «раннего» звена записывается новый номер, адресуя к нему начальную часть ассоциативной цепи.

Позиция каждого звена определяется моментом времени внутри часа, т.е. минутами. Нужно пройти по сцепленным номерам ВС и «вклинить» между ВС, пролетевшими данный ПОД раньше, и ВС, которые пролетят его позже вводимого.

Процедура поиска места нового звена в частичной цепи управляется сравнением моментов времени пролета пункта. Если вводимое значение больше, чем у сравниваемого звена, то поиск продолжается. Выясняется, не просмотрена ли на данном этапе поиска вся цепь. Если сопоставляемое звено оказывается последним, то вводимое звено присоединяется к окончанию элементарной цепи, т.е. замыкает ее. В противном случае (цепь не окончена) алгоритм адресуется к следующему звену.

### 3. Управление базой полетных данных

#### 3.1. Ввод новых полетных данных.

Процедура ввода новой записи принципиально не отличается от алгоритма сортировки потока записей. Допустим для определенности, что цепи формируются в порядке неубывания атрибутов. Исходная запись заносится на свободное место в таблицу БД. Это означает, что в таблице появляется новая строка с принадлежащими ей атрибутами; в частности, со значением атрибута высоты, равным, например, 3. По каждому вводимому атрибуту рассматривается соответствующая ему ранее сформированная числовая ось – входной индекс поиска. Адресация к выбираемому полю индекса производится, как и при сортировке потока записей, величиной вводимого атрибута. В анализируемом примере (рис. 2) рассматривается столбец таблицы, номер которого равен по величине трем – сортируемому атрибуту вводимой записи. Допустим, что выбранное поле входного индекса уже заполнено, т.е. среди множества записей, сопровождаемых БД, уже встречалась хотя бы одна, содержащая атрибут, равный по величине вводимому. Тогда, в соответствии с логикой метода, обнаруженный в анализируемом дискрете (поле индекса) начальный элемент частичной цепи становится последующим за вводимым звеном цепи. Для данного примера начальным звеном частичной цепи атрибутов, равных трем, являлся к моменту ввода двадцать шестой записи номер 25. Этот номер становится следующим за вводимым двадцать шестым номером. Из выбранного дискрета оси в поле указателя атрибута высоты двадцать шестой записи переписывается номер 25. В «освободившееся» место заносится номер 26 вводимой записи. Кроме того, вытесненный из индекса номер (25) фиксируется алгоритмом для организации поиска предшествовавшей частичной цепи номеров.

В противном случае, если в выбранном дискрете оси обнаружен нуль (т.е. запись с вводимым значением атрибута встречается впервые) поиск следующего звена производится иначе. Организуется просмотр полей индекса от выбранного дискрета вправо по возрастанию адресов до первого ненулевого значения, которое и становится последующим звеном единой цепи. Если значащих элементов справа на числовой оси нет, то номер вводимой записи становится последним, и в поле указателя соответствующего атрибута сохраняется нуль. Пример допускает в качестве иллюстрации единственную возможность – ввод в БД записи с атрибутом высоты, равным нулю (взлет). В нулевом дискрете числовой оси фиксируется номер 26 этой записи. В поле указателя атрибута высоты заносится номер последующего звена, т.е. содержимое ближайшего справа по оси ненулевого дискрета. Таким дискретом является первое поле индекса поиска, которое соседствует с нулевым. В нем содержится номер 4 записи, имеющей атрибут с ближайшим к вводимому нулю (по возрастанию величины) единичным значением.

Для поиска предшествующей частичной цепи номеров записей в общем случае должен быть организован просмотр полей индекса поиска от выбранного дискрета налево по уменьшению адресов до первого ненулевого содержимого. Найденный значащий дискрет, если он существует, интерпретируется как начальное звено предшествующей частичной цепи. Она связывает номера записей, содержащих атрибуты с ближайшими по убыванию значениями относительно

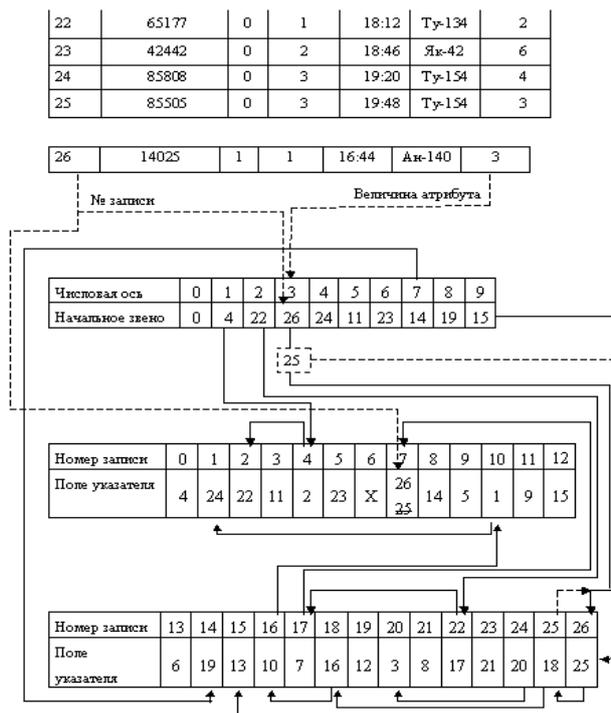


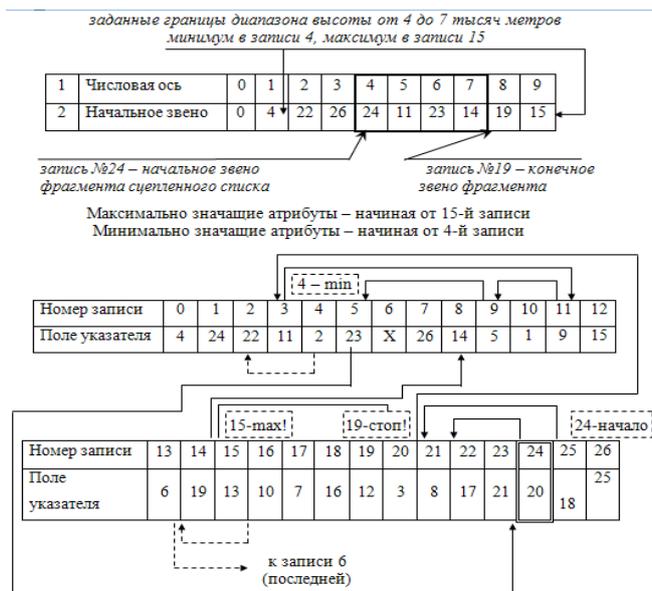
Рис. 2. Реорганизация списка при вводе

вводимого. Если на оси нет значащих дискретов слева, как это иллюстрируется примером, то номер вводимой записи становится начальным звеном единой ассоциативной цепи. Это означает, что данный номер должен быть зафиксирован в нулевой записи-заголовке БД, указывая начало просмотра в порядке неубывания величины анализируемого атрибута.

В противном случае, если значащий элемент слева от частичной цепи атрибута вводимой записи обнаружен, он рассматривается как начальное звено предшествующей элементарной цепи. Такая ситуация соответствует рассмотренному выше примеру с вводом в БД двадцать шестой записи с величиной атрибута высоты, равной 3. Алгоритм ввода записи пробегает эту цепь до совпадения нового номера с зафиксированным ранее номером последующего звена цепи, которое вынесено из поля индекса поиска в поле указателя вводимой записи. В примере фиксировался алгоритмом и вытеснялся из поля индекса номер двадцать пятой записи. До ввода двадцать шестой записи вытесненный номер замыкал элементарные цепи номеров записей, содержащих атрибуты, равные по величине 2 и 3. Он был зафиксирован, кроме третьего поля индекса поиска, в поле указателя конечного звена элементарной цепи записей, имеющих атрибут высоты, равный 2. После ввода двадцать шестой записи в БД, ее номер вытеснил из третьего поля индекса поиска номер двадцать пятой записи. Следовательно, для замыкания второй и третьей частичных цепей, теперь становится необходимым адресовать конечное звено второй цепи к двадцать шестому номеру, т.е. заместить в поле указателя соответствующей записи номер 25 номером 26.

Перечисленные операции применяются ко всем атрибутам вводимой записи, а само их количество  $N$  увеличивается на единицу. Время поиска предшествующего звена можно сократить, если наряду с осью начальных элементов хранить в БД ось «конечных» звеньев частичных цепей, содержащую номера записей, значения атрибутов которых вводились в систему первыми среди равновеликих, либо пользоваться двунаправленными цепями.

**3.2. Вывод полетных данных.** Процедура вывода информации в заданном диапазоне изменения атрибута (группового вывода) просматривает поля индекса поиска от минимального значения до максимального (заданных в запросе границ) адресов полей. Запросим номера бортов, пролетающих ПОД в пределах от четырех до семи тысяч метров (рис. 3). Если все дискреты в указанном диапазоне содержат нули, то, следовательно, в БД не сопровождается ни один объект со значением атрибута, лежащим в указанном диапазоне. В противном случае считается, что первый встреченный при просмотре индекса значащий дискрет является начальным звеном искомого фрагмента единой цепи номеров записей. Для обнаружения конечного элемента целесообразно обратиться к начальному элементу частичной цепи, лежащей справа от выделенного запросом диапазона. Поиск записей, содержащих атрибуты высоты, равные от четырех до семи тысяч метров, управляется выделенными на рис. 2 дискретами числовой оси. Начало просмотра – 24-я запись (исключая содержимое последней). С этой целью производится просмотр индекса поиска от заданной максимальной границы в порядке возрастания адресов его дискретов до первого ненулевого поля, содержимое которого фиксируется. Если такого элемента нет, значит, запрошенный диапазон включает в себя все конечные элементы единой цепи. В против-



**Рис. 3.** Вывод записей, имеющих максимальные, минимальные и лежащие в заданном диапазоне значения атрибутов

ном случае выдача информации происходит по номерам найденного фрагмента цепи указателей до совпадения порядкового номера очередной записи с зафиксированным последующим звеном справа от максимальной границы заданного диапазона.

В приведенном выше примере (рис. 3) находим на четвертом поле индекса, соответствующем минимальной границе диапазона (значение высоты равно 4), начальное звено искомого фрагмента единой цепи, содержащее номер двадцать четвертой записи. Справа от максимальной границы диапазона, следом за седьмым полем индекса (высота 7000), в первом же значащем дискрете индекса поиска (восьмом) указано последующее (за конечным) звено искомого фрагмента единой цепи, содержащее номер девятнадцатой записи БД. Передвигаясь по выделенному фрагменту цепи, удается считывать позывные бортов в записях с номерами:  $24 \rightarrow 20 \rightarrow 3 \rightarrow 11 \rightarrow 9 \rightarrow 5 \rightarrow 23 \rightarrow 21 \rightarrow 8 \rightarrow 14$ . Следующий девятнадцатый номер зафиксирован как лежащий вне заданного диапазона. Соответствующие величины высоты:  $4 \rightarrow 4 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 5 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 6 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  и запрошенные значения выводятся из исходных записей.

Нахождение записи с минимальным (максимальным) значением атрибута производится простым обращением по номеру, хранящемуся в первом (последнем) значащем дискрете индекса поиска. Если запрашиваются все записи с минимальным (максимальным) значением атрибута, то выводу подлежит информация всех записей, номера которых входят в частичную цепь, порожденную первым (последним) значащим дискретом числовой оси. Для примера (рис. 3), элементарная цепь минимально значащего атрибута содержит два следующих звена:  $4 \rightarrow 2$ , а цепь максимально значащего атрибута – звенья  $15 \rightarrow 3 \rightarrow 6$ . Окончание первой цепи фиксируется последующим за ней начальным элементом частичной цепи атрибутов, равных двум (второй значащий дискрет индекса поиска, содержащий номер двадцать второй записи). Окончание элементарной цепи максимально значащего атрибута фиксируется нулевым содержимым поля указателя. Согласно примеру, четвертая и вторая записи содержат атрибуты высоты, равные единице; пятнадцатая, тринадцатая и шестая – атрибуты, равные девяти.

Пусть по условиям задания необходимо вывести по запросу значения времени пролета пункта обязательных донесений для которых находится в интервале от 9:30 до 11:45, и высота пролета которых не превышает четырех тысяч метров. Первому условию удовлетворяют записи с номерами (рис. 3):  $11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ , второму:  $4 \rightarrow 2 \rightarrow 22 \rightarrow 17 \rightarrow 7 \rightarrow 25 \rightarrow 18 \rightarrow 16 \rightarrow 10 \rightarrow 1 \rightarrow 24 \rightarrow 20 \rightarrow 3$ . Сопоставление показывает, что заданным ограничениям не удовлетворяет ни одна из сопровождаемых БД записей. На числовой оси не образовано ни одной двухзвенной цепи, следовательно, необходимо расширить заданный диапазон запроса.

Пусть при прочих равных условиях отрезок времени расширяется: от начального времени 08:00 до 15:00. Фрагмент единой цепи атрибутов высоты остается неизменным. Фрагмент цепи атрибутов бортовых номеров расширяется до участка натурального ряда от 7 до 20. При наложении обоих фрагментов числовая ось образует двухзвенные цепи в дискретах с номерами:  $7 \rightarrow 10 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 20$ , адресующими к записям с атрибутами высоты, равными 2000, и атрибутами бортового номера, равными SAS124, 85777, GBNWX, 64026, 76738, 85604 соответственно. Если задан поиск более чем по двум ключам, то после ввода всех найденных фрагментов необходимо отобразить в качестве результата только те частичные цепи, количество звеньев в которых равно количеству  $k$  заданных ключей поиска. При этом можно определить и область близких (субоптимальных) решений. К ней относятся записи, номера которых образовали на числовой оси многозвенные элементарные цепи с меньшим, чем  $k$ , количеством звеньев. После ввода всех фрагментов на числовой оси образуется «рельеф правдоподобия», указывающий, насколько близко удовлетворяют заданным ограничениям все записи БД, т.е. какие из них согласуются с искомым решением по всем, по большинству, по меньшинству или ни по одному из ключей поиска.

**3.3. Корректировка полетных данных.** Процедура внесения изменений в запись сводится к последовательной корректировке одного или нескольких атрибутов. В общем случае должны изменяться и положения звеньев соответствующих цепей. Технологически простейшим спосо-

бом корректировки является удаление скорректированного звена с первоначальной позиции и его последующее присоединение к цепи указателей адресов записей. С этой целью прежней величиной изменяемого атрибута производится адресация к соответствующему полю входного индекса поиска. Далее, передвигаясь по звеньям частичной цепи от начала к концу, удастся отыскать номер корректируемой записи. Этот номер замещается в цепи значением, зафиксированным в поле указателя модифицируемого атрибута, т.е. последний исключается из цепи (рис. 4). На следующем шаге удаленный элемент присоединяется к единой цепи с помощью адресации к полю индекса поиска новым значением изменяемого атрибута.

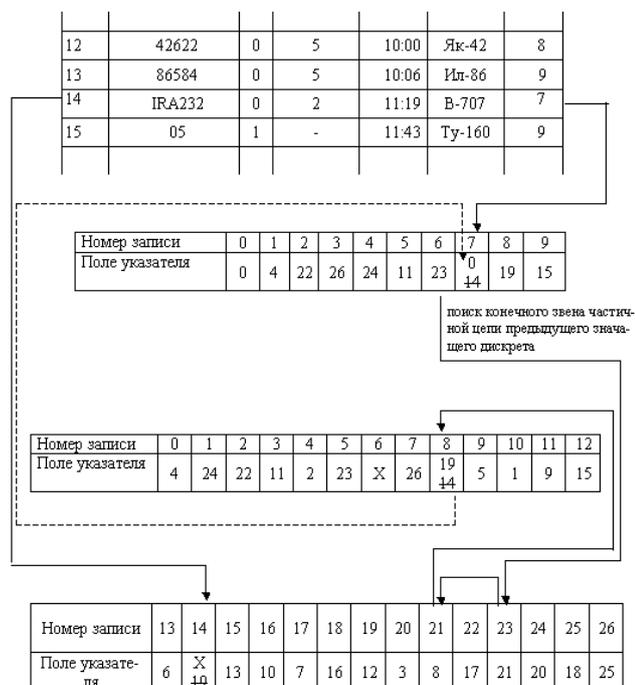


Рис. 4. Корректировка сцепленного списка

тируемой записи. Собственно поле указателя обнуляется. В случае если частичная цепь анализируемого атрибута – однозвенная, поле индекса поиска также подлежит обнулению. Наконец, если указатель номера корректируемой записи не является начальным звеном соответствующей элементарной цепи, производится ее просмотр до совпадения содержимого очередного поля указателя с искомым. При обнаружении этого звена содержимое найденного указателя замещается содержимым поля указателя изменяемого атрибута, причем последнее обнуляется.

При корректировке записей, составляющих однозвенную цепь, или описываемых начальными элементами многозвенных цепей, возникает необходимость поиска конечного звена предшествующей цепи для изменения в поле ее указателя адреса замыкания в единую цепь. Проверка осуществляется путем просмотра всей предшествующей частичной цепи. Ее начальный элемент отыскивается в первом слева значащем поле индекса поиска, а конечный обнаруживается содержимым поля указателя, равным номеру изменяемой записи. Как и в случае исключения из многозвенной цепи, обнаруженное содержимое замещается содержимым поля указателя корректируемой записи. Ввод в запись нового значения атрибута и сопутствующая корректировка соответствующей ему единой цепи.

Процедура удаления  $n$ -й ( $n = \overline{1, N}$ ) записи БД состоит в последовательном исключении соответствующих ей звеньев единых цепей указателей номеров и, в случае наличия  $n$ -го номера в поле какого-либо индекса поиска, – из этих полей. Заманчиво заменить процедуру удаления записи последовательной корректировкой каждого атрибута, составляющего удаляемую информацию, заменяя их величины на величины соответствующих атрибутов  $N$ -й, последней в

Запись 14 отображена в сцепленном списке (рис. 4) однозвенной частичной цепью и служит универсальным примером для демонстрации операций над списком, при удалении записей: вычеркивание из дискрета входного индекса, а также поиск и корректировка указателя адреса в предшествовавшем звене.

Для наглядности вновь обратимся к примеру дополнения списка двадцать шестой строкой, содержащей атрибут высоты, равный трем. Допустим, что значение атрибута следует скорректировать до величины, равной четырем. В соответствии с изложенной схемой корректировки записей производится обращение к третьему полю входного индекса поиска, где в данном примере зафиксирован номер корректируемой двадцать шестой записи. На первом шаге исполнения процедура замещает содержимое поля индекса как начальное звено элементарной цепи атрибутов, равных трем, на следующее звено цепи, т.е. на содержимое поля указателя коррек-

порядке размещения записи, после чего удалить из БД 17-ю запись и уменьшить значение  $N$  на единицу.

Метод сортировки и поиска непосредственной расстановкой связан с обнаружением места каждого числа в результирующей последовательности, что позволяет минимизировать время исполнения обоих процессов, сводя их к прямой адресации на числовой оси. Благодаря слиянию их механизмов в единую технологию, удастся упростить и процедуры управления БД, сортированных непосредственной расстановкой. Упрощение достигается за счет возрастания необходимых для реализации метода объемов памяти относительно других способов организации данных. Увеличение потребностей в памяти с лихвой перекрывается сокращением необходимых ресурсов за счет вынесения целой части величин атрибутов в порождающие дискреты входного индекса.

### Заключение

Рассмотрены алгоритмы построения предиката поиска в системе управления аэронавигационной информацией. Сформулировано понятие компьютерного информационного образа как совокупности характеристик (свойств) объекта поиска, объединяющей в своем составе все его ключевые параметры, оцениваемые или кодируемые количественно. Рассмотрена алгоритмическая схема ввода, вызова и корректировки данных на основе обсуждаемого подхода. Приведен пример использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фуфаев Э.В., Фуфаев Д.Э. Базы данных. - М.: Академия, 2007.
2. Платонова Е.С., Рудельсон Л.Е., Степанова А.И. Метод ускорения поиска данных в системе управления аэронавигационной информацией // В настоящем Вестнике.
3. ФАП. Организация воздушного движения в Российской Федерации: Федеральные авиационные правила: утв. приказом Минтранса России от 25.11.2011 г. № 293. [Электронный ресурс]. URL: [http:// dvmtu-favt.ru/about/documents/18/200](http://dvmtu-favt.ru/about/documents/18/200).

### ALGORITHMS FOR AERONAUTICAL DATA MANIPULATION BASED ON IMAGES OF COMPUTER INFORMATION

Agafonova I.Y., Rudelson L.E.

Algorithms of constructing a search predicate in the management of aeronautical information are discussed. The notion «image of computer information» is defined as a set of characteristics (properties) of the object of search, which contains together all of its key parameters that are measured quantitatively or encoded. The algorithmic scheme for input, challenge and correction the data on the basis of this intervention is considered. An example of using is showed.

**Key words:** aeronautical information, image information, a database record.

### Сведения об авторах

**Агафонова Инна Юрьевна**, окончила Ульяновское высшее авиационное училище (2004), аспирантка МГТУ ГА, область научных интересов – компьютерная поддержка планирования полетов и организации доступа к аэронавигационной информации.

**Рудельсон Лев Ефимович**, 1944 г.р., окончил МЭИ (1968), доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, автор более 170 научных работ, область научных интересов – программное обеспечение автоматизированных систем организации воздушного движения.

УДК 351.814.331

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТРЕНАЖЕРА ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА

В.А. ПУНТ

В статье рассматриваются особенности моделирования статических и динамических объектов, применяемые в имитационных моделях тренажера диспетчерского персонала, структура программного комплекса и применяемые программные средства.

**Ключевые слова:** наземное воздушное движение, имитационная модель, локация.

При создании тренажера диспетчерского персонала важную роль играет формирование базы данных статических и динамических объектов [1] (табл. 1), образующих модель наземного воздушного движения в районе аэродрома, доступную для наблюдения с контрольно-диспетчерского пункта (КДП).

Таблица 1

Вид моделируемого объекта	Статический	Динамический
Характер действия	Постоянный (длительный)	Временный (краткосрочный)
Возможности моделирования	Отличительные особенности аэропорта	Особые случаи и аварийные ситуации

К статическим объектам относятся: окружающая аэродром местность с детализацией ее рельефа и наличием естественных и искусственных ориентиров; территория аэродрома, включающая взлетно-посадочные полосы (ВПП), рулежные дорожки (РД); здания и сооружения, объекты РТОП, метеорологическое оборудование.

Как правило, статические объекты носят постоянный (или длительный) характер и являются определяющими не только для класса или типа, но и непосредственно для того или иного аэропорта. Использование различных статических баз данных можно осуществлять выбор виртуального управления наземным воздушным движением в конкретном аэропорту.

К динамическим объектам можно отнести летательные аппараты (ЛА), их элементы – рули, элероны, средства механизации, закрылки, воздушные винты; средства наземного транспорта и специальной техники; людей, животных. Эти объекты носят временный (краткосрочный) характер и позволяют моделировать такие факторы, как этап полета, плотность воздушного движения, а также особые случаи и аварийные ситуации.

Еще одним переменным параметром при отображении визуальной обстановки являются природные условия, к которым можно отнести: время суток, время года, наличие и интенсивность атмосферных осадков, силу (по шкале Бофорта) и направление ветра, характер облачности – слоистые, кучевые, перистые облака. В ясную безоблачную погоду дополнительным отображаемым параметром является расположение звезд и светил. В условиях тумана важными параметрами являются дальность видимости (от 0 до 15 км) и характер тумана – общий, локальный, приземный.

При имитации работы аэропорта в условиях недостаточной освещенности визуальная обстановка дополняется светосигнальным оборудованием и бортовыми огнями воздушных судов (ВС); а в случае аварийной ситуации – огнем и взрывами.

Выбор моделируемых инцидентов целесообразно осуществлять с учетом статистических данных по материалам [2]. К таким случаям можно отнести следующие события:

- несанкционированный выезд ВС на ВПП;

- столкновение с ВС с препятствием на РД или друг с другом;
- уход на второй круг;
- прерванный взлет;
- потеря ориентировки на летном поле;
- посадка ВС с убранными шасси;
- разрушение пневматиков колес;
- подлом опоры шасси;
- задымленность или пожар на борту ВС;
- выкатывание ВС за пределы летного поля при взлете, посадке;
- передвижение техники аварийно-спасательных служб.

Последовательность и логическая взаимосвязь событий должна определяться вероятностью развития инцидента на основании опыта эксплуатации ЛА данного типа, особенностей его конструктивного исполнения.

Для детального просмотра отдельных участков аэродрома и воздушного пространства должна обеспечиваться возможность его просмотра с увеличением [1]. Это дает возможность определить номер и тип ВС для его идентификации.

При задании маршрута движения ВС должны соблюдаться нормативы и правила, установленные руководящими документами [3], по скорости и порядку перемещения ВС.

Детализация моделирования статических и динамических объектов должна определяться из условия значимости того или иного моделируемого параметра и трудозатрат на его имитацию.

Программный комплекс имитационного моделирования, помимо непосредственно самой имитационной модели, включает в себя ряд подсистем, к числу которых относятся:

- редактор карты летного поля – позволяет задать рулежную сеть аэропорта и привязать ее к оцифрованному плану местности в виде направленного графа, вершинами которого являются элементы рулежной сети аэропорта-локации;
- редактор расписания полетов – позволяет подготавливать расписание полетов, фиксируя время рейса, тип операции (отправление или прибытие), тип ВС, номер терминала, символическое наименование рейса;
- редактор сценариев – позволяет задать параметры моделирования (погодные условия, параметры движения по локациям, посадочные параметры, интервалы выполнения взлетно-посадочных операций);
- редактор отказов – позволяет задавать особые случаи и аварийные ситуации;
- модуль статистики – анализирует протокол имитационного эксперимента, накапливая статистическую информацию по интересующим пользователя параметрам;
- модуль визуализации – представляет ход эксперимента, позволяет пользователю с нужной степенью детализации проанализировать происходящие в системе события.

Анализ требований к имитационной модели наземного движения ВС в аэропорту [4] показывает, что для представления сложных систем и процессов в как можно более простой, но при этом в достаточно адекватной форме, целесообразно использовать универсальный объектно-ориентированный язык моделирования C++, ориентированный на процессы с дискретными событиями с использованием библиотеки C++Sim [5; 6]. В библиотеке предусмотрено пять методов для активизации пассивных процессов. Эти методы [7] помещают процесс в очередь событий на позицию, соответствующую времени активизации процесса. Время активации указывается либо явно, либо относительно некоторого процесса.

Существенными с точки зрения моделирования [4] являются процессы, представленные на схеме (рис. 1).

Рассмотренная модель наземного воздушного движения ВС обеспечивает также получение количественных оценок работы аэропорта, т.е. определение суточной пропускной способности, параметров задержек вылетов ВС, времени руления по летному полю при прилете и вылете, времени работы аэропорта в режиме перегрузки и т.д.

С помощью анимации имитационное моделирование позволяет проводить качественный (экспертный) анализ работы аэропорта. Визуальное в динамике представление результатов моделирования позволяет с нужной степенью детализации продемонстрировать пользователю процессы, происходящие в аэропорту в заданных условиях, установить причины возникновения тех или иных аварийных ситуаций и особых случаев, а также оценить адекватность модели.

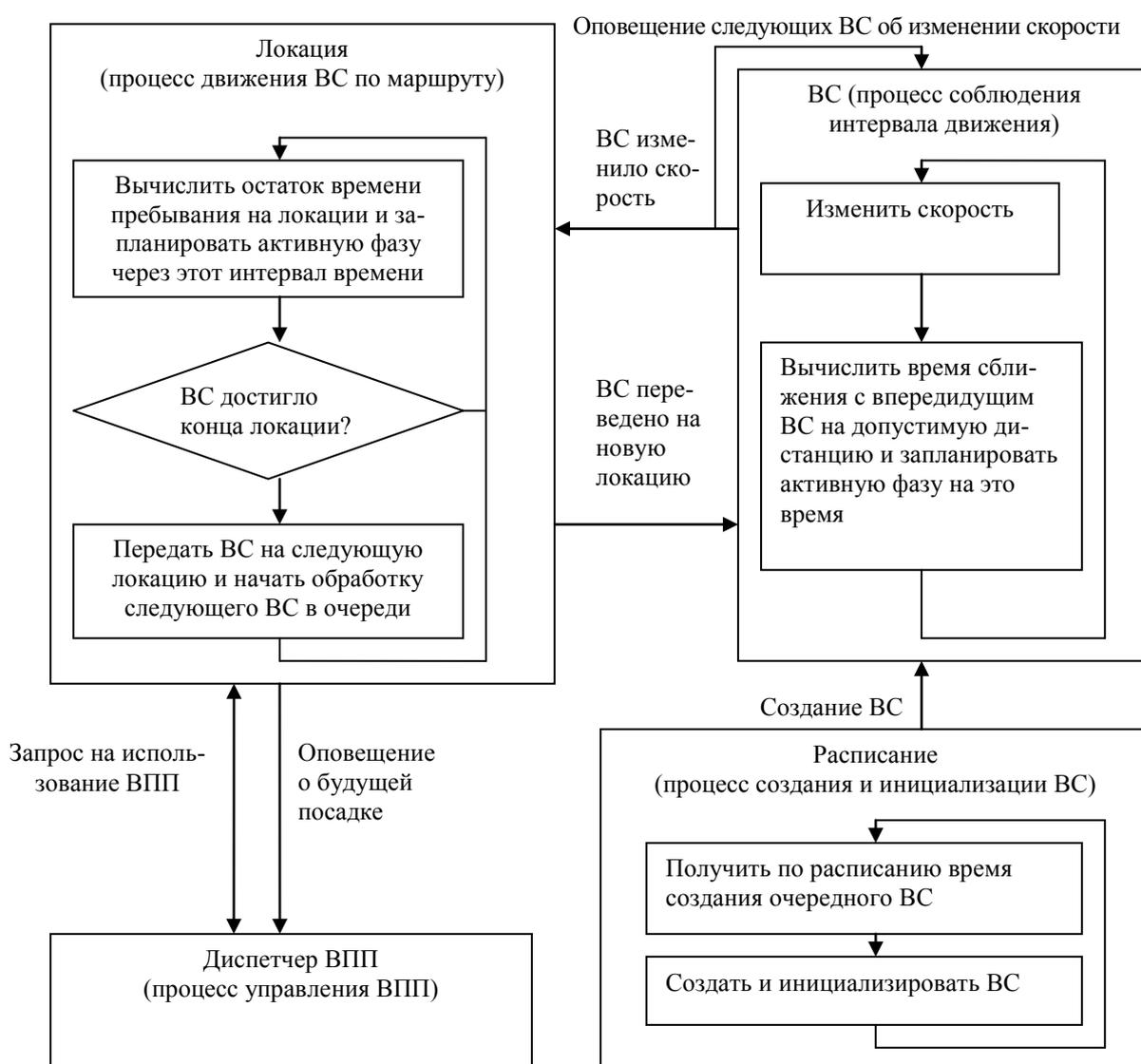


Рис. 1. Схема взаимодействия процессов

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Клеван С.И. Функциональные требования к имитатору визуальной обстановки диспетчерского тренажера // Проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: материалы междунар. науч.-практич. конф. 23-24 ноября 2006 г. - Ульяновск: УВАУ ГА, 2006.
2. Анализ безопасности полетов при ОрВД в ФГУП Госкорпорация по ОрВД. 2009-2012 гг.
3. ФАП. Организация воздушного движения в Российской Федерации.
4. Местецкий Л.М., Щетинин Д.В. Имитационная модель наземного движения воздушных судов в аэропорту // Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках: первая всероссийская науч.-практич. конф. ИММОД-2003.
5. Little M.C., McCue D.L. Construction and Use of a Simulation Package in C++.

6. C++SIM User's Guide. Department of Computing Science, Computing Laboratory, The University, Newcastle upon Tyne.

7. Щетинин Д.В. Библиотека имитационного моделирования систем с дискретными событиями C++SIM // Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках: первая всероссийская науч.-практич. конф. ИММОД-2003.

## FEATURES OF MODELING OF STATIC AND DYNAMIC OBJECTS FOR DISPATCHERS TRAINER

**Punt V.A.**

The article discusses the features of modeling the static and dynamic objects used in the simulation models simulator dispatching personnel, structure and software system used software.

**Key words:** ground air traffic simulation model, location.

### Сведения об авторе

**Пунт Владимир Александрович**, 1974 г.р., окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королева (2000), заведующий отделением Кирсановского авиационного технического колледжа – филиала МГТУ ГА, автор 12 научных работ, область научных интересов – моделирование процессов технического обслуживания летательных аппаратов.

УДК 629.7.08

## МЕТОД РАСЧЕТА ШАГА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ В ТРЕНАЖЕРНО-МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ ОПЕРАТОРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

А.Д. ФИЛИН

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Шатраковым Ю.Г.**

В данной статье предлагается метод определения шага дискретизации при организации функционирования моделей в тренажерно-моделирующих комплексах диспетчеров УВД.

**Ключевые слова:** моделирование процессов УВД, тренажер диспетчеров УВД, погрешность моделирования.

При организации функционирования тренажерно-моделирующих комплексов (ТМК) операторов радиолокационного контроля важной задачей является задание величины шага дискретизации просчета моделей специального программного обеспечения. Величина шага дискретизации влияет на величины инструментальных погрешностей моделей. Следовательно, весьма актуальна задача выбора оптимальной величины шага дискретизации, исходя из требований обеспечения адекватности моделирования процессов УВД.

Анализ подхода к определению шага дискретизации выполнен на примере организации моделирования движения воздушных судов (ВС), как наиболее динамично развивающегося процесса, и к адекватности моделирования которого предъявляются высокие требования.

При функционировании модели движения подвижных объектов расчет координат начинается в момент прихода метки времени – шага дискретизации  $\Delta t$ . Произведем анализ величины  $\Delta t$ , исходя из дискретности получения и анализа радиолокационной информации в реальной системе УВД.

В общем случае, если в момент  $t_s$  выполнен расчет координат  $X_s, Y_s, H_s$  ВС, то исходя из условия движения и равномерного постоянного периода сканирования антенны, следующий момент времени облучения  $t_{s+1}$  не равен  $t_{s+1} + T_{об}$ .

Если считать движение ВС между моментами  $t_s$  и  $t_{s+1}$  равномерным и прямолинейным, что справедливо вследствие малости величины времени, то обозначая через  $\psi'$  курсовой угол, координаты в момент  $t_{s+1}$  на мониторе отображения РЛ обстановки в системе координат  $XOY$  определяются:

$$\begin{cases} X_{s+1} = X_s + (t_{s+1} - t_s) V_C \sin \psi' \\ Y_{s+1} = Y_s + (t_{s+1} - t_s) V_C \cos \psi'. \end{cases} \quad (1)$$

Пеленг ВС в момент  $t_{s+1}$  вычисляется

$$\varphi_{s+1} = \varphi_s + \frac{2\pi}{T_{об}} (t_{s+1} - t_s). \quad (2)$$

С учетом этого справедливо соотношение

$$\frac{X_s + (t_{s+1} - t_s) V_C \sin \psi'}{Y_s + (t_{s+1} - t_s) V_C \cos \psi'} = \operatorname{tg}(\varphi_s + 2\pi(t_{s+1} - t_s)/T_{об}). \quad (3)$$

Решение составленного уравнения относительно  $t_{s+1}$  позволяет определять моменты времени облучения ВС при его движении и, следовательно, точные значения  $\Delta t$ . Исходя из  $t_{s+1}$ , находятся новые текущие значения координат при моделировании на основе заданной скорости движения ВС и его курса. Но нахождение  $t_{s+1}$  на каждом обзоре для большого количества имитируемых в ТМК ВС не рационально. Представляет интерес обосновать возможность принятия  $\Delta t$  величиной постоянной и независимой в общем случае от способа моделирования движения ВС в моделях УВД.

Рассмотрим следующий метод подхода к определению  $\Delta t$ . Положим, что  $\Delta t$  вычисляется из выражения

$$\Delta t = T_{об} / K, \quad (4)$$

где  $K$  - такое число, которое нацело делит  $T_{об}$ . Если  $K > 1$ , то обзор разбивается на сектора и за один обзор может производиться несколько вычислений, при этом выдача текущих значений координат производится в моменты

$$t_s \cong jK\Delta t = sT_{об}. \quad (5)$$

Будем считать, что для всех ВС, находящихся в любом секторе  $k$  момент облучения  $t_{s+1}$  принимается одинаковым и равным времени прохождения лучом диаграммы направленности антенны середины сектора  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Очевидно, что погрешность моделирования будет тем меньше, чем больше  $K$ , но при увеличении  $K$  увеличиваются затраты вычислительных ресурсов. Рассмотрим погрешности моделирования, вызванные таким определением времени облучения судна. Максимальная ошибка определения времени облучения составит, очевидно,  $\Delta t / 2$ . Тогда погрешность по пеленгу и дальности будет определяться

$$\delta(\varphi) = \dot{\varphi}_{\max} \cdot \Delta t / 2, \quad \delta(D) = \dot{D}_{\max} \cdot \Delta t / 2. \quad (6)$$

Произведем численный расчет  $\Delta t$  для данного метода. Примем, что

$$\dot{\varphi}_{\max} = \frac{V}{R_{ц}} \left( \frac{pad}{c} \right); \quad \dot{D}_{\max} = V_C (m/c), \quad \delta(\varphi) = R_{ц} \cdot \delta(\varphi_p) (m),$$

а значения скоростей  $\dot{\varphi}_{\max}$  и  $V_C$  выбираются из базы данных моделируемых ВС, при этом для наихудшего варианта можно считать, что ВС выполняет движение по кривой с радиусом  $R_{ц}$ . Результаты расчетов показывают, что  $\delta(\varphi, D)$  может иметь значительные значения при возрастании  $\Delta t$ . Этот способ прост, но он не позволяет оценивать погрешности моделирования, исходя из сложности или кривизны траектории движения. Точное представление о величине погрешности необходимо, так как адекватность моделирования движения ВС определяется величиной погрешности, с которой рассчитываются в модели координаты ВС. При организации моделирования необходимо соблюдение баланса точностей [1]. Моделирование целесообразно при

$$\delta_{MO}^* \ll \delta_{MC}, \quad (7)$$

где  $\delta_{MO}^*$  - погрешность моделирования.

Произведем анализ  $\delta_{MO}^*$  на основе учета динамики траекторий, исходя из задаваемых величин  $\Delta t$ . Погрешность, которая появляется в результате замены непрерывных процессов дискретными, может быть представлена как

$$\Delta Y[n\Delta t] = Y[n\Delta t] - Y^*[n\Delta t], \quad (8)$$

где  $Y[n\Delta t]$  и  $Y^*[n\Delta t]$  - значения непрерывной и дискретной функции соответственно. Погрешность тем меньше, чем меньше шаг к дискретизации, но при этом возрастает объем вычислений. Поэтому целесообразно выбирать такое оптимальное  $\Delta t$ , которое удовлетворяло

бы заданной точности вычислений и определяло бы необходимый минимальный объем вычислений. Можно показать, что погрешность вычислений  $Y^*[n\Delta t]$  при моделировании будет мала, если  $\Delta t$  приближенно удовлетворяет условиям Котельникова

$$\Delta t = 1/(2f_c), \quad (9)$$

где  $f_c$  - верхняя частота в спектре функции  $Y(t)$ , которая может быть представлена рядом

$$Y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y[n\Delta t] \sin \omega_c(t - n\Delta t) / (\omega_c(t - n\Delta t)). \quad (10)$$

Однако спектр строго ограничен в конечной полосе частот только при неограниченной во времени функции  $Y(t)$ . В реальных УВД это условие никогда не выполняется, поэтому равенство (10) становится приближенным. Кроме того, теорема Котельникова не позволяет при моделировании движения ВС определять величину погрешности при заданном  $\Delta t$ . Для определения погрешностей дискретизации в литературе часто используется оценка вида

$$\delta^* = \int_{-\infty}^{\infty} [\overline{Y(t)}]^2 - [\overline{Y^*(t)}]^2 dt, \quad (11)$$

которая представляет собой нормированный средний квадрат отклонения аппроксимирующей функции  $Y^*(t)$  от аппроксимируемой  $Y(t)$  или может быть определена, как доля информации, потерянной при дискретизации. В общем случае наибольшая погрешность из-за дискретизации расположена на участке наибольшего градиента функции  $Y(t)$ . Определение численных значений подобного вида оценок приводит к сложным выражениям и на практике их применение затруднительно.

Подойдем к решению задачи определения  $\Delta t$  и расчета погрешности, возникающей при дискретизации процессов в системе УВД, с позиций решения дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы, на ЭВМ. Пусть некоторые уравнения  $n$ -го порядка адекватно описывают траекторию движения судна. Оценкой  $\Delta t$  будем считать шаг дискретизации при решении этих уравнений на ЭВМ. Погрешности решения уравнений на ЭВМ будут оценкой погрешностей дискретного представления траекторий при моделировании по заданной концепции. Произведем оценку  $\Delta t$  и  $\delta_{MO}^*$ . Пусть траектория движения ВС описывается оператором  $X(j\omega)$ , представляющим собой дифференциальное уравнение  $n$  порядка, и этот оператор решается на ЭВМ с передаточной функцией  $U^*(j\omega)$  одним из методов численного  $n$ -кратного интегрирования. Обозначим передаточную функцию идеального интегратора через  $U(j\omega)$ . На выходе моделирующей ЭВМ и детерминированной модели (рис. 1) имеем соответственно:

$$\begin{aligned} Y^*(p) &= (U^*)^n(p)X(p); \\ Y(p) &= U^n(p)X(p), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $p = j\omega$ .

Разность  $\Delta Y(p) = Y^*(p) - Y(p)$  выражает погрешность реализации оператора  $X(p)$  на ЭВМ.

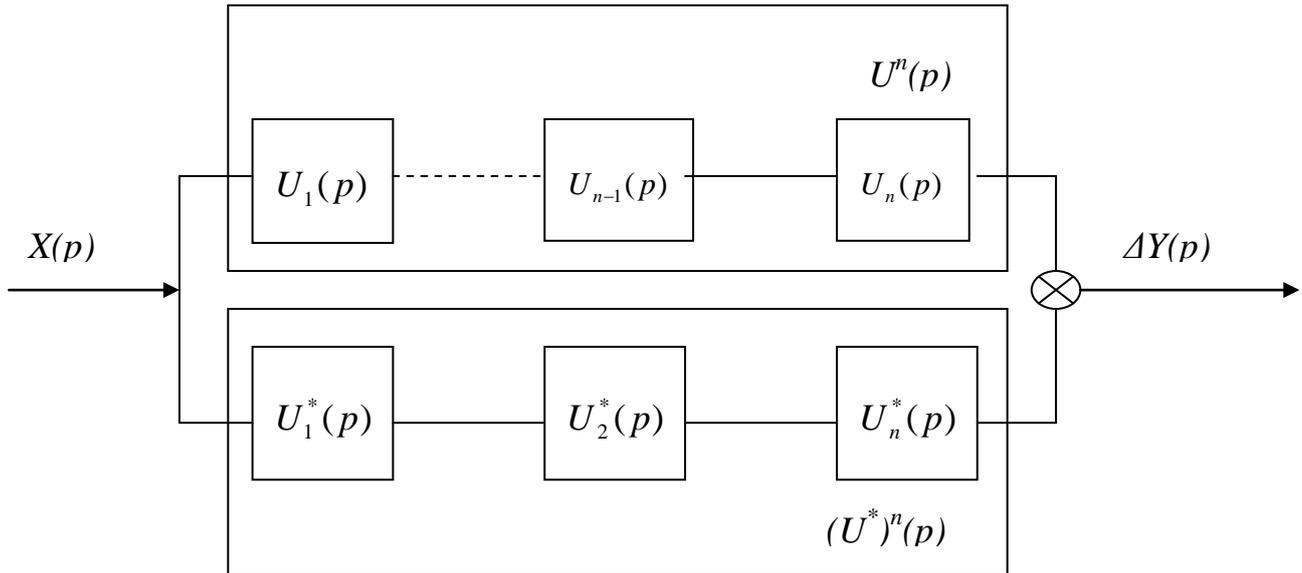


Рис. 1. Определение погрешности операторов

В дальнейшем для удобства преобразований и получения численных результатов в качестве оценки будем использовать пронормированное по  $\overline{Y^2(p)}$  значение квадрата средней квадратической погрешности, определяемое выражением

$$(\delta_{MOO}^*)^2 = \frac{\overline{\Delta Y^2(p)}}{Y^2(p)}, \tag{13}$$

где  $\overline{\Delta Y^2(p)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \Delta Y_n^2(p)$ .

Положим, что оператор, описывающий траекторию движения ВС, имеет частотный спектр, ограниченный частотой  $\omega_c$ . Переходя к непрерывной переменной и производя усреднение на интервале  $[0, \omega_c]$ , имеем

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \frac{\int_0^{\omega_c} Y^*(p) - Y(p) d\omega}{\int_0^{\omega_c} |Y(p)|^2 d\omega}. \tag{14}$$

Обозначая  $\frac{U^{*n}(p)}{U^n(p)} = v^n(p)$  и используя соотношение (12), можно получить

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \frac{\int_0^{\omega_c} |X(p)U^n(p)|^2 [v^n(p) - 1]^2 d\omega}{\int_0^{\omega_c} |X(p)U^n(p)|^2 d\omega} = \frac{\int_0^{\omega_c} f(p)g(p)d\omega}{\int_0^{\omega_c} g(p)d\omega}. \tag{15}$$

Если положить, что функции  $f(p)$  и  $g(p)$  непрерывны на интервале  $[0, \omega_c]$  и  $g(p) \geq 0$  на  $[0, \omega_c]$  (или  $g(p) \leq 0$  на  $[0, \omega_c]$ ), то согласно теореме о среднем значении справедливо

$$\int_0^{\omega_C} f(p)g(p)d\omega = \overline{f(p)} \int_0^{\omega_C} g(p)d\omega. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (15), получим оценку  $\delta_{MOO}^*$  в виде

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 \cong |v^n(p) - 1|. \quad (17)$$

Представляя комплексную величину  $v^n(p)$  через ее модуль и аргумент, можно записать

$$v(j\omega) = \frac{U^*(j\omega)}{U(j\omega)} = v(\omega)e^{j\psi(\omega)}, \quad (18)$$

где  $\psi(\omega) = \arg U^*(j\omega) - \arg U(j\omega)$ .

С переходом к вещественной переменной (17) принимает вид

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \left| [v(\omega) \cos \psi(\omega)]^n - 1 \right|. \quad (19)$$

Исследуем  $\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2$  для  $n=1$ . Из выражения (19) следует, что  $\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = 0$  при  $\omega = 0$ , так как  $v(0) = 1$ , т.е. операторы, реализующие частотно независимые линейно меняющиеся или постоянные во времени траектории перемещения, не содержат погрешности цифровой реализации, что очевидно. С увеличением  $\omega$   $v(\omega)$  отклоняется от 1, а  $\psi(\omega)$  от нуля. Исходя из этих рассуждений, а также с учетом расчетов, представленных на рис. 2, 3, 4, следует, что  $\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2$  в пределах  $0 < \omega < \omega_C$  является монотонно возрастающей функцией. Если заменить  $\omega$  на  $\omega_C$ , то можно получить оценку погрешности сверху. Используя известное выражение для передаточной функции интегратора в виде

$$U(j\omega) = \frac{1}{\omega} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (20)$$

и выражения для  $U^*(p)$ , например, для способов прямоугольников, трапеций, 1/3 Симпсона и

3/8 Симпсона [2] и обозначая  $\frac{\omega\Delta t}{2} = b$ , окончательно легко приводится к виду:

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \left| [b \operatorname{ctg} b]^n - 1 \right|^2; \quad (21)$$

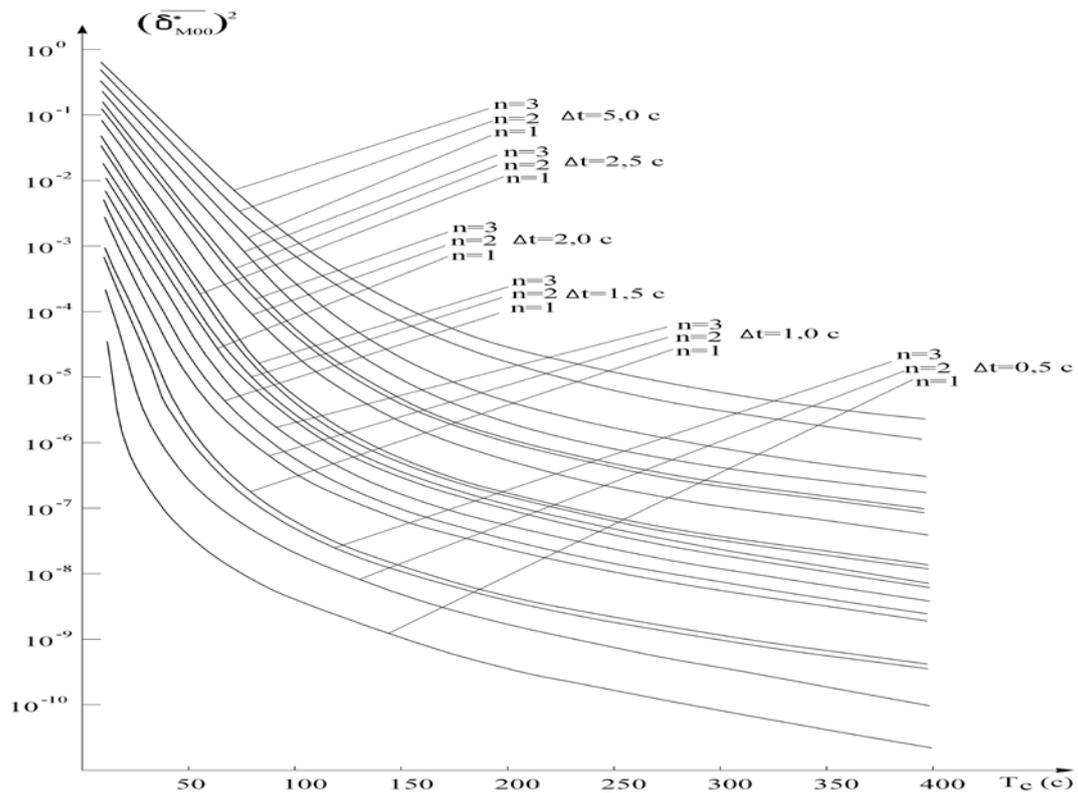
$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \left| \left[ \frac{2b}{3} \left( \frac{2 + \cos 2b}{\sin 2b} \right) \right]^n - 1 \right|^2; \quad (22)$$

$$\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = \left| \left[ \frac{3b \cos^3 b}{\sin b (4 \cos^2 b - 1)} \right]^n - 1 \right|. \quad (23)$$

Выражение (21) соответствует оценке для способов прямоугольников и трапеций, (22) и (23) соответственно для способов 1/3 Симпсона и 3/8 Симпсона.

На рис. 2, 3, 4 представлены результаты расчетов зависимостей  $\left(\overline{\delta_{MOO}^*}\right)^2 = f(\Delta t, T_C, n)$ , где  $T_C = 2\pi/\omega_C$ ,  $n=1,2,3$ , в качестве численных предельных значений  $T_C$  взяты примерные данные движения ВС по дуге окружности при моделировании некоторого условного маневра.

Как указывалось ранее, моделирование может быть успешно проведено, если погрешности цифровой реализации операторов значительно меньше, чем погрешности определения координат в моделируемой УВД. Выбор величины  $\Delta t$  требует оценки величины  $\delta_{MC}$ .



**Рис. 2.** Оценка погрешности  $(\overline{\delta_{MOO}^*})^2$  с использованием метода прямоугольников и трапеций

Представленный в этом разделе способ оценки погрешностей решения операторов при моделировании процессов УВД и выбора  $\Delta t$  является универсальным и не зависит от метода моделирования движения ВС, и позволяет учесть сложность, исходя из  $n$ . Проиллюстрируем вышеизложенный метод примером. Допустим оператор  $X(p)$  решается относительно текущей дальности  $D_T$ . Пусть средняя квадратичная погрешность определения дальности при  $D_T = 100$  км равна  $\delta_{MC} = 40$  м, пронормированный квадрат средней квадратичной погрешности будет  $\overline{\delta_{MC}^2} = 1 \cdot 10^{-4}$ . Если считать, что  $\overline{\delta_{MC}^2} = 10^2 (\overline{\delta_{MOO}^*})^2$ , то условия моделирования определяются неравенством  $(\overline{\delta_{MOO}^*})^2 < 10^{-6}$ . Из графиков рис. 2 следует, что при  $T_c > 60$  с, при  $\Delta t = 0,5$  с возможно применение метода трапеций при  $n = 3$ . Для этого же метода при  $\Delta t = 1$  с выполняются условия моделирования только при  $n = 1$ .

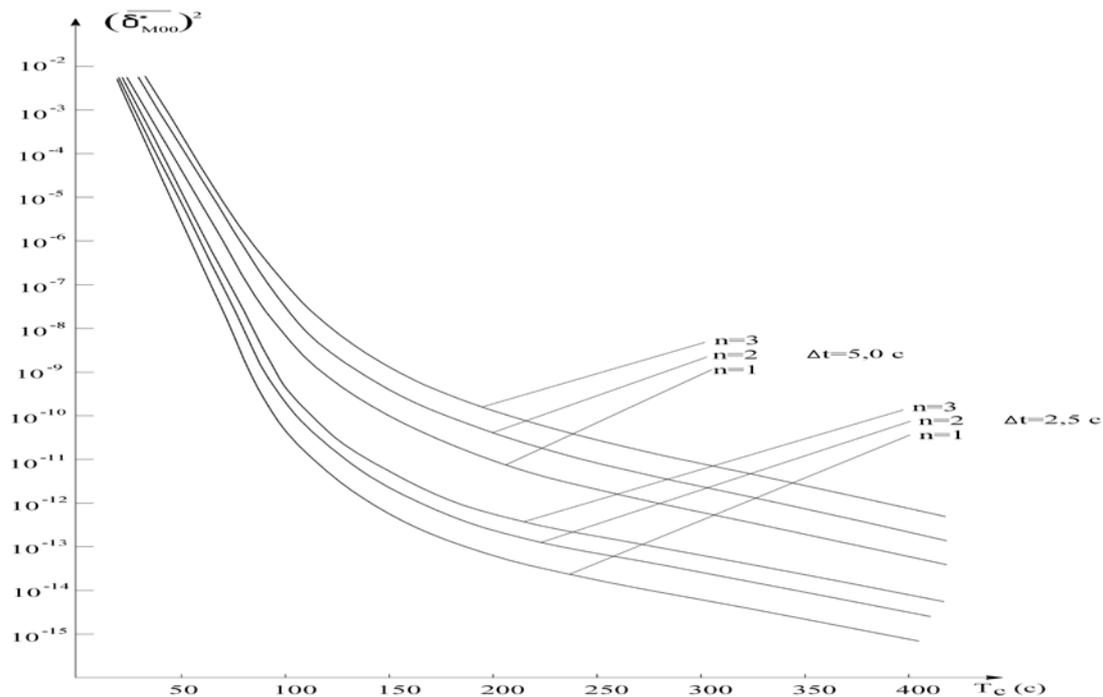


Рис. 3. Оценка погрешности  $(\overline{\delta_{M00}^*})^2$  с использованием метода Симпсона 1/3

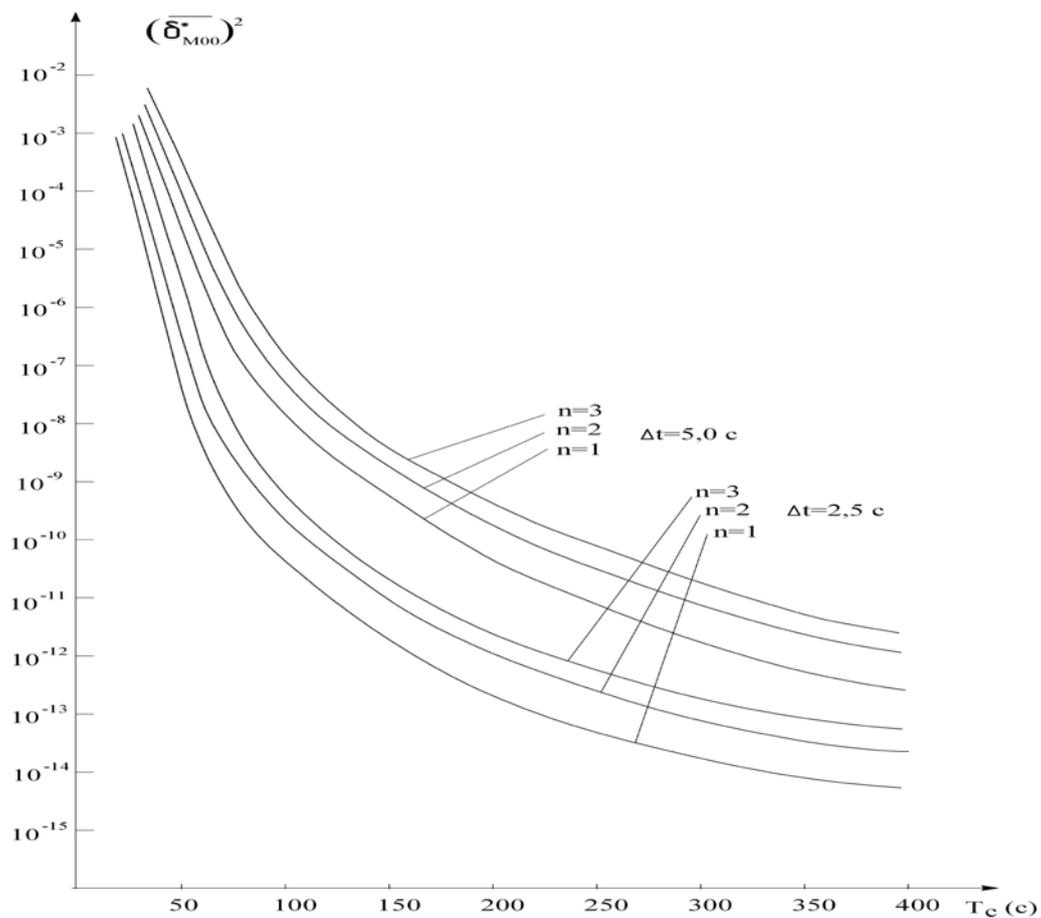


Рис. 4. Оценка погрешности  $(\overline{\delta_{M00}^*})^2$  с использованием метода Симпсона 3/8

Таким образом, произведена оценка погрешностей цифрового моделирования процессов УВД. Полученные оценки позволяют обоснованно производить выбор шага дискретизации с учетом возможностей вычислительных ресурсов, способа реализации операторов модели, порядка дифференциальных уравнений, описывающих траекторию движения ВС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко Г.В., Крыжановский Г.А., Терешенко М.М. Моделирование в профессиональной подготовке летного состава гражданской авиации // Итоги науки и техники. Воздушный транспорт. - 1992. - № 25.
2. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. - М.: Наука, 1977.

#### METHOD OF CALCULATION JF RADAR CONTROL OPERATORS TRAINING ND MODELING COMPLEXES FUNCTIONING DISCRETIZATION STEP

**Filin A.D.**

Method of discretization step definition at the organization of ATC controllers training and modeling complexes functioning is proposed.

**Key words:** ATC processes modeling, ATC controller training simulator, modeling error.

#### Сведения об авторе

**Филин Александр Дмитриевич**, 1950 г.р., окончил ЛВИМУ им. адмирала С.О. Макарова (1972), кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора Всероссийского НИИ радиоаппаратуры, автор 65 научных работ, область научных интересов – радиолокация, радионавигация, системы УВД.

УДК 621.396.98.004.1

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ

Д.А. ЗАТУЧНЫЙ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Логвиным А.И.**

В данной статье решается задача оценки вероятности безотказной работы передачи информации на основании априорной информации о надёжности её элементов. Приводится метод оценки вероятности безотказной работы на основании известного метода для последовательной вспомогательной структуры.

**Ключевые слова:** вероятность безотказной работы, вспомогательная структура, функция надёжности.

### 1. Введение

Достоверная и быстрая передача информации приобретает большое значение в наше время. Это связано не только с огромным объёмом информации, которую должен получить потребитель, но и с тем обстоятельством, что в некоторых случаях неверная передача информации может привести к катастрофическим последствиям.

### 2. Метод вспомогательной структуры

Сформулируем задачу. Пусть у нас имеется система, состоящая из  $m$  различных типов элементов. Введём величину  $p_i$ , характеризующую параметр надёжности  $i$ -го элемента (вероятность того, что не произойдёт отказ, т.е. непереход или искажённая передача информации). Надёжность всей сети связи характеризуется функцией  $R(p)$  - вероятности того, что вся система не откажет в момент передачи информации. Требуется с заданной вероятностью оценки  $\gamma$  оценить  $R(p)$ , т.е. найти величину  $\underline{R}$ , такую что  $\underline{R} = \min R(p)$  при всех значениях параметров надёжности элементов. Одним из точных методов, т.е. таких методов, которые точно обеспечивают вероятность оценки  $\gamma$ , является метод вспомогательной структуры.

Метод вспомогательной структуры был рассмотрен в общем виде в [2]. Суть метода состоит в следующем. Предположим, что на основе одного и того же набора элементов с параметрами надёжности  $p = (p_1, p_2 \dots p_m)$  построены две различные системы с функциями надёжности  $R(p)$  и  $R'(p)$ , которые будем называть соответственно основной и опорной. Предположим, что для надёжности опорной системы известна оценка надёжности, построенная тем или иным образом, например, на основе испытаний (не обязательно безотказных), проводившихся для этих систем.

Рассмотрим следующую задачу: требуется найти оценку  $\underline{R}$  с заданной вероятностью  $\gamma$  для надёжности основной системы, исходя из известной оценки  $\underline{R}'$  для надёжности опорной системы.

Рассмотрим случай, когда в качестве опорной используется последовательная в смысле надёжности система, т.е. система, состоящая из элементов соединённых последовательно без наличия любого вида резерва (нагруженного или ненагруженного) по любому из этих элементов. Функция надёжности такой системы имеет вид

$$R'(p) = \prod_{i=1}^m p_i^{l_i}, \quad (1)$$

где  $l_i$  - это количество элементов  $i$ -го типа в системе.

Её оценка надёжности  $\underline{R}'$  находится любым известным в настоящее время методом для нахождения оценки надёжности последовательной структуры, например методом Линдстрема-Маддена, рассмотренном ниже.

Предположим, что по каждому  $i$ -му элементу информация должна была передаваться  $N_i$  раз и  $d_i$  раз из этого числа информация не передавалась или передавалась искажённо. В качестве оценки с вероятностью  $\gamma$  для надёжности всей системы берётся оценка надёжности для одного отдельно взятого типа элемента с минимальным объёмом использования в предположении, что для него получено так называемое “приведённое” число отказов, вычисляемое по формуле

$$D_m = N_m (1-P), \quad (2)$$

где  $P$  - это точечная оценка надёжности опорной сети, вычисляемая по формуле

$$P = \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{d_i}{N_i}\right). \quad (3)$$

Нахождение оценки надёжности основной сети связи сводится к задаче нахождения минимума  $\underline{R} = \min R(p)$  при ограничениях

$$\prod_{i=1}^m p_i^{l_i} \geq \underline{R}'. \quad (4)$$

Удобно сделать замену переменных  $p_i = e^{-z_i}$ . Далее задача заключается в нахождении максимума функции  $f(z)$  при ограничении

$$l_1 z_1 + \dots + l_m z_m \leq -\ln \underline{R}'.$$

Максимум достигается в одной из точек вида

$$z^{(i)} = (0, \dots, 0, z_i, 0, \dots, 0),$$

где  $z_i = -\left(\frac{1}{l_i}\right) \ln \underline{R}'$ .

Рассмотрим случай, когда в качестве основной рассматривается система, состоящая из элементов соединённых последовательно-параллельно, т.е. каждый тип элемента соединён последовательно с другим типом и по каждому типу элемента предусматривается некоторый нагруженный резерв. В этом случае оценка надёжности находится по формуле

$$\underline{R} = 1 - \left(1 - \left(\underline{R}'\right)^{\frac{1}{l_i}}\right)^{n_i}. \quad (5)$$

Это следует из того, что функция надёжности любой последовательно-параллельной структуры вычисляется по формуле

$$R(p) = \prod_{i=1}^m (1 - q_i^{n_i}). \quad (6)$$

### 3. Модернизация метода вспомогательной структуры

Модернизация метода вспомогательной структуры для получения более качественной оценки надёжности системы достигается путём введения ни одной, а нескольких вспомогательных структур.

Функция надёжности такой системы имеет вид

$$R(p) = \prod_{i=1}^m (1 - (1 - p_i)^{n_i}). \quad (7)$$

Будем находить минимум этой функции по области, заданной ограничениями:

$$\begin{aligned} \sum l_i z_i &\leq -\ln \underline{R}'; \\ z_1 \leq z_2 \leq \dots \leq z_i \leq \dots \leq z_m. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка надёжности такой системы при заданной дополнительной информации такого рода будет находиться как минимальная из величин

$$\left\{ \left[ 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_m}} \right]^{n_m}, \left[ \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_{m-1} + l_m}} \right)^{n_{m-1}} * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_{m-1} + l_m}} \right)^{n_m} \right], \dots, \right. \\ \left. \left[ \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_1} * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_2} * \dots * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_m} \right] \right\}. \quad (9)$$

Если область ограничений имеет вид  $\sum_{i=1}^m l_i z_i \leq -\ln R'$ ,  $z_2 \leq z_1 \leq \dots \leq z_{i+1} \leq z_i \leq \dots \leq z_m$ , то величины, из которых ищется минимальная, изменяются следующим образом:

$$\left\{ \left[ 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_m}} \right]^{n_m}, \dots, \left[ \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_{i+1} + l_m}} \right)^{n_{i+1}} * \right. \right. \\ \left. \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_{i+1} + l_m}} \right)^{n_i} * \dots * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{l_{i+1} + l_m}} \right)^{n_m} \right], \dots, \right. \\ \left. \left[ \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_2} * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_1} * \dots * \left( 1 - \left( 1 - R' \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^m l_i}} \right)^{n_m} \right] \right\}. \quad (10)$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тёскин О.И. Точные доверительные границы для надёжности уменьшенных систем по безотказным испытаниям // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. - 1979. - № 4.
2. Павлов И.В. Статистические методы оценки надёжности сложных систем по результатам испытаний. - М.: Радио и связь, 1982.

#### PROBABILITY OF UNFAILED WORK'S EVALUATION FOR INFORMATION'S BROADCASTING

Zatuchny D.A.

In this article the problem of probability of unfailed work's evaluation for information's broadcasting based on apriori information about element's reliability is solved. Method of of probability of unfailed work's evaluation this system based on known method for successive auxiliary structure is reduced.

**Key words:** probability of unfailed work, auxiliary structure, function of reliability.

#### Сведения об авторе

**Затучный Дмитрий Александрович**, 1970 г.р., окончил Московский государственный педагогический университет им. В.И. Ленина (1992), кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭРЭСВТ МГТУ ГА, автор 48 научных работ, область научных интересов – навигация, организация воздушного движения.

УДК 621.396.96

## ОСОБЕННОСТИ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В САМОЛЕТНЫХ СТАНЦИЯХ ДАЛЬНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

С.Н. ВАЙС

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

Рассмотрены структура и некоторые виды алгоритмов адаптивной пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов, применяемых для подавления помех от земной поверхности, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) в самолетных импульсно-доплеровских РЛС. Предложена блок-схема адаптивной обработки для фильтрации помех от земной поверхности, принимаемых по вертикальным лепесткам ДНА в сантиметровом диапазоне длин волн для многоканальных антенных решеток.

**Ключевые слова:** дальнее радиолокационное обнаружение, адаптивная пространственно-временная обработка, импульсно-доплеровская РЛС.

### Введение

Для проведения адаптивной пространственно-временной обработки необходимо иметь адаптивную антенную решетку и адаптивный процессор [1]. В адаптивных антеннах в большей степени применяется пространственное разделение элементов антенны для получения параллельного набора выборок сигнала, а не частично обработанные или имеющие временную задержку версии одномерного входного сигнала. При помощи адаптивной антенной решетки происходит выделение сигналов, принимаемых с заданных направлений, с минимальными искажениями при воздействии помех. Система работает при известном спектре и направлении прихода сигнала, но при неизвестной структуре поля шумового источника. Термин «адаптивная антенна» относится к методам создания в пространстве нулей диаграммы направленности, снижающим влияние непреднамеренных помех по соседнему каналу или умышленного глушения. Для генерации нулей адаптивной антенной используется конфигурация процессора, очень похожая на адаптивный фильтр. В наипростейшей форме у него имеются два выхода для подключения главной и вспомогательной антенн. Если сигналы являются сверхвысокочастотными, то они обычно преобразуются на промежуточную частоту, но перед суммированием с сигналом основного канала сигнал вспомогательного канала умножается на соответствующие весовые коэффициенты с помощью комплексной взвешивающей схемы. Для подавления помех комбинированный выходной сигнал поступает в цепь обратной связи и вычисляется его корреляция с сигналом вспомогательного канала для получения адаптивных весовых коэффициентов, минимизирующих сигнал, присутствующий в обоих каналах.

Целью работы является анализ некоторых видов алгоритмов адаптивной пространственно-временной обработки сигналов для подавления помех от подстилающей поверхности, принимаемых по боковым лепесткам ДНА в самолетных импульсно-доплеровских РЛС, а также внесение и обоснование предложений по фильтрации помех в сантиметровом диапазоне длин волн для многоканальных антенных решеток.

### Основные виды алгоритмов для подавления помех в РЛС ДРЛО

Для адаптивных антенн, основанных на полностью фазируемых антенных решетках с цепью адаптивного управления каждым отдельным элементом, необходимо, чтобы отдельный импульс искомого сигнала вычитался из комбинированного выходного сигнала, прежде чем он в виде сигнала ошибки поступит в цепь обратной связи. Подобные N-элементные адаптивные

антенные решетки могут обрабатывать сигнал на фоне совокупности источников помех, число которых равно  $N-1$ .

Применение адаптивной решетки целесообразно в тех случаях, когда помехи имеют некоторую степень пространственной корреляции. Обработка сигналов происходит в адаптивном процессоре, который автоматически настраивается в соответствии с заложенным в него алгоритмом. Вся обработка происходит в реальном масштабе времени. В связи с тем, что тип, а также связь процессора с антенной решеткой известна, то следующим этапом является разработка алгоритма адаптации, который обеспечит получение заданного коэффициента усиления решетки в определенном направлении наблюдения и одновременно установку направления нулевого приема на мешающие источники шумов. Этап выбора и построения оптимального алгоритма адаптации переменных коэффициентов является достаточно сложной задачей, которая связана с большими затратами вычислительных ресурсов и обеспечением работы устройства в реальном времени. Данный этап неразрывно связан с процедурой конструирования адаптивного фильтра, где необходимо выбрать его класс (одномерный, двумерный, КИХ, БИХ). Основной задачей адаптивного фильтра является повышение качества приема и обработки сигнала. При этом в связи с тем, что характеристики фильтра изменяются во времени, требования к амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) фильтра не предъявляются.

На рис. 1 показан принцип работы адаптивного фильтра.

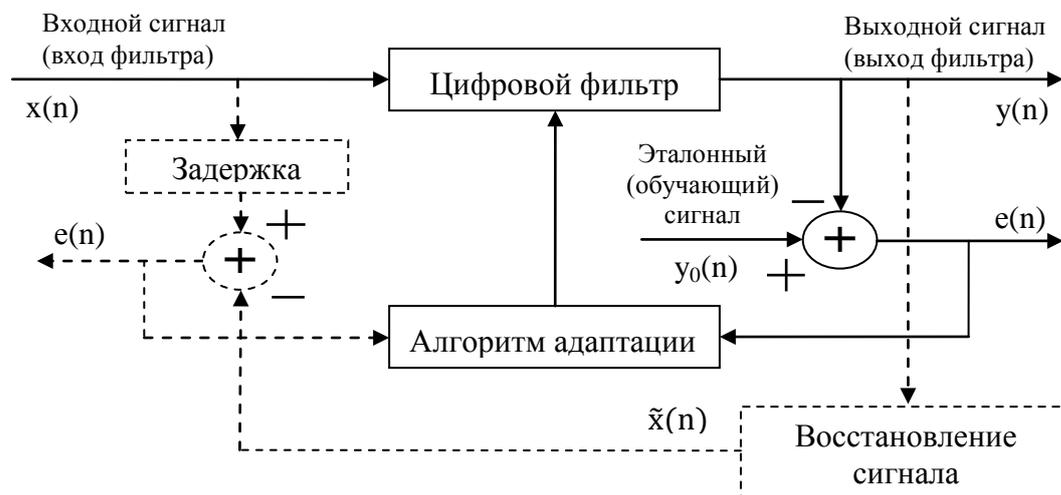


Рис. 1. Структурная схема адаптивного фильтра

Основной сигнал фильтра  $y(n)$ , отличающийся от эталонного  $y_0(n)$ , вычитается из  $y_0(n)$ . Получаемая ошибка  $e(n)$  подается на устройство адаптации, которое так изменяет коэффициенты цифрового фильтра, чтобы свести  $e(n)$  к минимуму.

В более сложных системах с целью получения лучших характеристик сигнала  $y(n)$  используется иной принцип адаптации, который получил название обратной. Этот вариант показан на рис. 1 штриховыми линиями. По сигналу  $y(n)$  восстанавливается сигнал  $\tilde{x}(n)$ , который будет отличаться от входного сигнала  $x(n)$  на величину ошибки  $e(n)$ , которая управляется адаптацией. Введение линии задержки необходимо для временного согласования сигналов  $x(n)$  и  $\tilde{x}(n)$ .

Процесс адаптации может быть как одноцикловым (одношаговым), так и итеративным, когда адаптация осуществляется шаг за шагом. Основными характеристиками адаптации являются скорость сходимости при заданной ошибке и сложность (объем вычислений). К сожалению, не существует каких-либо универсальных алгоритмов, позволяющих производить адаптивную пространственно-временную обработку, поэтому для успешного применения этой техники необходимо разрабатывать специальные алгоритмы, по которым адаптивный процессор будет обрабатывать получаемую информацию. Чаще всего применяют алгоритмы, основанные на

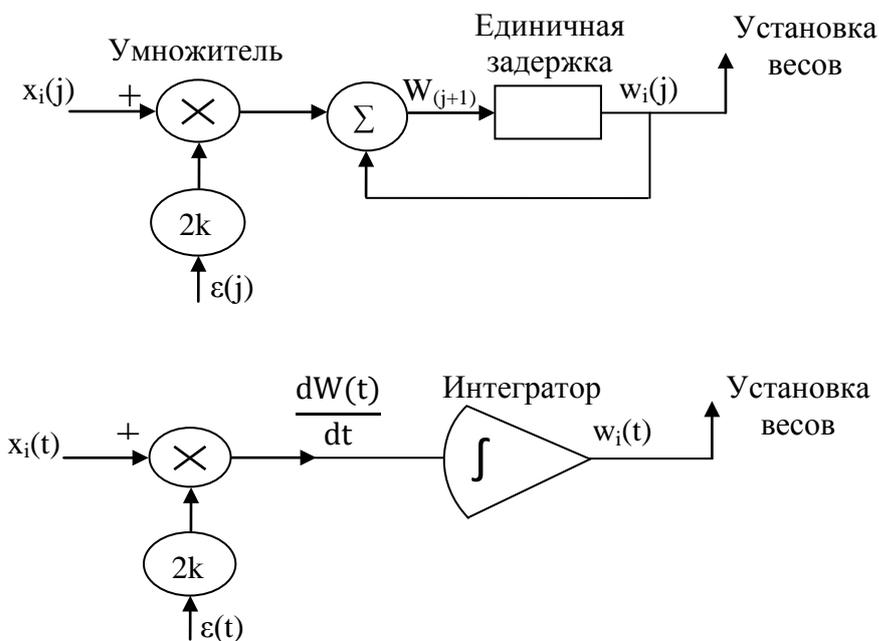
одном из двух критериев: минимума среднеквадратической ошибки (СКО) и метода наименьших квадратов.

Процесс адаптации основан на минимизации среднего значения квадрата ошибки. Этот алгоритм построен на методе скорейшего спуска. Изменения вектора весовых коэффициентов производятся в направлении полученной оценки градиента (вектора).

Один из методов нахождения оценки градиента функции среднего квадрата ошибки состоит в определении градиента для одиночного временного отсчета квадрата ошибки.

Для осуществления адаптации на адаптивный элемент необходимо подать «требуемый» сигнал  $d(t)$  (в случае аналоговой системы) или  $d(j)$  (в случае дискретной системы). Разность между требуемым выходным сигналом и действительным выходным сигналом дает сигнал ошибки.

Каждое последующее значение вектора весовых коэффициентов находится путем добавления к данному значению вектора  $W$  слагаемого в виде вектора входных сигналов, умноженного на величину ошибки. При оптимальном выборе весовых коэффициентов градиент равен нулю. Он непосредственно применим в качестве формулы адаптации весовых коэффициентов в дискретных системах. На рис. 2 приведена блок-схема, с помощью которой полученное соотношение реализуется для одной составляющей  $w_i$  вектора  $W$ .



**Рис. 2.** Блок-схема устройства, реализующего алгоритм НСКО:  
 а – дискретная реализация; б – аналоговая реализация;  $\epsilon(t)$  – сигнал ошибки

Положительной стороной данного алгоритма является, то, что метод не требует возведения в квадрат, усреднения или дифференцирования с целью нахождения градиентов функций среднего квадрата ошибки.

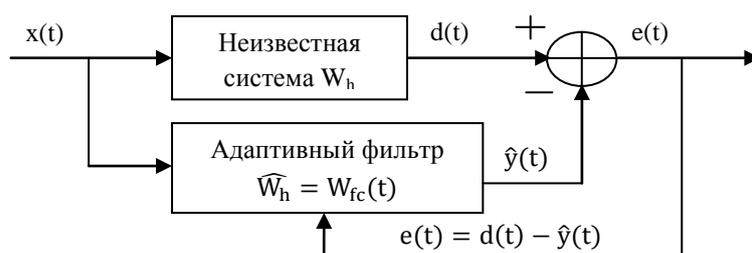
Помимо вышеописанного алгоритма НСКО, существуют и другие алгоритмы адаптации. Некоторые из них могут существенно уменьшить сложность аппаратуры в ряде реализаций схем адаптации. Один из методов адаптации, который может быть легко реализован с помощью электронных устройств, основан на релаксационном алгоритме Саутелла [2]. В этом алгоритме применяется такой же сигнал ошибки, что и при методе НСКО. Для определения нужных значений весовых коэффициентов используется оценка среднего квадрата ошибки, которая находится путем возведения в квадрат и усреднения на конечном интервале времени этого сигнала

ошибки. При релаксационном алгоритме в каждый данный момент времени изменяется только один весовой коэффициент, их регулировка производится в циклической последовательности. Каждый весовой коэффициент изменяется таким образом, чтобы минимизировать измеренный средний квадрат ошибки. Этот метод отличается от одновременной регулировки весовых коэффициентов в соответствии с алгоритмом скорейшего спуска НСКО. Можно показать, что релаксационная процедура дает рассогласование, которое увеличивается как квадрат числа весовых коэффициентов, в отличие от алгоритма НСКО, при котором рассогласование с увеличением числа весовых коэффициентов возрастает лишь линейно. При заданном значении рассогласования продолжительность процесса адаптации при релаксационном методе увеличивается как квадрат числа весовых коэффициентов.

Еще одним алгоритмом, основывающимся на использовании в качестве критерия оценки среднеквадратической ошибки, является алгоритм Винера.

Адаптивный фильтр Винера - это линейный оптимальный дискретный во времени фильтр, имеющий способность адаптироваться в стационарных линейных системах, но не отвечающий требованиям к нестационарным и нелинейным системам [3].

Обычно, фильтр Винера - это линейный оптимальный дискретный фильтр, основанный на минимизации целевой функции, известной как функция среднеквадратической погрешности. Она основана на комплексном стохастическом процессе, где фильтр устанавливается в зависимости от его весовой функции (передаточной функции). Схематически адаптивный алгоритм пространственно-временной обработки с фильтром Винера представлен на рис. 3.

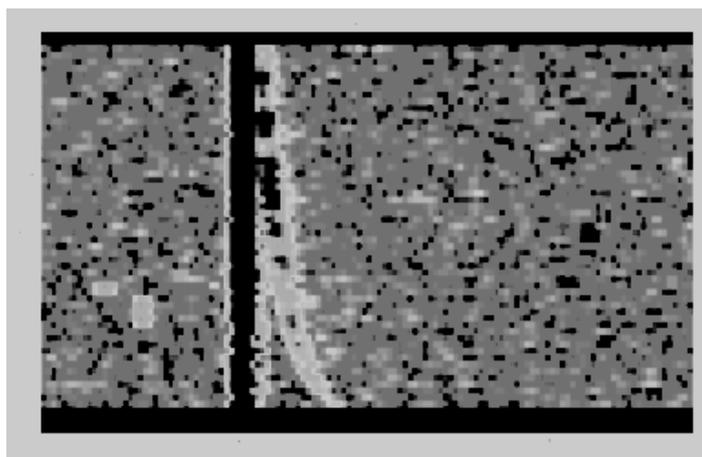


**Рис. 3.** Адаптивная пространственно-временная обработка с адаптивным фильтром Винера

Главное преимущество фильтра Винера - это простота вычисления и возможность подавления шума в линейной и стационарной среде. Более того, оптимальная обработка фильтра Винера включает в себя только статистический показатель второго порядка, который, на самом деле, приводит к теории линейной фильтрации для широкого применения.

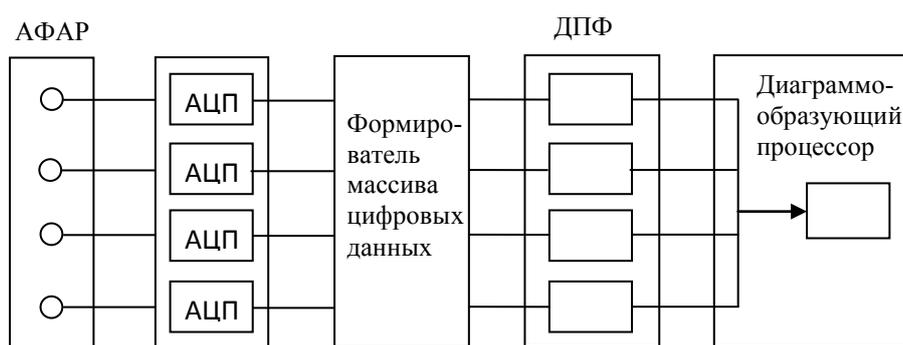
Главная цель этого алгоритма отфильтровать шум, имеющий статистический характер. Более того, алгоритм с адаптивным фильтром Винера - это оптимальный алгоритм, если допустить, что сигнал и аддитивный шум стационарны и линейные стохастические процессы и их спектральные характеристики или автокорреляция и кросскорреляция известны.

В связи с этим, можно сделать вывод, что рассмотренные алгоритмы подходят лишь для РЛС бокового обзора, для которых характерен совершенно иной вид помехи, связанный лишь с отражениями по главному лучу ДНА. Данные РЛС работают в дециметровом диапазоне длин волн и имеют однозначность в определении дальности, так как работают на низкой частоте повторения импульсов. Адаптивная пространственно-временная обработка в данных РЛС связана с подавлением больших азимутальных боковых лепестков ДНА, возникающих, вследствие конструкции антенны. Для РЛС, работающих в сантиметровом диапазоне, помеха имеет вид, показанный на рис. 4.



**Рис. 4.** Сечение для одного из значений частоты двумерной модели сигнала в сантиметровом диапазоне волн

Отражения по главному максимуму простираются практически во всём доплеровском диапазоне и на рис. 4 имеют вид прямой линии, характеризующей мощные отражения от земной поверхности. Помеха, которую необходимо подавить, коррелирована, является кривой линией постоянной доплеровской частоты, и при сканировании по азимуту будет смещаться в область как отрицательных, так и положительных доплеровских частот, следуя за главным максимумом. Отчетливо видно, что помеха занимает несколько частотных (по оси абсцисс) и дальностных (по оси ординат) каналов. Появление данной помехи связано с наличием угломестных боковых лепестков ДНА. Очевидно, что разрабатываемый фильтр должен иметь двумерную характеристику для подавления помехи в области «угол места – частота». Одним из элементов для реализации работы алгоритма является использование части полотна активной фазированной антенной решетки (АФАР) для формирования двух компенсационных лучей, работающих на прием в положительной и отрицательной областях доплеровских частот, с целью выделения помехи по углу места. Следующим элементом фильтрации является обработка принятых сигналов по частоте в соответствии с угломестными характеристиками сигналов. Упрощенная блок-схема предлагаемой обработки принимает вид, показанный на рис. 5.



**Рис. 5.** Блок-схема адаптивной пространственно-временной обработки

Здесь, после преобразования сигнала в цифровую форму происходит формирование массива цифровых данных в виде матриц радиолокационных данных (номер периода повторения по строкам и неоднозначная дальность в столбцах) для каждого элемента антенной решетки. Далее происходит частотная обработка при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ) с целью разбиения на частотные каналы, устранения белого шума и дальнейшего управления ДНА. Получаем матрицы для каждого элемента антенной решетки в виде дальность по строкам - номер частоты по столбцам. Диаграммообразующий процессор формирует пространственные ха-

характеристики по углу места в каждом частотном канале, используя полученные ранее данные в виде матриц дальность-доплеровская частота, преобразуя их в массив угол места-доплеровская частота.

### **Заключение**

Предложенная схема обработки требует проведения математического моделирования. При этом при проведении моделирования необходимо подавать на вход обработки не только смоделированное входное воздействие в виде помехи, но и целесообразно использование банка реальных радиолокационных записей.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. Уидроу, Мантей, Гриффитс, Гуд.** Адаптивные антенные системы // Труды Института инженеров по электронике и радиотехнике. – 1967. – № 12. – Декабрь.
- 2. R.V. Southwell.** Relaxation Methods in Engineering Science. – London: Oxford University Press, 1940.
- 3. Mark S. Schmaltz, Gerhard X. Ritter, Junior Barrera, Jaakko T. Astola.** A comparison study between Wiener and adaptive state estimation (STAP-ASE) algorithms for space time adaptive radar processing, Ryerson University (Canada). – 2010.

### **CHARACTERISTICS PROPERTIES OF SPACE-TIME ADAPTIVE PROCESSING USES FOR AIRBORNE RADAR OF DISTANT EARLY WARNING**

**Vays S.N.**

Structure and some algorithms forms of radar impulse STAP that are used for noise cancellation from the earth surface are examined. Block scheme of adaptive processing for noise filtration from the earth surface in centimeter wave for multichannel spatial pathway antenna is recommended.

**Key words:** airborne early warning, space-time adaptive processing, pulse Doppler radar.

### **Сведения об авторе**

**Вайс Станислав Николаевич**, 1987 г.р., окончил МГТУ ГА (2010), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – радиолокация.

УДК 621.396.933:629.783

## ОБ ОРИЕНТАЦИИ ОСЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКОВ ИЗБЫТОЧНЫХ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ю.И. КОБЫЛКИН, М.Ю. СОСНОВСКИЙ

Статья представлена доктором технических наук Горбачевым О.А.

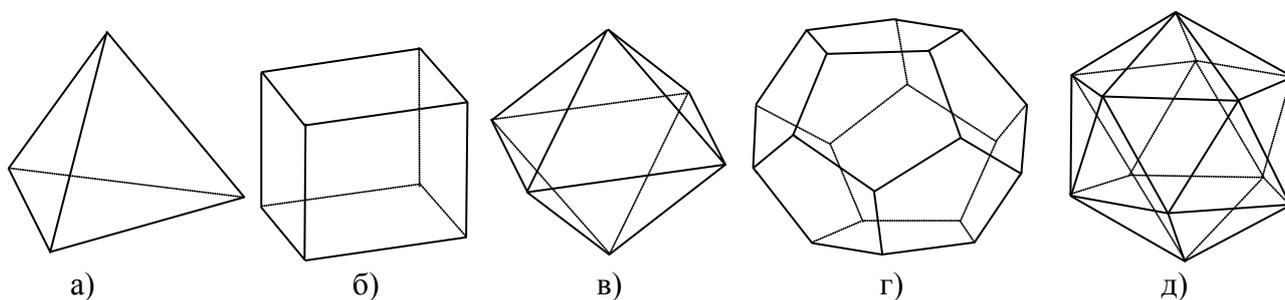
Рассматриваются вопросы оптимизации расположения датчиков в измерительном блоке бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС).

**Ключевые слова:** акселерометр, гироскоп, маятник.

Основным путем развития современных инерциальных навигационных систем (ИНС) является БИНС. БИНС имеют значительные преимущества перед платформенными ИНС по стоимости и массогабаритным характеристикам. При этом БИНС обеспечивает точность не хуже, чем платформенная ИНС. Конструкция БИНС позволяет распределить датчики кажущегося ускорения таким образом, что можно строить отдельно блоки акселерометров и гироскопов.

БИНС обладают обширными возможностями в плане резервирования. В настоящее время задача резервирования решается путем включения в состав навигационного комплекса нескольких однотипных ИНС. Для БИНС ту же задачу можно решить путем резервирования на уровне датчиков. Естественно, что в этом случае можно существенно снизить стоимость ИНС. Например, если использовать для построения БИНС шесть акселерометров и шесть гироскопов, оси чувствительности которых не совпадают, то по надежности такая БИНС будет эквивалентна четырем платформам, с общим числом чувствительных элементов (ЧЭ), равным 24.

Данная статья продолжает ряд работ [1; 2], посвященных оптимизации расположения осей чувствительности акселерометров и гироскопов в БИНС с избыточным числом ЧЭ. В работе [1] описано равномерное размещение измерителей, при котором все углы между двумя соседними осями чувствительности измерителей одинаковы. Такое размещение построено на понятии правильного многогранника. Известно [3], что имеется только 5 видов правильных многогранников: тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр, которые состоят из 4 треугольников, 6 квадратов, 8 треугольников, 12 пятиугольников, 20 треугольников, соответственно (рис. 1).



**Рис. 1.** Правильные многогранники:

а) тетраэдр; б) куб; в) октаэдр; г) додекаэдр; д) икосаэдр

При равномерном размещении ЧЭ ось чувствительности каждого датчика должна быть перпендикулярна грани правильного многогранника. Отметим, что поставленная задача может быть решена для 3-х, 4-х, 6-и и 10-и датчиков. В данной работе рассматривается ситуация, когда все датчики имеют разные оси чувствительности, сведенные в одну точку, при этом учитывается, что акселерометры имеют конечные размеры и размещены в трехмерном пространстве.

Такой подход вполне оправдан для платформенных ИНС. Однако для БИНС, в которой датчики ускорения участвуют в угловом движении, данное допущение считается неприемлемым, так как при обработке сигналов акселерометров необходимо учитывать параметры углового движения ЛА и взаимное расположение датчиков.

Следует отметить, что ориентация осей чувствительности акселерометров перпендикулярно граням куба соответствует их взаимно перпендикулярному расположению и применяется в настоящее время для нерезервированных систем.

Исходя из простоты реализуемости алгоритмов диагностики и контроля, будем требовать, чтобы любые три оси чувствительности не лежали в параллельных плоскостях. Легко показать, что при выполнении этого условия половина граней куба, октаэдра, додекаэдра и икосаэдра задействована не будет (рис. 2).

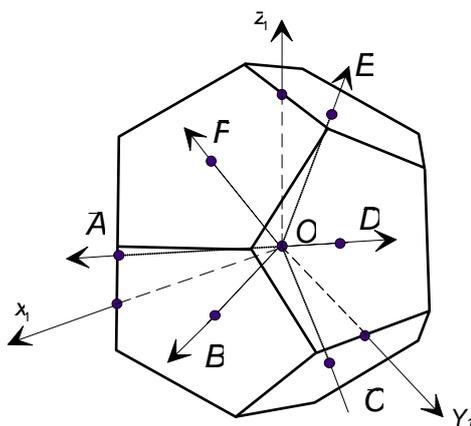


Рис. 2. Додекаэдр

С другой стороны, при расположении осей чувствительности измерителей перпендикулярно граням правильных многогранников выполняются условия минимизации дисперсии ошибок оценки проекций вектора кажущегося ускорения (угловой скорости) в ортогональной плоскости, связанной с летательным аппаратом (ЛА) в геоцентрической системе координат  $Ox_1Y_1Z_1$  [4]. Покажем это, например для акселерометров

$$\hat{A} = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot A^{C.M}, \quad (1)$$

где  $\hat{A}$  – матрица-столбец, оценка вектора кажущегося ускорения  $\vec{a}$  в системе координат  $Ox_1y_1z_1$ ;  $H$  – матрица косинусов осей чувствительности акселерометров в системе координат  $Ox_1y_1z_1$ ;  $A^{C.M}$  – матрица-столбец размерности  $N$ , компонентами которой являются показания акселерометров.

Ковариационная матрица ошибки оценки запишется в виде

$$D[\delta A] = \sigma^2 \cdot (H^T \cdot H)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия аддитивной ошибки каждого акселерометра.

Для оптимального случая [2] матрица  $H^T \cdot H$  – диагональная, а матрица  $H$  такова, что ее столбцы  $H_1, H_2, H_3$  ортогональны (т.к. недиагональные элементы матрицы  $H^T \cdot H$  представляют собой скалярные произведения векторов-столбцов матрицы  $H$ ), и  $N$ -мерные векторы-столбцы  $H_1, H_2, H_3$  оптимальной матрицы  $H$  имеют одинаковую норму, равную  $\sqrt{\frac{N}{3}}$ .

В работе [5] для учета геометрического расположения акселерометров относительно центра измерительного блока получено уравнение маятникового акселерометра на подвижном основании с произвольным расположением точки подвеса маятника (рис. 3).

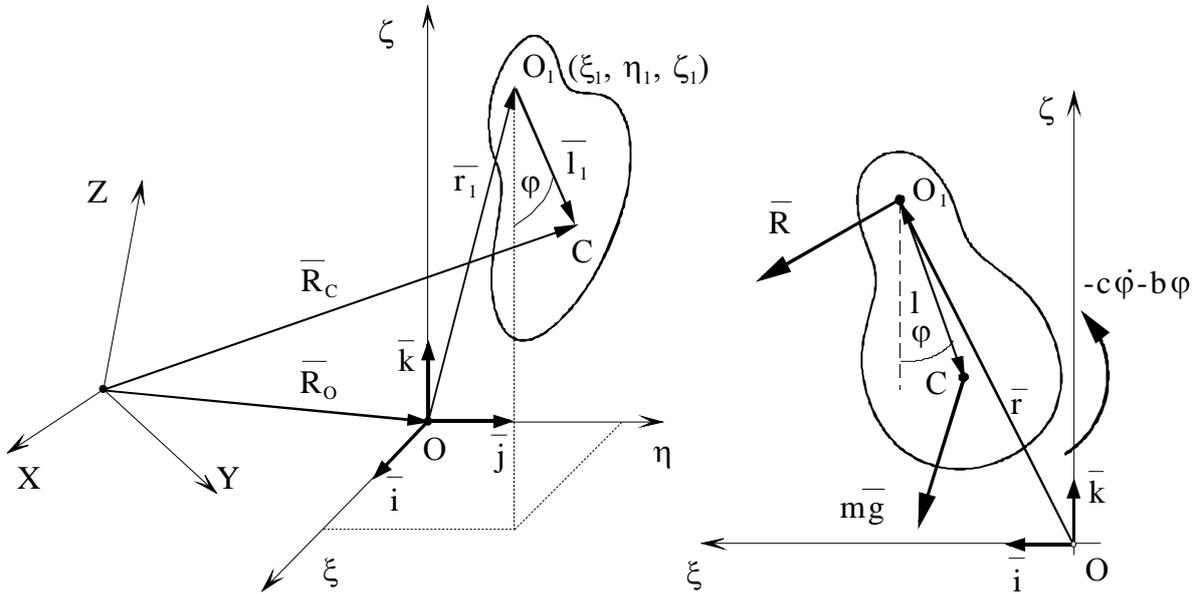


Рис. 3. Геометрическое расположение акселерометров

$$\begin{aligned}
 \frac{J}{ml}(\varepsilon_\eta + \ddot{\varphi}) + \frac{b}{ml}\dot{\varphi} + \frac{c}{ml}\varphi &= a_{O\xi} \cos \varphi - a_{O\zeta} \sin \varphi - \\
 -l(\omega_\xi^2 - \omega_\zeta^2) \sin \varphi \cos \varphi - l\omega_\xi \omega_\zeta (1 - 2 \sin^2 \varphi) + \\
 + \xi_{O_1} ((\varepsilon_\eta - \omega_\xi \omega_\zeta) \sin \varphi - (\omega_\eta^2 + \omega_\zeta^2) \cos \varphi) - \\
 - \eta_{O_1} ((\varepsilon_\xi + \omega_\eta \omega_\zeta) \sin \varphi + (\varepsilon_\zeta - \omega_\eta \omega_\xi) \cos \varphi) + \\
 + \zeta_{O_1} ((\omega_\xi^2 + \omega_\eta^2) \sin \varphi + (\varepsilon_\eta + \omega_\xi \omega_\zeta) \cos \varphi),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\xi\eta\zeta$  – связанная с акселерометром система координат;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – углы отклонения маятников акселерометров;  $c$  – коэффициент упругости электрической пружины;  $m$  – масса ЧЭ;  $l$  – длина маятника (расстояние от точки подвеса до центра масс ЧЭ);  $r$  – расстояние от точки подвеса до геометрического центра блока акселерометров;  $J$  – момент инерции ЧЭ относительно его центра масс;  $\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta, \varepsilon_\zeta$  – составляющие вектора углового ускорения ЛА;  $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$  – составляющие вектора угловой скорости ЛА.

При малых углах отклонения маятника от положения равновесия (с учетом  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $\cos \varphi \approx 1 - \varphi^2/2$  и  $\dot{\varphi} = 0$ ,  $\ddot{\varphi} = 0$ ) получим (под формулами приведен порядок величин, соответствующих интенсивному маневрированию ЛА):

$$\begin{array}{c|c|c|c|c}
 a_{O\xi} = & k_1\varphi_1 & + \alpha_1 & + k_3\varphi_1\varphi_3 & + (\beta_1 + \alpha_3)\varphi_1 & + k_1\varphi_1^3/2 + k_2\varphi_1\varphi_2\varphi_3; \\
 a_{O\eta} = & k_2\varphi_2 & + \alpha_2 & + k_1\varphi_2\varphi_1 & + (\beta_2 + \alpha_1)\varphi_2 & + k_2\varphi_2^3/2 + k_3\varphi_1\varphi_2\varphi_3; \\
 a_{O\zeta} = & k_3\varphi_3 & + \alpha_3 & + k_2\varphi_3\varphi_2 & + (\beta_3 + \alpha_2)\varphi_3 & + k_3\varphi_3^3/2 + k_1\varphi_1\varphi_2\varphi_3, \\
 \hline
 & 10g & 10^{-1}g & 10^{-2}g & 10^{-4}g & 10^{-5}g
 \end{array} \tag{4}$$

где  $k = \frac{c}{ml}$  – постоянный коэффициент, а параметры  $\alpha, \beta$  являются функциями времени и зависят от углового движения самолета.

Учитывая, что инструментальные погрешности современных акселерометров достигают  $10^{-4}g$  (для А-15), можем пренебречь в уравнении (4) членами, вносящими погрешность того же порядка и ниже.

Формулы для вычисления кажущегося ускорения точки О по сигналам акселерометров ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ) и сигналам ( $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ ) гироскопов (рис. 4) с учетом (4) имеют вид:

$$\begin{aligned} a_{O\xi} &= \frac{c}{ml}(\varphi_1 + \varphi_1\varphi_3) - \left(r - \frac{J}{ml}\right)\varepsilon_\eta - (r-l)\omega_\xi\omega_\zeta; \\ a_{O\eta} &= \frac{c}{ml}(\varphi_2 + \varphi_1\varphi_2) - \left(r - \frac{J}{ml}\right)\varepsilon_\zeta - (r-l)\omega_\xi\omega_\eta; \\ a_{O\zeta} &= \frac{c}{ml}(\varphi_3 + \varphi_2\varphi_3) - \left(r - \frac{J}{ml}\right)\varepsilon_\xi - (r-l)\omega_\eta\omega_\zeta. \end{aligned} \quad (5)$$

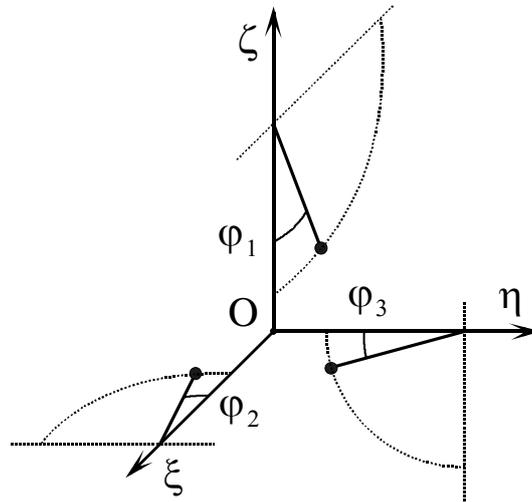


Рис. 4. Ускорение гироскопов

Из (5) получаем условие невозмущенности блока акселерометров угловыми ускорениями

$$\left(\frac{J}{ml} - r\right) = 0. \quad (6)$$

Для додекаэдрического измерительного блока выражения (5) переписутся в виде:

$$\begin{bmatrix} 0,5257 & -0,8506 & 0 \\ 0,5257 & 0,8506 & 0 \\ 0 & 0,5257 & -0,8506 \\ 0 & 0,5257 & 0,8506 \\ -0,8506 & 0 & 0,5257 \\ 0,8506 & 0 & 0,5257 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{Ox_1} \\ a_{Oy_1} \\ a_{Oz_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $b_1 = \left(\frac{J}{ml} - r\right)(0,8506\varepsilon_{x_1} + 0,5257\varepsilon_{y_1}) + (l-r)(0,5257\omega_{x_1} - 0,8506\omega_{y_1})\omega_{z_1} + (k_1 + c_1)\varphi_1$ ;

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \left( \frac{J}{ml} - r \right) (-0,8506 \varepsilon_{x_1} + 0,5257 \varepsilon_{y_1}) + (l - r) (0,5257 \omega_{x_1} + 0,8506 \omega_{y_1}) \omega_{z_1} + (k_2 + c_1) \varphi_2; \\
 b_3 &= \left( \frac{J}{ml} - r \right) (0,8506 \varepsilon_{y_1} + 0,5257 \varepsilon_{z_1}) + (l - r) (0,5257 \omega_{y_1} - 0,8506 \omega_{z_1}) \omega_{x_1} + (k_3 + c_2) \varphi_3; \\
 b_4 &= \left( \frac{J}{ml} - r \right) (-0,8506 \varepsilon_{y_1} + 0,5257 \varepsilon_{z_1}) + (l - r) (0,5257 \omega_{y_1} + 0,8506 \omega_{z_1}) \omega_{x_1} + (k_4 + c_2) \varphi_4; \\
 b_5 &= \left( \frac{J}{ml} - r \right) (0,5257 \varepsilon_{x_1} + 0,8506 \varepsilon_{z_1}) + (l - r) (-0,8506 \omega_{x_1} + 0,5257 \omega_{z_1}) \omega_{y_1} + (k_5 + c_3) \varphi_5; \\
 b_6 &= \left( \frac{J}{ml} - r \right) (0,5257 \varepsilon_{x_1} - 0,8506 \varepsilon_{z_1}) + (l - r) (0,8506 \omega_{x_1} + 0,5257 \omega_{z_1}) \omega_{y_1} + (k_6 + c_3) \varphi_6; \\
 c_1 - c_3 & - \text{функции углов } \varphi_1 - \varphi_6.
 \end{aligned}$$

Проверка физической реализуемости условия (7) (акселерометры имеют конечные геометрические размеры и не могут быть расположены на произвольном расстоянии от центра блока) для блока, построенного на акселерометрах типа А-15, показала, что установочное расстояние должно составлять  $r = 0,03$  метра при диаметре акселерометра 0,02 м. Таким образом, условие (7) реализуемо.

На рис. 5 приведен пример (додекаэдрический измерительный блок) расположения маятников для реальных маятниковых акселерометров типа А-15.

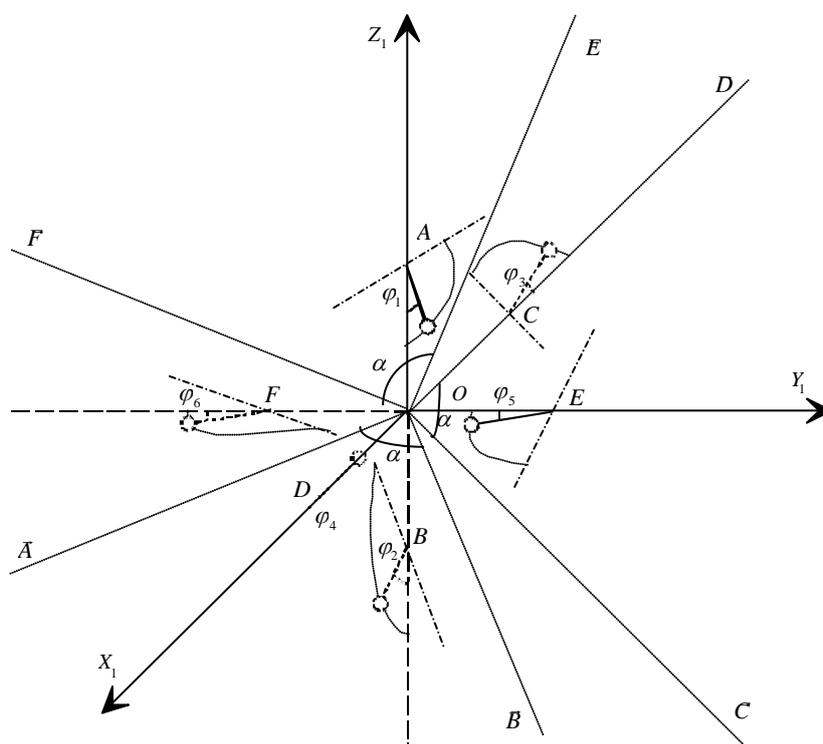


Рис. 5. Додекаэдрический измерительный блок

Здесь  $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \vec{D}, \vec{E}, \vec{F}$  – оси чувствительности акселерометров, причем  $\vec{A}, \vec{B}$  – лежат в плоскости  $x_1 O y_1$ ,  $\vec{C}, \vec{D}$  – в плоскости  $y_1 O z_1$ ,  $\vec{E}, \vec{F}$  – в плоскости  $y_1 O z_1$ .

Следует отметить, что учет физических размеров измерителей актуален именно для акселерометров, т.к. угловая скорость вращающегося тела одинакова для любой его точки, в то время как линейное ускорение каждой точки тела разное.

Таким образом, для выполнения условия невозмущенности блока акселерометров угловыми ускорениями необходимо подбирать акселерометры путем расчетов параметров их ЧЭ или конструировать ЧЭ акселерометра под блок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кашкаров А.С., Кобылкин Ю.И., Красник С.Ф., Куйбарь В.И. Перспективные датчики бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2002. - № 54.
2. Водичева Л. Оптимизация и диагностика неисправных измерительных осей избыточного бесплатформенного инерциального измерительного блока: матер. 4-й Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, 1998.
3. Математическая энциклопедия / под ред. И.М. Виноградова. – М.: Советская энциклопедия, 1985.
4. Алешкин В.В., Алешкин М.В., Сокольский А.С., Матвеев А.С. Исследование алгоритмов обработки информации избыточного блока микромеханических акселерометров // Вестник СГТУ. - 2007. - № 1(21). - Вып. 1.
5. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. - М.: Машиностроение, 1991.

#### ABOUT ORIENTATION OF AXES OF SENSITIVITY OF GAUGES SUPERFLUOUS STRAPDOWN INERTIAL SYSTEMS

Kobylkin J.I., Sosnovsky M.J.

Questions of optimization of an arrangement of gauges in the measuring block strapdown inertial navigating system (SNIS) are considered.

**Key words:** accelerometer, gyroscope, pendulum.

#### Сведения об авторах

**Кобылкин Юрий Иннокентьевич**, 1939 г.р., окончил ИГУ (1972), доцент кафедры АРЭО Иркутского филиала МГТУ ГА, автор 14 научных работ, область научных интересов – радиофизика, связь, техническая эксплуатация ЛА.

**Сосновский Михаил Юрьевич**, 1956 г.р., окончил ИГУ (1982), доцент кафедры АРЭО Иркутского филиала МГТУ ГА, автор 3 научных работ, область научных интересов – радиофизика, схемотехника, автоматизация систем радионавигации и радиосвязи.

УДК 656.7.052

## ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Э.П. ГАГЛОЕВ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

В статье рассматриваются проблемы функционирования системы управления воздушным движением. Дается определение системе управления воздушным движением. Автор указывает на недостатки организации обслуживания воздушного движения на площади маневрирования аэропорта, особое внимание уделяется персоналу обслуживания воздушного движения и рубежам передачи управления.

**Ключевые слова:** аэропорт, движение воздушных судов, аэродром, управление воздушным движением.

Термин «система» возникает при изучении процессов управления и обработки информации в крупных технических комплексах с автоматизированным управлением. В системах решаются технические и экономические задачи при широком использовании автоматики и телемеханики, радиоэлектроники и электротехники, вычислительных комплексов математического, программного и информационного обеспечения. Система состоит из большого числа взаимно связанных элементов, взаимодействующих между собой в процессе функционирования, для обеспечения достижения определенной цели.

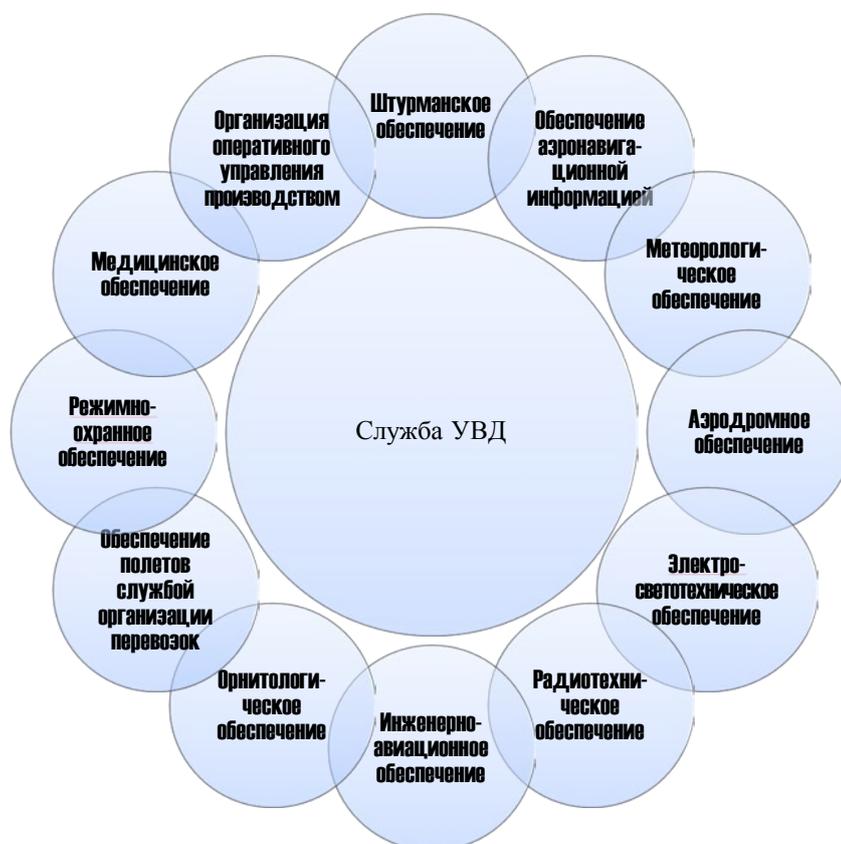
Исходя из вышеуказанного, система управления воздушным движением (УВД) представляет собой систему, обеспечивающую планомерную, безопасную и экономическую деятельность по выгодному использованию рабочей площади аэропорта и воздушного пространства, и предназначенная для обязательного обеспечения безопасности полетов воздушных судов. Система УВД характеризуется скоротечностью процессов и невозможностью их остановки. В связи с этим, возникает вопрос о необходимости системного (комплексного) подхода при решении вопросов организации деятельности системы УВД.

К системе УВД относятся совокупность технических средств навигации, УВД, связи и посадки, структура воздушного пространства, метеорологические и другие виды обеспечения полетов, правила и процедуры планирования использования воздушного пространства, потоков воздушного движения и непосредственного обслуживания воздушного движения.

Кроме того, для обеспечения деятельности системы УВД в Наставлении по производству полетов (НПП ГА - 1995 г.) в главе 4 были изложены следующие службы и виды обеспечения полетов:

- штурманское обеспечение;
- аэронавигационное обеспечение;
- метеорологическое обеспечение;
- аэродромное обеспечение;
- инженерно-авиационное обеспечение;
- электротехническое обеспечение;
- радиотехническое обеспечение;
- поисково-спасательное обеспечение;
- медицинское обеспечение;
- орнитологическое обеспечение;
- режимно-охранное обеспечение;
- обеспечение полетов службой перевозок;
- обеспечение оперативного управления производством (рис. 1).

Согласно основам политики Российской Федерации в области деятельности гражданской авиации, реструктуризация отрасли гражданской авиации в соответствии со стоящими перед ними задачами, а также потребностями и экономическими возможностями государства, модернизация системы управления воздушного движения, обеспечение рациональной загрузки производственных мощностей аэропортов являются приоритетными направлениями. В таких условиях, в вопросах обеспечения деятельности системы УВД, а также в организации взаимодействия служб УВД со службами обеспечения полетов, ведущее место принадлежит службе движения. Отказы наземного оборудования и различных систем воздушных судов создают значительные сложности в деятельности служб движения. Безопасность полетов не может быть обеспечена без хорошо организованных мероприятий по повышению уровня квалификации персонала служб, обеспечивающих полеты, а также четкой работой служб движения, в том числе и по взаимодействию со службами обеспечения полетов.



**Рис. 1.** Схема взаимодействия служб авиатранспортной системы

В результате структурных перестроек и реформ отрасли гражданской авиации в системе регулирования хозяйственной деятельности авиапредприятий и организаций произошли структурные изменения, созданы организации, осуществляющие деятельность по организационному обеспечению полетов, диспетчерский пункт обеспечения вылета «Деливери», подразделение управления движением на перронах аэродрома и др. [1]. Реструктуризация и модернизация системы авиатранспортной системы продолжается и в настоящее время. Таким образом, с появлением новых структурных элементов в авиатранспортной системе появляется необходимость определения их места в структуре системы, определения специфики их деятельности, разработки нормативных документов, регулирующих их деятельность, и организации взаимодействия. Здесь необходимо учесть, что организацию взаимодействия необходимо в первую очередь осуществить с целью решения вопросов, вытекающих из специфики деятельности службы УВД. Схема организации взаимодействия системы УВД со службами обеспечения полетов представлена на рис. 2.

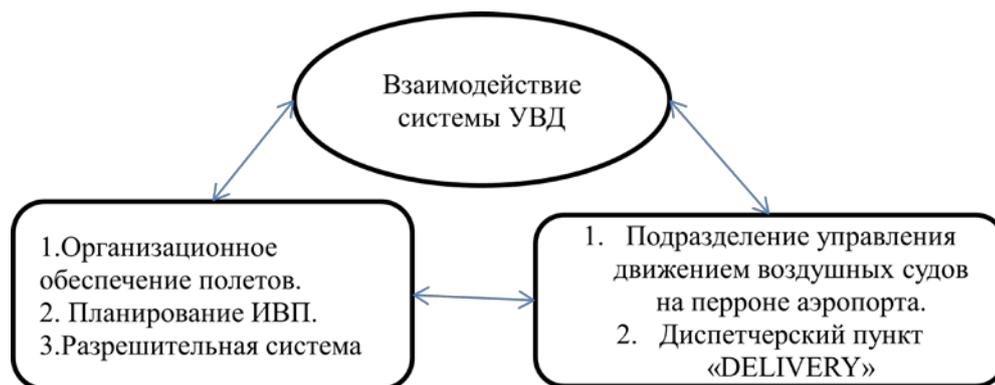


Рис. 2. Взаимодействие системы УВД в условиях реструктуризации

Служба УВД – одна из основных служб авиапредприятия, от которой во многом зависит обеспечение главных качеств функционирования системы УВД: безопасности, регулярности и экономичности. В организации функционирования авиатранспортной системы необходимо учесть значение деятельности службы УВД, как структурного звена системы. Служба УВД по выполняемым функциональным задачам в авиатранспортной системе является централизованным звеном. Для этого любые вопросы совершенствования организации взаимодействия служб связаны с поиском оптимальных методов организации деятельности службы УВД.

Особое место в организации функционирования системы УВД, а также в совершенствовании деятельности авиатранспортной системы занимает квалификация персонала. Высокие темпы развития авиационной техники предъявляют повышенные требования к авиационному персоналу. К авиационному персоналу относятся лица, имеющие специальную подготовку и сертификат (свидетельство) и осуществляющие деятельность по обеспечению безопасности полетов воздушных судов или авиационной безопасности, а также деятельность по организации, выполнению, обеспечению и обслуживанию воздушных перевозок и полетов воздушных судов, авиационных работ, организации использования воздушного пространства, организации и обслуживанию воздушного движения. Лица из числа авиационного персонала гражданской авиации допускаются к деятельности при наличии сертификата (свидетельства) [2]. **К выполнению функциональных обязанностей диспетчера УВД не допускаются лица, не имеющие при себе действующего свидетельства.** Диспетчеры УВД осуществляют деятельность по обслуживанию воздушного движения в пределах квалификационных отметок и отметок о допуске к работе на конкретном диспетчерском пункте (секторе) обслуживания воздушного движения, внесенных в установленном порядке в свидетельство диспетчера УВД, а также установленного срока его действия и при наличии действующего медицинского заключения о признании годным к работе диспетчером УВД, кроме случаев, когда сфера деятельности диспетчера УВД ограничена выполнением функциональных обязанностей, не требующих медицинского заключения о признании годным к работе диспетчером УВД.

В целях поддержания надлежащего уровня знаний для обеспечения безопасности полетов при обслуживании воздушного движения, диспетчеры УВД должны пройти курсы повышения квалификации по специальности один раз в три года [3]. Диспетчер УВД должен иметь навыки действовать не только в штатных ситуациях, а также в оговоренных особых случаях, но и в непредвиденной обстановке. Диспетчер УВД в условиях неопределенности, должен уметь адекватно оценивать ситуацию и оперативно принимать решение.

В связи с выходом Приказа №128 от 31.07.2009 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации (ФАП-128)», в некоторых аэропортах созданы диспетчерские пункты управления движением воздушных судов на перроне [4]. При наличии специализированного подразделения аэропортового комплекса по управлению движением на перроне аэропорта, функции по управле-

нию движением воздушного судна на перроне могут осуществляться указанным подразделением.

Функции по управлению движением воздушного судна на площади маневрирования аэродрома осуществляются органом обслуживания воздушного движения (ОВД). На основании указанных правил (ФАП-128) в редакции Приказа Минтранса РФ №263 от 22.11.2010 г.:

- перрон – определенная площадь аэродрома, предназначенная для размещения воздушных судов в целях посадки (высадки) пассажиров, погрузки (выгрузки) грузов и почты, заправки, стоянки и технического обслуживания;

- площадь маневрирования – часть аэродрома, исключая перрон (стоянку), предназначенная для взлета, посадки и руления воздушных судов.

На площади маневрирования осуществляются следующие виды движения:

- при взлете – движение на взлетно-посадочной полосе (ВПП) с ускорением (разбег);

- при посадке – движение на ВПП с торможением;

- движение на рулежных дорожках при выруливании для взлета и после посадки и освобождения ВПП для дальнейшего движения на место стоянки (руление).

**Руление – термин, касающийся движения воздушного судна по земле, означает перемещение воздушного судна под действием тяги собственных двигателей.** Кроме того, движение воздушного судна осуществляется на перроне и на площади маневрирования путем буксировки. **Буксировка воздушного судна – перемещение (ВС) по поверхности под давлением внешнего источника (тягача).**

**Обслуживание воздушного движения** – система согласованных действий по обеспечению полётов летательных аппаратов, целью которой являются предотвращение столкновений между ними (а при движении по площади аэродрома, кроме того, – с препятствиями на этой площади), поддержание порядка и ускорение движения в потоке летательного аппарата, обеспечение экипажей информацией, необходимой для выполнения полёта, а также извещение органов поисково-спасательного обеспечения о летательных аппаратах, терпящих бедствие.

Исходя из требований ФАП-128, движение на перроне может осуществляться только путем буксировки. Движение воздушного судна на тяге собственных двигателей (руление) на перроне исключено. Таким образом, организация движения воздушных судов на перроне на тяге собственных двигателей противоречит воздушному законодательству (ФАП-128).

Обслуживание воздушного движения производится органом ОВД в определенной зоне ответственности с определенными рубежами приема (передачи) управления. Согласно ФАП-128, рубеж передачи, установленный на маршруте руления или на траектории полета воздушного судна, на котором обслуживание движения воздушного судна передается от одного органа другому. Для каждого диспетчерского органа обслуживания устанавливаются границы зон ответственности с учетом технических возможностей, используемых органом обслуживания воздушным движением (ОВД), средств радиотехнического обеспечения полетов. Обслуживание воздушного движения воздушных судов, выполняющих полеты в конкретной части воздушного пространства, а также движение воздушных судов на площади маневрирования аэродрома осуществляется только одним органом ОВД [5]. **Исходя из этого, можно сделать вывод, что орган обслуживания воздушного движения должен иметь рубеж приема (передачи) управления воздушного движения только с другим органом ОВД.** Следовательно, орган управления воздушным движением на перроне, имеющий рубежи приема-передачи управления движения с органом ОВД, является органом обслуживания воздушным движением, а перрон, в таком случае, частью площади маневрирования.

Другая проблема – это проблема профессиональной подготовки персонала, осуществляющего обслуживание воздушного движения (руление) на перроне. Отсутствие квалификационных требований по сертификации, персонал по рулению ВС на перроне не проходит повышение квалификации, не проходит процедуру продления срока действия свидетельства (свидетельства диспетчера УВД или иного свидетельства). На персонал, осуществляющий руление

воздушных судов на перроне, требование Приказа №216 Минтранса РФ от 26.11.2009 г. «Федеральные авиационные правила. Требования к диспетчерам УВД и парашютистам-инструкторам», не распространяется. Таким образом, диспетчерский состав, осуществляющий обслуживание движения воздушных судов (ВС) (руление) на перроне, выведен за штат авиационного персонала, диспетчерский пункт управления воздушным движением воздушных судов («Руление») выведен из службы движения и превратился в службу обеспечения полетов «Перрон». Тем не менее, требуется более детальная оценка организации деятельности руления на перронах аэродрома, выявление и устранение несоответствий в документах, регулирующих деятельность по рулению на перронах, и для этого необходимо проведение дополнительных исследований в данной области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Гаглоев Э.П., Юркин Ю.А.** Задачи диспетчера по использованию воздушного пространства в авиакомпаниях Российской Федерации.
2. Воздушный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 06.12.2011 года).
3. **ФАП.** Требования к диспетчерам УВД и парашютистам-инструкторам: Приказ Минтранса РФ № 216 от 26.11.2009 г.
4. **Никулин А.О.** Особенности организации руления воздушных судов на перронах и площади маневрирования международного аэропорта «Шереметьево» // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2010. - № 159(9).
5. **ФАП.** Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации: Приказ Минтранса РФ № 128 от 31.07.2009 г.

#### THE PROBLEM OF THE FUNCTIONING OF THE AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

**Gagloev E.P.**

The problems of the functioning of the system of air traffic control are considered in this article. The definition of ATC system is also given here. The author points to shortcomings in the organization of air traffic services on the maneuvering area of the airport, special attention is paid to the personnel of air traffic services and borders of transfer of control.

**Key words:** airport, movement of aircraft, aerodrome, air traffic control.

#### Сведения об авторе

**Гаглоев Эмзар Пореевич**, 1965 г.р., окончил Академию ГА (1991), соискатель кафедры УВД МГТУ ГА, автор 9 научных работ, область научных интересов – организация взаимодействия служб УВД со службами обеспечения полетов.

УДК 371.3:656.7.071.13

## МЕТОД СЛУЧАЙНЫХ ФРАГМЕНТОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ ПЕРСОНАЛА СЛУЖБ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Э.П. ГАГЛОЕВ, Ю.А. ЮРКИН

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

В статье представлены материалы, характеризующие особенности применения опорных фрагментов в деятельности диспетчера по управлению воздушным движением. Дано определение случайным фрагментам, а также обоснованы условия и причины их применения в деятельности. Применение случайных фрагментов в педагогической деятельности, предлагается как метод повышения профессиональной подготовки персонала управления воздушным движением.

**Ключевые слова:** внедрение, аэродром, система, условия.

Научно-техническая революция в результате своего развития и производственных процессов привела к появлению нового класса систем, неотъемлемой частью которых является человек-оператор. Человек, принимающий участие в управлении объектами и системами, является составным элементом эргатической системы. Человек-оператор выступает в системе «человек-машина» в роли приемника и ретранслятора. Основные особенности деятельности человека-оператора в эргатической системе следующие:

- в процессе управления человеку-оператору приходится решать такие задачи, возникновение которых нельзя предвидеть;
- эргатические системы относятся к системам, в которых должен гарантироваться благоприятный исход какой-либо операции при любых условиях.

Для решения проблем, связанных с выполнением деятельности диспетчера УВД, оператора эргатической системы, в качестве способа определения проблем предлагается проведение анализа самой деятельности. Всякая деятельность человека выполняется с какой-то определенной целью, для достижения определенных результатов. Для проведения анализа деятельности диспетчера УВД необходимо разобрать сущность следующих терминов:

- цель деятельности – обеспечение безопасного движения воздушных судов в воздушном пространстве и на площади маневрирования;
- специфика деятельности – диспетчер УВД осуществляет деятельность в условиях скоротечности процессов и невозможности их остановки, ограниченных возможностями человека;
- требования к профессиональной подготовке – диспетчер УВД должен уметь адекватно оценивать ситуацию и оперативно принимать грамотное решение.

Развитие навыков и действий должно исходить из учета ограниченных возможностей человека по переработке информации. Любая деятельность диспетчера УВД должна осуществляться при обязательном соблюдении условий безопасности полетов, гарантированного благоприятного исхода какой-либо операции при любых условиях осуществления деятельности. Диспетчер УВД должен быть способным находить правильный выход из сложившейся трудной ситуации любого уровня (воздушной обстановки) [3].

Исходя из требований к деятельности диспетчера УВД, появляется необходимость разработки методов совершенствования профессиональной подготовки персонала УВД.

Профессиональную подготовку можно разделить на следующие уровни:

- уровень подбора персонала (подбор кандидатов в учебные заведения);
- первоначальная подготовка (учеба в учебном заведении);

- стажировка и допуск к самостоятельной работе;
- прохождение периодических курсов повышения квалификации.

Особое место в повышении профессионального уровня персонала УВД занимает самостоятельная работа. Совершенствование и развитие самостоятельной работы диспетчеров УВД – один из важнейших методов достижения уровня диспетчера высокой квалификации.

Персонал УВД условно подразделяется на две группы:

Первая группа: специалисты с определенными квалификациями и латентными свойствами способные осуществлять деятельность в условиях неопределенности, принимающие оптимальные решения и имеющие способности предвидения будущей воздушной обстановки. Такие специалисты выполняют деятельность по УВД хладнокровно, тихо и спокойно, без особых усилий.

Вторая группа: специалисты дисциплинированные, строго выполняющие требования инструкций, но не способные к принятию самостоятельного решения. В условиях повышенной трудности, а также при отсутствии точных инструкций, такие специалисты подвергаются сильному влиянию вредного психологического фактора, стрессу, быстро утомляются и теряют самообладание и самоконтроль [4].

Каким же образом это получается?

Если в период деятельности диспетчер УВД в процессе самоподготовки и повышения уровня квалификации развивает те личные профессиональные качества, латентные свойства личности, которые позволяют реализовать те опорные фрагменты деятельности, применение которых позволяет достичь высоких профессиональных результатов, то такой специалист попадает в первую группу, в противном случае – во вторую.

На современном этапе развития гражданской авиации исследователи проблемы безопасности полетов неразрывно связывают понятие факторов опасности с понятием «человеческий фактор». Понятие факторов опасности или аварийных факторов введено при расследовании авиационных происшествий и означает инциденты или причины авиационных происшествий. Источниками проявления человеческого фактора стали не только расследования авиационных происшествий и предпосылки к ним, но и целая совокупность прогностических исследований и профилактических мер, результатом которых является разработка на международном уровне руководства по предотвращению авиационных происшествий.

Достижение высокой эффективности авиационных перевозок возможно лишь при обеспечении должного уровня безопасности, регулярности и экономичности полетов. Проблема выполнения требований, обусловленных критериями качества функционирования системы УВД и гражданской авиации в целом возникает в ситуациях, связанных с проявлением ограничений, присущих человеку как биологическому виду. В этом случае принято говорить о существовании и влиянии человеческого фактора.

Снижение негативного влияния человеческого фактора на безопасность, регулярность и экономичность возможно за счет укрепления дисциплины, улучшения психофизиологического состояния, совершенствования организационных мероприятий и технических систем.

На основе анализа концепции по применению опорных фрагментов деятельности можно в качестве основных «образующих» деятельность диспетчера УВД выделить следующие:

- мотив, цель планирования деятельности – обеспечение безопасного движения воздушных судов;
- переработка текущей информации – анализ воздушной обстановки;
- оперативный образ (концептуальная модель), прогнозирование;
- принятие решения;
- действия – выдача диспетчерских указаний;
- проверка результатов и коррекция действий.

Перечисленные составляющие не являются некоторыми изолированными друг от друга блоками деятельности, включающимися последовательно в ходе ее выполнения. Они раскрывают различные аспекты регулирующей функции, организации и выполнения деятельности

диспетчера УВД, в ходе которой осуществляется преобразование ее предмета в продукт, оказанную услугу [5].

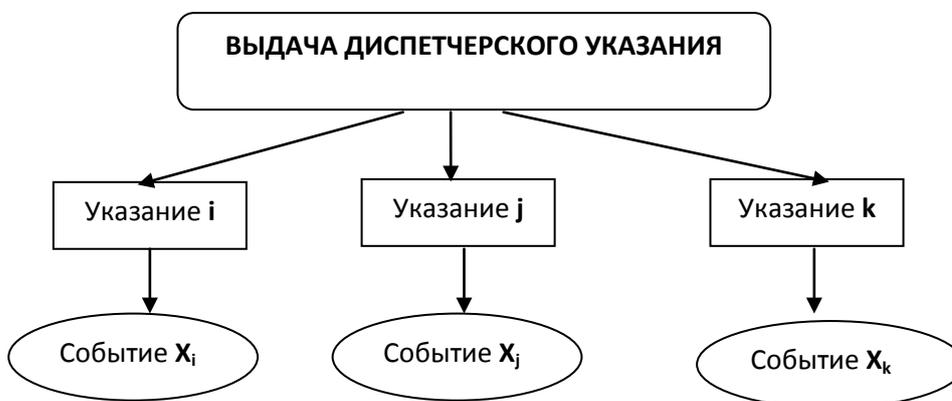
В результате разложения деятельности на элементы введено понятие об элементарных операциях, но не в психологическом, а логико-техническом смысле, что диктовалось потребностью распространить метод анализа машинных процессов на процессы деятельности диспетчера УВД, участвующего в работе АС УВД. Такой взгляд на деятельность может иметь два ракурса: рассмотрение ее в статике и в динамике.

В данном случае рассматривается статический подход. В ней приняты следующие определения:

- функциональный элемент деятельности – это одна из задач иерархической структуры деятельности;
- фрагмент деятельности – это процесс реализации оператором того или иного функционального элемента деятельности;
- опорный фрагмент деятельности (ОФД) – это процесс реализации оператором того или иного функционального элемента, отобранного по критериям частоты встречаемости, интенсивности и устойчивости [2].

В качестве единицы анализа внутренней деятельности диспетчера УВД предложены опорные фрагменты деятельности, которые представляют собой функциональные элементы деятельности, отобранные по критериям частоты использования диспетчером при обслуживании воздушного движения, интенсивности деятельности и устойчивости.

Наиболее существенным признаком, отличающим ОФД от внешнего, механического, является то, что он представляет собой не столько перемещение тела в пространстве и времени, сколько овладение пространством, объектом и временем, т.е. он обладает чертами первоначальной активности. В зависимости от принятого решения и выдачи диспетчерского указания определяется динамика воздушной обстановки, т.е. команда диспетчера УВД влияет на будущую воздушную обстановку (рис. 1).



**Рис. 1.** Влияние диспетчерского указания на воздушную обстановку в будущем

Таким образом, любая профессиональная подготовка персонала УВД осуществляется по определенной программе. Навыки и опыт, а также ошибки, полученные в результате обучения, имеют одинаковый характер, предсказуемы, что дает возможность разработки методов педагогической деятельности по устранению ошибок и закреплению пройденного материала. В ходе проверки профессиональной деятельности диспетчеров УВД получаемый в тесте результат содержит в себе ряд ошибок. Различают три основных типа ошибок: систематические, случайные и грубые.

Суммарная деятельность диспетчера УВД состоит из:

- деятельности, в результате которой реализуются опорные фрагменты, и полученная при этом ошибка, имеет систематический характер;

- деятельности, в результате которой реализуются случайные фрагменты, и полученная при этом ошибка, имеет случайный характер.

Грубые ошибки в деятельности диспетчера УВД зависят от индивидуальных, личных качеств, латентных свойств личности специалиста. Это предположение можно представить в виде формулы [1]

$$(1) \quad X = T + E_1 + E_2 + E_3,$$

где  $X$  – результат деятельности;  $T$  – предполагаемый, истинный результат, который можно было бы выявить в результате многократного измерения;  $E_1$  – систематическая ошибка – ошибка, вызванная измерениями;  $E_2$  – грубая ошибка – ошибка, вызванная состоянием испытуемого;  $E_3$  – случайная ошибка.

В деятельности диспетчера УВД методы исключения случайных ошибок представляют собой разработку способов профессиональной подготовки персонала УВД, соответствующих указанным требованиям по профессиональной подготовке. На основании практических наблюдений можно сделать вывод, что квалификация выпускников учебных заведений одинакова или почти одинакова, соответствует стандартам подготовки персонала УВД, но со временем одни выпускники добиваются высоких результатов по сравнению с другими. Каким образом они этого добиваются? И какую роль играют в этом случайные ошибки?

Очевидно, что деятельность диспетчера УВД предписана правилами, инструкциями и технологией работы. Поэтому она имеет одинаковый характер, свойства повторяемости и устойчивости. И на основании этого мы ее рассматриваем, как реализацию диспетчером УВД опорных фрагментов деятельности в определенном порядке для достижения поставленной цели.

Исходя из формулы (1), случайные ошибки допускаются при реализации диспетчером УВД фрагментов деятельности, не являющихся опорными, т.е. фрагменты, для реализации которых руководящими документами предписаний нет. Это ошибки, допущенные при осуществлении УВД в условиях неопределенности. Соответственно, не зная условий неопределенности, не зная и возможные допустимые при этом ошибки.

В результате реализации случайных факторов деятельности диспетчером УВД получаются случайные ошибки. Случайный фактор – фактор деятельности, реализованный диспетчером УВД в процессе деятельности, вызванный необходимостью решения сложных задач по УВД в зоне деятельности, диктованный условиями неопределенности. Появление возможных условий неопределенности предвидеть невозможно, предсказать при этом будущую воздушную обстановку, прогнозировать и влиять на нее диспетчер УВД не может, а значит и вынужденно реализованные при этом случайные факторы деятельности прогнозированию не подлежат.

Таким образом, в данной работе предлагается применить метод случайных фрагментов в педагогической деятельности по подготовке персонала УВД. Основная цель предлагаемого метода состоит в теоретической подготовке, а также в выработке навыков действий студентов при выполнении упражнений на диспетчерских тренажерах повышенной интенсивности движения (трудности), а также навыков действий по управлению воздушным движением в неопределенных ситуациях с обязательным соблюдением требований по обеспечению безопасности полетов.

С целью внедрения в учебный процесс метода случайных фрагментов деятельности необходима разработка и проведение курса теоретической подготовки студентов по теме «Управление воздушным движением в условиях неопределенности». В данный курс необходимо внести:

- основные особенности условий управления воздушным движением в непредвиденных обстоятельствах;

- требования к деятельности диспетчера УВД в непредвиденных обстоятельствах, создающих условия неопределенности. Информирование студентов об известных из опыта работы указанных условиях и принятых мер по выходу из сложившихся ситуаций.

Существующие методы педагогической деятельности по подготовке персонала УВД применяются в подготовке специалистов к действиям в условиях высокой интенсивности, сложных метеорологических условиях, а также в особых случаях. Существуют и упражнения, где встречаются одновременно все указанные условия трудности выполнения задания. Для реализации фрагментов деятельности в таких условиях диспетчером УВД уже имеется опыт и разработанные на его основе инструкции по решению поставленной задачи. Студенту остается только выучить теоретическую часть (инструкции по деятельности, технологии деятельности и др.) и с целью получения и закрепления практических навыков выполнить комплекс упражнений на диспетчерском тренажере.

В предлагаемом методе на основе уже существующих упражнений предлагается путем добавления случайных фрагментов разработку упражнений, позволяющих развивать навыки профессиональной деятельности студентов. *Целью этого метода является закрепление существующих практических навыков, в выработке и повышение способностей студентов к действиям в условиях непредвиденности (неопределенности), когда нет предписаний и инструкций по действиям в таких случаях, а решение принимается на основании собственных знаний и опыта.* В таких условиях принимаемое решение диспетчером УВД обосновывается, исходя из своих личных способностей, латентных свойств личности, теоретических знаний, практического опыта работы и с обязательным выполнением условий обеспечения безопасности полетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Аванесов В.С.** Основы научной организации педагогического контроля в высшей школе. - М.: Прогресс, 1989.
2. **Гаглов Э.П.** Философские аспекты деятельности оператора диспетчерской службы УВД // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2012. - № 182 (8).
3. **Гаглов Э.П.** Централизация и децентрализация деятельности службы управления воздушным движением // Технические науки от теории к практике: материалы XV междунар. заочной науч.-практич. конф. (12 ноября 2012 г.) / под. ред. Я.А. Полонского. - Новосибирск: СибАК, 2012.
4. **Гаглов Э.П.** Способ решения проблемы дискриминации в сфере труда путем проведения педагогического измерения // Технические науки от теории к практике: материалы XV междунар. заочной науч.-практич. конф. (20 марта 2013 г.). - Новосибирск: СибАК, 2013.
5. **Г.В. Коваленко, Г.А. Крыжановский, Н.И. Сухих, Ю.Е. Хорошавцев.** Совершенствование профессиональной подготовки летного и диспетчерского состава / под ред. Г.А. Крыжановского. - М.: Транспорт, 1996.

#### THE METHOD OF RANDOM FRAGMENTS OF ACTIVITIES IN PROFESSIONAL TRAINING OF AIR TRAFFIC CONTROL SERVICES

Gagloev E.P., Yurkin Y.A.

The article presents the materials characterising features of application of reference fragments in the activities of the ATC. Definition of random fragments is given, and also reasons and conditions of their application in the result of the activity is grounded. The application of random fragments in teaching activities is offered as a method of increasing of professional training of air traffic control.

**Key words:** introduction, airfield, the system, conditions.

#### Сведения об авторах

**Гаглов Эмзар Пореевич**, 1965 г.р., окончил Академию ГА (1991), соискатель кафедры УВД МГТУ ГА, автор 11 научных работ, область научных интересов – организация взаимодействия служб УВД со службами обеспечения полетов.

**Юркин Юрий Алексеевич**, 1934 г.р., окончил ВАУ ГА (1966), заслуженный пилот СССР, кандидат технических наук, профессор кафедры УВД МГТУ ГА, автор более 30 научных работ, область научных интересов – аэропортовая деятельность, оптимизация основных слагаемых АТС «Воздушные суда – аэродромы».

УДК 371.3:656.7.071.13

## МЕТОДОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

С.В. ГУБЕНКО, Ю.А. ЮРКИН

В статье рассматривается вопрос о разработке методологии подготовки диспетчерского персонала в гражданской авиации.

**Ключевые слова:** методология, диспетчерский персонал, профессиональная подготовка.

### Введение

В течение последних 20 лет подготовка диспетчерского персонала постоянно претерпевает изменения, отмечены попытки реформирования методологии подготовки. В связи с этим наблюдается некоторые негативные изменения в первоначальной подготовке, стажировке и естественно в работе.

Исследование этих проблем обусловлено возрастающей ролью в авиационной отрасли специалистов по управлению воздушного движения (авиадиспетчеров). Интенсивность воздушного движения имеет четкую тенденцию роста не только на внутренних авиалиниях страны, но и на международных воздушных трассах. Воздушный транспорт стал подлинно массовым и единственным, регулярно действующим видом сообщения.

В связи с этим необходимо понимать, что подготовка высококвалифицированного диспетчерского персонала – это одна из главных задач для обеспечения безопасности полётов.

Но будущий специалист, поступающий в учебное заведение для получения образования по специальности, заведомо становится заложником нашей несовершенной структуры обучения на авиадиспетчера. После окончания этого учебного заведения молодого специалиста доводят так называемо на предприятии, в условиях интенсивного неравномерного движения, где и вылезает на белый свет пробелы в теоретической подготовке.

По многочисленным наблюдениям порядка 50 % молодых специалистов вообще не понимают, как и что в дальнейшем они будут делать. Не говоря уже о том, как пилотируется воздушное судно, и какие трудности с этим связаны.

Разрабатываются многие инструкции по организации и проведению тренажерных подготовок персонала ОВД, инструкции по проведению стажировки и проверки персонала УВД на рабочих местах, которые помогают в дальнейшем при профессиональном росте диспетчеров.

Так же разрабатываются и выпускаются Приказы Министерства транспорта Российской Федерации об утверждении порядка функционирования непрерывной системы профессиональной подготовки, включая вопросы освидетельствования, стажировки, порядка допуска к работе, периодичности повышения квалификации руководящего и диспетчерского персонала, утверждаются Федеральные авиационные правила «Требования к диспетчерам управления воздушного движения и парашютистам инструкторам».

Конечно, все эти документы и ряд других вышестоящих документов регламентируют работу по стажировке на рабочих местах, но по нашим наблюдениям проблема кроется глубже.

Надо начинать готовить грамотных специалистов службы движения, как например, в своё время готовило Рижское Высшее Авиационное училище, Кировоградское Авиационное Училище, та же Академия Гражданской Авиации в Санкт-Петербурге и т.д., когда молодые специалисты получали не только диспетчерскую практику, но и лётную. Когда курсанты имели налёт по 40-50 часов, вместе с экипажем работали в кабине, понимали и знали работу пилота, понимали и знали все трудности на всех этапах полёта.

Качественная профессиональная подготовка участников радиообмена становится гарантией безопасности воздушного движения.

Поэтому надо обратить большое внимание на методологию подготовки молодых специалистов и разработку новейших программ обучения и стажировки.

### **Методология подготовки диспетчерского персонала в учебном заведении**

20 октября 1961 года в Амстердаме была создана Международная федерация ассоциаций авиационных диспетчеров (International Federation of Air Traffic Controllers Associations, IFATCA).

Это событие явилось значимой вехой в истории развития воздушного транспорта.

С момента образования число членом-ассоциаций IFATCA выросло до 133, они представлены 50 тысячами авиадиспетчеров во всем мире. Среди авиадиспетчеров бытует правило — работа должна выполняться, невзирая на какие бы то ни было обстоятельства и условия работы.

На авиадиспетчеров возложена огромная ответственность и к их профессионализму предъявляются самые высокие требования.

ИКАО уделяет большое внимание исследованию методики преподавания.

Эти исследования были начаты Аэронавигационным комитетом ПИКАО в июне 1946 года и продолжались в ходе первой, второй, четвертой и ряда последующих сессий Ассамблеи ИКАО.

Аэронавигационная комиссия также уделяет пристальное внимание различным аспектам программы ИКАО по обучению, которая в течение длительного времени разрабатывалась как источник информации и руководства для государств.

Поскольку ИКАО, являясь одним из специализированных учреждений Организации Объединенных Наций, в настоящее время принимает участие в реализации расширенной программы ООН по оказанию технической помощи для экономического развития.

Цель ИКАО по обучению заключается в обеспечении единообразного применения указанных технических требований. Оно имеет целью добиться высокого уровня профессиональной подготовки в целом, и издано в форме информационно-инструктивного материала для договаривающихся государств.

Потребности отрасли в отношении отбора кандидатов, их обучения, повышения квалификации и поддержания на должном уровне профессиональной подготовки личного состава претерпели изменения, а рекомендации, предлагаемые в Руководстве по обучению, утратили свою актуальность.

С целью преодоления указанных трудностей в подготовке специалистов, ИКАО постоянно вносит коррективы в программы по подготовке специалистов, отвечающих за жизни людей.

Имеющийся опыт свидетельствует о том, что профессиональная подготовка лиц, деятельность которых связана с авиацией, представляет собой, возможно, один из наиболее важных факторов, обуславливающих авиационную безопасность.

Качественная подготовка может осуществляться только квалифицированными преподавателями. Окружающие редко отдают себе отчет в том, что обучение, как и преподавание, представляет собой искусство, которое требует специальной методики, осуществление какой-либо другой деятельности, связанной с соблюдением вполне определенных правил и процедур.

В действительности же даже при наличии таких правил и процедур обучение представляет собой более сложный процесс, чем большинство других видов человеческой деятельности, поскольку речь идет о человеческом материале, а различия между отдельными слушателями зачастую значительно шире и сложнее.

Качественное преподавание – это активный процесс, который предполагает активное мышление или участие слушателя.

Первоначальная подготовка диспетчеров УВД производится на дневных отделениях Академии ГА, Ульяновского ВАУ ГА, Красноярского АТК и Санкт-Петербургского АТК ГА, а

также на курсах первоначальной подготовки диспетчеров УВД из числа авиационного персонала в тех же учебных заведениях (по согласованию с УР ОВД ФСВТ России).

Во многом образование закладывает большой крепкий камень в фундамент молодого специалиста. В дальнейшем при обучении и работе все знания, которые получает студент или абитуриент, как цепочка, звено за звено, будет строиться его платформа знаний.

Есть ряд наук, которые необходимо изучать и разбираться в них. Это очень важный момент в становлении молодого студента, как будущего специалиста.

Но на сегодняшний день есть ряд пробелов в подготовке специалистов службы движения в учебных заведениях. В некоторых местах методы подготовки «хромают» и отстают даже от советского времени.

Есть ряд дисциплин, на которые сейчас не обращают усиленного внимания, но они очень важны в понимании слушателем всей важности и специфики выбранной профессии.

Очень большая потребность в переработке методологии программы образования и подготовки специалистов в учебных заведениях.

Необходимо сделать большой акцент не только на так называемые диспетчерские науки, но и на дисциплины, которые преподаются будущим пилотам.

### **Подготовка персонала ОВД к самостоятельной работе**

Подготовка персонала ОВД к самостоятельной работе начинается на тренажерном центре, на непосредственном предприятии, где молодой специалист начинает свою работу.

При прохождении обучения в тренажерном центре специалист использует необходимые учебные пособия.

Цель учебных пособий заключается в улучшении качества обучения; на протяжении всей истории человечества существовала естественная тенденция к использованию в процессе обучения иллюстраций или моделей для демонстрации учащимся.

Классические методы преподавания (классная доска, преподаватель, учебник) зачастую вынуждали запоминать маловажные факты, снижая реальное качество обучения. Последнее всецело зависит от самих учащихся, однако в ходе практических экспериментов было установлено, что наиболее эффективное обучение имеет место тогда, когда слушатель является активным участником этого процесса.

Обучение - это процесс, под влиянием которого изменяются реакция и результирующее поведение индивидуума. Не случайно то, что рассматриваемые ниже отдельные учебные пособия предназначены для визуального и слухового восприятия, поскольку зрение и слух являются двумя наиболее важными инструментами познания.

Зрение, т.е. визуальное восприятие происходящих событий, является наилучшим учителем. Однако далеко не все может быть воспринято или усвоено при непосредственном визуальном контакте, поэтому возникает необходимость в разработке методики обучения и материалов, которые должным образом заменяют непосредственное участие и непосредственный опыт.

Обучение с помощью аудиовизуальных средств – это выражение, используемое для обозначения широко применяющейся определенной практики преподавания. Материалы, относящиеся собственно к аудиовизуальным средствам, включают все виды моделей, карт, плакатов, магнитофонных записей, слайдов, иллюстраций и кинофильмов.

Правильное использование аудиовизуальных средств позволяет существенно повысить эффективность работы слушателей. Это способствует повышению качества обучения, усвоению отдельных элементов знаний и при наличии способного и квалифицированного преподавателя экономит время.

Упомянутые выводы подтверждаются статистическими данными. Исключительная важность индивидуального обучения не подвергается сомнению, поскольку оно вписывается в «спаренную» подготовку и отдельные виды обучения на рабочих местах.

Такие средства, особенно если они представляют материал в логической последовательности, развивают дисциплину мышления. Это позволяет сохранять важнейшие элементы базовых знаний по какой-либо отдельной проблеме в активной форме. Слушатель получает возможность уяснить для себя самого детали того, что преподаватель дает лишь в описательной форме. Эти средства ограничивают объем детализации знаний, сообщаемых слушателю в единицу времени, давая возможность сосредоточиться на главном.

Именно благодаря этому они способствуют более глубокому усвоению материала и дают практический опыт, который не так легко приобрести иным способом.

Как правило, динамические средства обучения, такие как кинофильмы или телевизионные программы, стимулируют быстрое развитие способностей слушателей.

Благодаря применению хороших учебных пособий этого можно добиться значительно быстрее и лучше, нежели даже при непосредственной работе с изучаемым объектом.

Учебные программы, ориентированные на скрупулезное и повсеместное использование таких средств, доказали свою практическую пригодность во всех областях знаний и для всех возрастных групп слушателей.

Разработаны планы и методологии подготовки и стажировки как на тренажёре, так и непосредственно на рабочем месте.

Для каждого предприятия в зависимости от сложности зоны, интенсивности движения и других сопутствующих факторов диспетчерской работы разработаны необходимые процедуры для стажировки и дальнейшего профессионального роста специалиста ОВД.

Стажировка состоит из двух частей: теоретической и практической. Согласно некоторым наблюдениям, мы можем заметить, что и здесь есть несовершенные методы стажировки. Это особенно видно при внимательном рассмотрении методических пособий, инструкций по организации и проведению тренажёрной подготовки и стажировки персонала ОВД.

Теоретическая часть включает в себя проверку знаний после учебного заведения, изучения необходимых материалов связанных с особенностями той или иной зоны и в дальнейшем отработка каких-либо упражнений на тренажёрах в учебно-тренажёрном центре.

В дальнейшем, после прохождения всей этой части, специалист допускается до практической стажировки, т.е. к непосредственному УВД с инструктором.

Вот здесь и встречаются два лагеря – незнание некоторых важных дисциплин и специфики пилотирования воздушного судна с несовершенной технологией стажировки и подготовки персонала на предприятии. Вследствие чего возможно не только непонимание молодого специалиста, что от него хотят, но и разубеждение этого специалиста в правильности выбора профессии.

Ведь если бы он понимал с самого начала учёбы, что собой представляет диспетчерская работа, и по приходу на предприятие молодому специалисту доводили не старую информацию в виде инструкций, которые не перерабатывались уже с советского времени, а новую переработанную методику подготовки и стажировки персонала ОВД, то не было бы таких результатов.

### **Заключение**

Исходя из вышеизложенных замечаний, можно сделать вывод, что практически вся методология подготовки и стажировки диспетчерского персонала должна быть переработана и представлена в другом, более современном и модернизированном варианте.

Для этого у нас есть пример всемирной организации ИКАО, где при подготовке и стажировке диспетчерского персонала используются современные методы, постоянно совершенствуются и перерабатываются множество документов, связанные с методологией подготовки диспетчерского персонала.

Необходимо ввести в учебные заведения, которые занимаются подготовкой молодых специалистов ОВД, дисциплины, которые были забыты или утрачены в постсоветское время.

Необходимо при подготовке и обучении диспетчеров заново ввести полёты или летные тренажёры, чтобы молодежь понимала, что и как происходит за гранью локатора, на том конце радиосвязи.

Чтобы не было двоякости понимания, что говорит диспетчер и что в это время делает пилот.

Необходимо укреплять и модернизировать не только методологию подготовки, но и техническую базу подготовки, чтобы методология подготовки и стажировки диспетчерского персонала ОВД приобретала всё новые и новые решения проблем при подготовке молодого специалиста.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении порядка функционирования непрерывной системы профессиональной подготовки, включая вопросы освидетельствования, стажировки, порядка допуска к работе, периодичности повышения квалификации руководящего и диспетчерского персонала: Приказ от 14 апреля 2010 г. Министерства транспорта Российской Федерации.
2. **ФАП.** Требования к диспетчерам управления воздушным движением парашютистам-инструкторам.
3. **Doc 7192-AN/857.** Руководство по обучению. – Ч. А-1.
4. Инструкция по организации и проведению тренажерной подготовки персонала ОВД.
5. Порядок проведения стажировки и проверки персонала УВД И ПВД на рабочем месте.

#### METHODOLOGY OF TRAINING SUPERVISORY PERSONNEL IN CIVIL AVIATION

Gubenko S.V., Yurkin Y.A.

The article discusses the development of methodology for supervisory personnel in civil aviation.

**Key words:** methodology, supervisory personnel, training.

#### Сведения об авторах

**Губенко Сергей Валерьевич**, 1975 г.р., окончил СПАТК ГА (1996), Академию ГА (2004), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – разработка методологии подготовки диспетчерского персонала и организация учебного процесса.

**Юркин Юрий Алексеевич**, 1934 г.р., окончил ВАУ ГА (1966), заслуженный пилот СССР, кандидат технических наук, профессор кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор более 20 научных работ, область научных интересов – аэропортовая деятельность, обеспечение полетов.

УДК 656.7.071.13:65.06

## СРЕДСТВА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРАМИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ\*

А.Е. КОНОВАЛОВ, Ю.А. ЮРКИН

В статье рассматриваются средства автоматизации непосредственного управления воздушным движением, проводится анализ перспективных средств поддержки принятия решения диспетчерами УВД.

**Ключевые слова:** автоматизированные системы УВД, средства поддержки принятия решения диспетчерами УВД.

### Введение

Повышение плотности и интенсивности воздушного движения настолько усложняют обстановку в связи с огромным количеством информации, которую необходимо переработать в процессе ОВД, что распространенные в настоящее время способы ОВД оказываются малоэффективными, а иногда и вовсе непригодными. Диспетчеры работают при этом с максимальной нагрузкой в условиях острого дефицита времени. Сложность процессов управления, подверженность воздействию среды и ее динамичность требуют от диспетчера одновременного решения нескольких самостоятельных задач, различных по своей важности и характеру. При этом возникают случаи, когда способ действия по решению данных задач отсутствует. Поэтому разработка автоматизированных систем по выработке прогнозов воздушной обстановки, рекомендаций диспетчеру, а также различного рода оптимальных решений в процессе ОВД приобретает большое практическое значение.

Сохранение безопасности полетов на заданном уровне при увеличении интенсивности воздушного движения возможно только при наличии автоматизированных систем ОВД различного уровня автоматизации. При этом в первую очередь автоматизировано или подлежат автоматизации операции сбора, фиксации и отображения информации, поступающей из плановых органов, от средств наблюдения, экипажей, диспетчеров смежных зон. Теперь ставятся задачи автоматизации операций диспетчера при непосредственном управлении воздушным движением и автоматическая связь «земля-воздух». За диспетчером должны остаться общая оценка воздушной обстановки и принятие решений по нестандартным ситуациям, т.е. нагрузка на диспетчера значительно уменьшится, что позволит увеличить эффективность его труда.

### Архитектура автоматизированной системы УВД

В документе Евроконтроля «Operational Requirements Document for EATC/HP<sup>1</sup> Phase III ATM Added Functions» архитектура автоматизированной системы УВД определена, как многоуровневая система с различным функционалом. При этом каждый уровень предусматривает основные, расширенные и перспективные функции (рис. 1).

Все данные обрабатываются системой обработки полетных данных и распределения информации (Flight Data Processing and Distribution), наиболее важным элементом этой системы является модуль прогнозирования траектории полета (Trajectory Prediction). Этот модуль позволяет вычислять точные профили с учетом типов и характеристик самолетов, их масс, метеорологических данных, сведений плана полетов и действий службы управления воздушным движением. Модуль прогнозирования траектории полета позволяет оптимизировать воздушное движение на основе индивидуального выделения траекторий. Без этого модуля невозможно

\* Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант № 13-08-00182)

<sup>1</sup> European Air Traffic Control Harmonisation and Integration Programme

функционирование автоматизированных средств непосредственного управления воздушным движением.

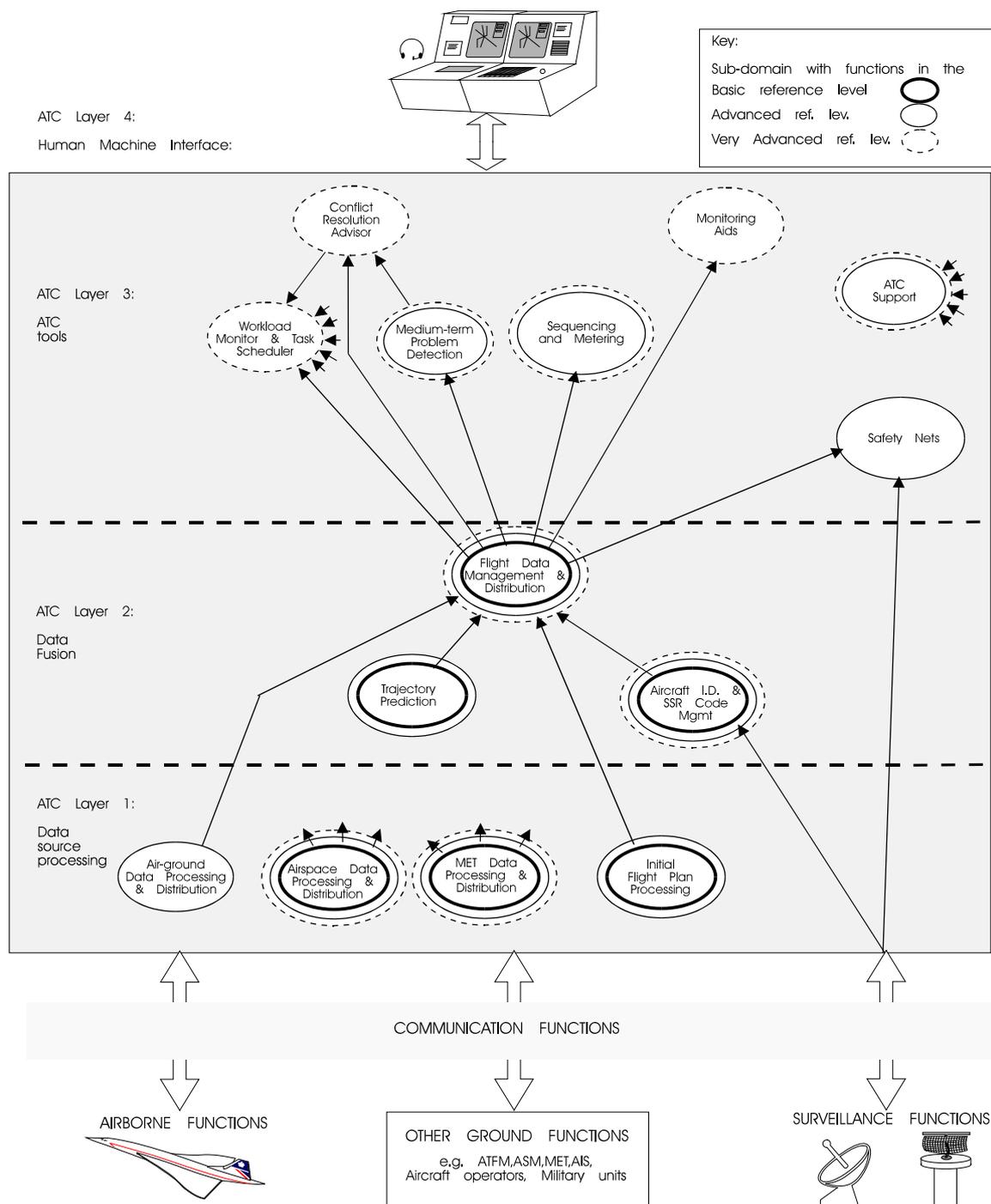


Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы ОВД

Средства автоматизированного управления воздушным движением представляют собой набор инструментов, которые повышают понимание диспетчером УВД текущей и прогнозируемой воздушной обстановки и способствуют процессу принятия решения. Средства автоматизированного управления воздушным движением получают обработанные данные от системы обработки полетных данных и распределения информации и взаимодействуют с диспетчером УВД с помощью человеко-машинного интерфейса. Целью этих средств является уменьшение нагрузки на диспетчера. Это делается специализированными инструментами для решения кон-

кретных задач: информирования, обнаружения и/или разрешения возможных проблем. К таким инструментам относятся:

- сигнализация напоминаний и предупреждений о возможных нарушениях безопасности воздушного движения (Monitoring Aids (MONA));
- наземные средства контроля безопасности (Ground-Based Safety Nets (SNET));
- сигнализация об обнаружении потенциально конфликтной ситуации (Short-Term Conflict Alert (STCA));
- сигнализация о минимальной безопасной высоте (Minimum Safe Altitude Warning (MSAW));
- сигнализация отклонений от глиссады (Approach Path Monitor (APM));
- сигнализация о проникновении в зону ограничения использования воздушного пространства (Area Proximity Warning (APW));
- монитор обнаружения среднесрочных конфликтных ситуаций (Medium-Term Conflict Detection (MTCD));
- средство разрешения конфликтных ситуаций (Conflict Resolution Assistant (CORA));
- инструменты планирования очереди и «дозирования» (Sequence and Metering):
- менеджер прилета (Arrival Manager (AMAN));
- менеджер вылета (Departure Manager (DMAN)).

Применение средств автоматизированного управления воздушным движением на разных этапах управления воздушным движением представлено в табл. 1.

Таблица 1

#### Применение средств автоматизированного УВД

Фаза УВД	Тактическое планирование	Наземное аэродромное движение перед взлетом	Набор высоты	Полет по маршруту	Снижение и заход на посадку	Наземное аэродромное движение после посадки
Задействованные средства автоматизированного управления воздушным движением	DMAN	MTCD DMAN (AMAN)	MONA SNET MTCD CORA	MONA SNET MTCD CORA	MONA SNET MTCD CORA AMAN (DMAN)	DMAN

#### Перспективные средства поддержки принятия решения диспетчерами УВД

**Менеджер прилета (Arrival Manager (AMAN))** позволяет организовать прилетающие воздушные суда в эффективную и безконфликтную очередь для посадки в аэропорту назначения. AMAN дает возможность оптимально использовать взлетно-посадочную полосу, сокращает число полетов в зоне ожидания, снижая экологическую нагрузку и уровень шума, повышает пропускную способность аэропортов и сокращает рабочую нагрузку на авиадиспетчеров, оптимизируя транспортные потоки.

Основной процесс кратко показан на рис. 2, 3 и "общем" сценарии:

1. На расстоянии 150-200 морских миль от точки приземления самолет захвачен для организации. Это расстояние часто называют зоной действия AMAN.
2. Система AMAN, находящаяся на земле, вычисляет предпочтительное время прибытия.
3. Воздушное судно встраивается в очередь в потоке движения в зависимости от его вычисленного предпочтительного времени прибытия и критериев создания очереди. AMAN предусматривает поглощение задержки во время полета вместо использования зон ожидания, или, по крайней мере, сокращение ожидания до минимума.
4. Система AMAN отображает уведомления и рекомендации диспетчерам УВД.

5. Информация (рис. 4) используется для создания очереди захода на посадку (с помощью радиотелефонной связи).

6. Воздушное судно следует указаниям диспетчеров УВД.

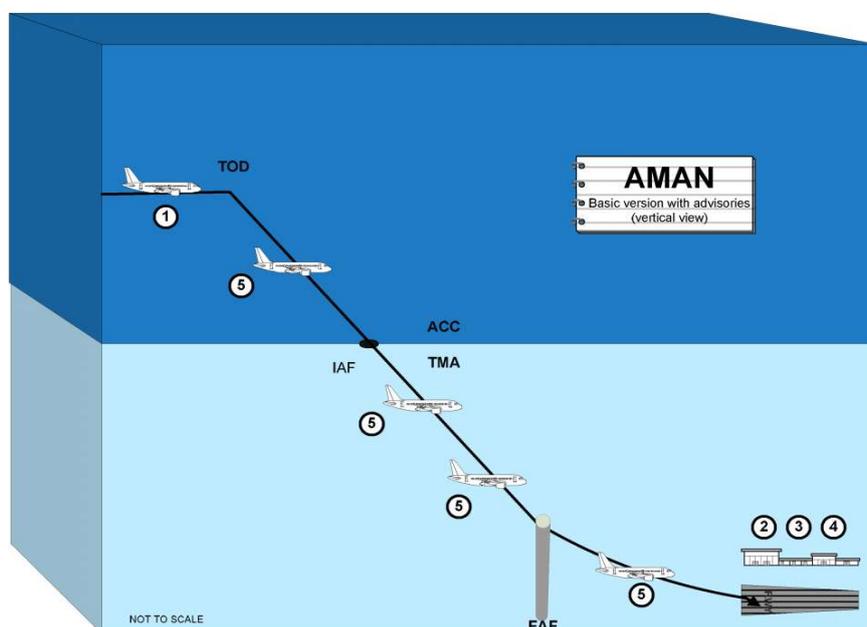


Рис. 2. AMAN (вид по вертикали)

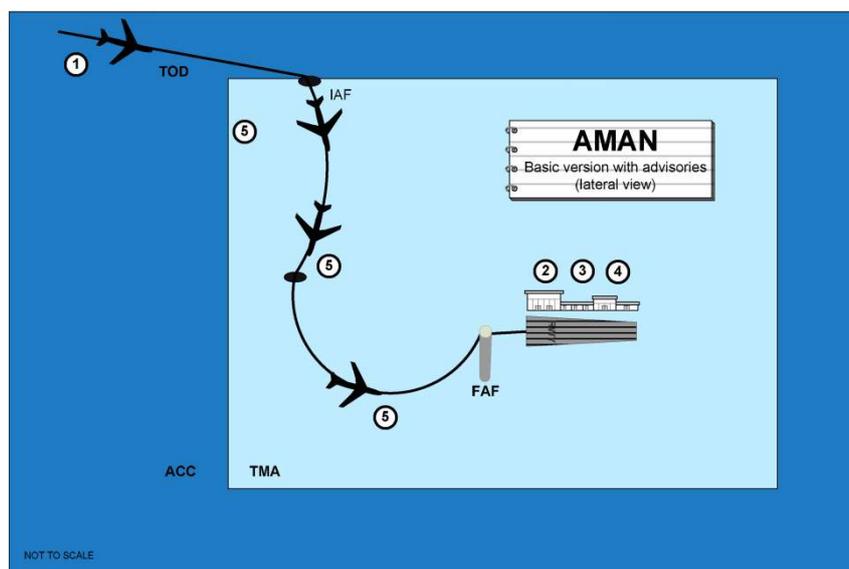


Рис. 3. AMAN (вид по горизонтали)



Рис. 4. "L1" – информация о задержке в сроке формуляра

**Менеджер вылета (Departure Manager (DMAN))** является наземным инструментом планирования. DMAN помогает диспетчерам в управлении вылетающими воздушными судами, обеспечивая взлет по расписанию, а также оптимизированные и бесконфликтные траектории набора, в целях оптимального использования потенциала взлетно-посадочной полосы и воздушного пространства аэродромного диспетчерского района.

Для каждого вылетающего воздушного судна, как только план полета становится доступен, DMAN выделяет взлетно-посадочную полосу и вычисляет время запланированного взлета. Очередь вылетающих воздушных судов регулярно обновляется, чтобы соответствовать текущей воздушной ситуации.

Для создания оптимизированной последовательности вылетающих воздушных судов Менеджер вылета учитывает множество факторов:

- ограничения наземного движения;
- ограничения использования взлетно-посадочных полос;
- ограничения организации воздушного движения в аэродромном диспетчерском районе;
- условия передачи на Диспетчерский Пункт Подхода.

DMAN планирует траектории вылета в пределах аэродромного диспетчерского района и на этапе руления передает запланированную траекторию на борт воздушных судов.

Менеджер вылета способен поддерживать безопасное и оптимизированное использование взлетно-посадочной полосы входящим и исходящим потоками, во взаимодействии с Менеджером прилета (AMAN).

**Средство разрешения конфликтных ситуаций (Conflict Resolution Assistant (CORA))** – средство, базирующееся на мониторе среднесрочных конфликтных ситуаций (MTCD), предназначенное не только для представления информации о предполагаемых сближениях между воздушными судами (потенциальных конфликтных ситуациях), но и выдаче диспетчеру ОВД рекомендаций по разрешению конфликтных ситуаций, основанных на планах полетов и прогнозируемых траекториях полета.

CORA будет оказывать помощь диспетчерам в решение следующих задач:

- планирование;
- мониторинг и оценка конфликтов;
- отслеживание конфликтных ситуаций;
- реализация решения.

Предусмотрена 3-х уровневая реализация CORA:

CORA – 1:

- отображение подробной и отфильтрованной информации о потенциальной конфликтной ситуации;
- обеспечение «что-если» прогнозирования и ввода в систему решения конфликтной ситуации, как основы для новой траектории полета.

CORA – 2 (в дополнение к основному функционалу CORA – 1):

- информация фильтруется по угрозе столкновения.

CORA – 3 (в дополнение к основному функционалу CORA – 1 и CORA – 2):

- использование возможностей цифровой передачи данных («земля-земля» и «земля-воздух») для оптимального разрешения и реализации решения конфликтных ситуаций на земле и в кабине воздушного судна.

## **Выводы**

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.

Однако возможности этих средств могут быть ограничены:

- во-первых, предполагаемой зоной действия AMAN/DMAN – 400 км (150-200 морских миль);
- во-вторых, использованием этих средств в аэроузловом диспетчерском районе с несколькими аэропортами с одинаковой загрузкой (Московский аэроузловой диспетчерский район с аэропортами Шереметьево, Домодедово, Внуково), которое предполагает дополнительную организацию потоков воздушных судов прилетающих/вылетающих из разных аэропортов.

Применение автоматизированного управления потоками воздушных судов должно компенсировать эти ограничения и, кроме того, будет иметь собственные достоинства:

1. Расширение зоны действия до 500-700 км дает дополнительные возможности по поглощению задержки на маршруте вместо использования зоны ожидания.

2. Предоставление рекомендаций диспетчеру УВД не только по времени пролета контрольных точек организации очереди захода на посадку, но и рекомендации по высотам пролета этих точек во взаимодействии с CORA с целью обеспечения очередности захода на посадку на разные аэродромы диспетчерского района.

3. Формирование вылетающего потока при взаимодействии DMAN и CORA с целью скорейшего занятия воздушными судами наивыгоднейших эшелонов полета.

4. Переход от прогнозирования конфликтов к их предотвращению на этапе планирования.

Автоматизированное управление потоками воздушных судов должно привести к уменьшению загрузки диспетчеров УВД при увеличении пропускной способности секторов УВД, уменьшению количества конфликтов воздушных судов в воздухе и оптимальному использованию взлетно-посадочных полос различных аэродромов диспетчерского района.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. EUROCONTROL «Operational Requirements Document for EATCHIP Phase III ATM Added Functions Volume 0 - General».
2. EUROCONTROL «Operational Requirements Document for EATCHIP Phase III ATM Added Functions Volume 3 AMAN».
3. EUROCONTROL «Operational Requirements for Trajectory Prediction for EATCHIP Phase III».
4. EUROCONTROL «Operational Requirements For Flight Data Processing And Distribution Core Functions».
5. EUROCONTROL DOC 98-70-18 «PHARE Advanced Tools. Departure Manager. Final Report».

#### ADVANCED ATC SUPPORT TOOLS

Kononov A.E., Yurkin Y.A.

In the article ATM automated functions is considered. The analysis of an ATM added functionality and advanced ATC support tools is carried out.

**Key words:** automated functions, ATM added functionality, advanced ATC support tools.

#### Сведения об авторах

**Коновалов Александр Евгеньевич**, 1970 г.р., окончил Академию ГА (1992), аспирант МГТУ ГА, область научных интересов – организация воздушного движения.

**Юркин Юрий Алексеевич**, 1934 г.р., окончил ВАУ ГА (1966), заслуженный пилот СССР, кандидат технических наук, профессор кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, автор более 20 научных работ, область научных интересов – аэропортовая деятельность, обеспечение полетов.

УДК 338.45:621:38.47

## ИННОВАЦИИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ

М.В. ГОРБАЧЕВ, В.И. ГОРБАЧЕВ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Нечаевым Е.Е.**

Рассматриваются предпосылки инновационного развития в авиационной отрасли, принципы повышения эффективности НИОКР за счет использования концепции открытых инноваций, а также организации сотрудничества с научным сообществом, исследовательскими центрами и отраслевыми игроками.

**Ключевые слова:** инновации, открытые инновации, НИОКР, совместные предприятия, авиационная промышленность, источники инноваций.

Экономический кризис, рост стоимости авиатоплива, либерализация рынка авиаперевозок, а также все возрастающая конкуренция, перегруженность основных хабов, требования надзорных органов по ограничениям шума и эмиссии CO<sub>2</sub> заставляют авиакомпании искать новые инновационные бизнес-модели. Как следствие, выдвигаются повышенные требования к авиационной промышленности, связанные с экономической эффективностью, безопасностью, экологичностью и пользовательским комфортом выпускаемых воздушных судов. В свою очередь компаниям авиационной промышленности требуются новые современные технологии для ответа на данные требования. Кроме того, авиационная промышленность является высокотехнологичной отраслью, и, следовательно, компании данной отрасли испытывают давление по обновлению своих технологий во избежание риска технологического отставания от конкурентов. В то же время спецификой авиационной промышленности и авиатранспорта является высокий уровень регулирования со стороны надзорных органов в связи с повышенными требованиями к безопасности выпускаемых воздушных судов и авиаперевозок, что приводит к длительному циклу инноваций.

В настоящее время основные области инноваций в авиационной промышленности можно разбить на три группы:

1. Инжиниринг: аэродинамика, системы воздушного судна, вопросы окружающей среды, управление жизненным циклом продукта (САПР, параллельный инжиниринг).
2. Производство: повышение качества и производительности производства, распределенное производство.
3. Бизнес: инновационный менеджмент, схемы организации закупок и послепродажного обслуживания, инновационные отношения с поставщиками.

Новые идеи требуют длительной проверки, и зачастую время от разработки до внедрения новых решений составляет 10-15 лет. Как показали Хирш-Крейнсен и Якобсон [1], комбинация высокой стоимости и сроков инноваций в авиационной промышленности и высокого уровня регулирования ставит предприятия перед проблемой: если затраты понесены одной компанией-инноватором, то после сертификации инноваций регулирующими органами результаты нововведения становятся доступными конкурентам. Таким образом, первопроходец иногда теряет конкурентное преимущество за счет более высоких изначальных затрат.

В данных условиях компании должны принимать стратегические решения проводить НИОКР собственными подразделениями или вступать в альянсы с отечественными или иностранными компаниями и получать знания и технологии на стороне, используя модель открытых инноваций.

В то время как авиационная промышленность характеризуется высоким уровнем технологий и НИОКР в конечном счете пользователями продукции являются авиакомпании, которые

представляют в основном низкотехнологичные стандартизированные продукты и услуги, например, в области пассажирских перевозок. В то же время в этом секторе также существует большое количество инноваций. Как пример, можно привести инновационную бизнес-модель «лоу-кост» авиакомпаний.

На примере авиакомпании ОАО «Аэрофлот» к основным направлениям научно-технологического развития авиакомпаний можно отнести:

1. Технологии, направленные на повышение уровня безопасности и надежности, предотвращение авиакатастроф.
2. Технологии "озеленения" авиаперевозок — экологические и эргономические системы.
3. Технологии энергосбережения и снижения ресурсоемкости.
4. Технологии, направленные на повышение физической и экономической доступности авиатранспорта, а также на рост удовлетворенности и лояльности клиентов.
5. Технологии оптимизации наземной авиационной инфраструктуры с использованием новейших информационных и логистических систем.

Сложностью в инновационной активности авиакомпаний является то, что, в отличие от производственных предприятий, сотрудники авиакомпаний (пилоты, диспетчеры и обслуживающий персонал) физически разобщены, т.к. летные экипажи постоянно перемещаются. Многие исследователи отмечали, что важным фактором внутрикорпоративных инноваций является активное сотрудничество и общение между сотрудниками компании, что для авиакомпаний практически неосуществимо. В таких условиях внешние источники инноваций играют важную роль для авиакомпаний.

В развитии своей концепции «открытых инноваций» Г. Чесборо [2; 3] утверждал, что «в мире, где знания широко распределены, компании должны привлекать сторонние технологии в свой бизнес и открывать свои технологии для пользования другим компаниям». Открытые инновации стали популярными в последнее десятилетие, когда инновации и их источники претерпели значительные изменения с точки зрения их организации. Эти изменения могут быть связаны с быстро меняющейся глобальной технологической базой.

Ярким примером открытой инновационной платформы может служить объединение EADS, Boeing и Embraer для разработки и внедрения авиационного биотоплива. Конкуренты объединились для того, чтобы достичь заданных целей по использованию биотоплива в авиаперевозках в 4% к 2020 г. [4].

Ш. Николс-Никсон [5] показала, что во время изменения технологической основы в отрасли подход компании к источникам знаний важен в формировании новых знаний, необходимых для создания новых инновационных продуктов. Эксперты предостерегают о наступлении нового технологического режима, где технологические разработки принципиально изменят инновационный процесс: постановку проблем, используемые методы и применяемые технологии для решения поставленных задач. Исследования в начале века показали, что, в общем, компании показали снижение способности реагировать на возникающие технологические вызовы. "Всеобъемлющие технологические изменения" определяют основные способности, которые необходимы, чтобы быть конкурентоспособным. Как писали в своей работе Беттис и Хитт [6], быстрое реагирование на технологические изменения имеет решающее значение в этой изменяющейся конкурентной среде. Компании непрерывно нуждаются в обновлении своих ноу-хау, так как это является одним из ключевых качеств для выживания на конкурентном рынке.

Новая технологическая среда подтолкнула компании в направлении создания совместных схем работы и все более открытых инновационных платформ. Это означает, что в компаниях возрастает роль управления информационными потоками и многообразными структурами знаний. При этом, отталкиваясь от общей базы знаний и используя диверсифицированные источники знаний, инновационность компании может резко возрасти [7]. Арора и Гамбарделла [8] предположили, что для доступа к различным типам знаний должны использоваться различные типы сотрудничества между компаниями. Нагараджан и Митчелл [9] выявили, что, например,

совместные предприятия чаще используются для создания существенных технологических изменений, внутренние НИОКР чаще используются для развития текущих технологий, а другие формы взаимодействия между компаниями, не предусматривающие совместного участия в капитале (например, лицензирование), более распространены в случае дополняющих технологических изменений (например, радикальные технологические изменения, которые могут существенно повлиять на вспомогательную деятельность компании, но существенно не затрагивают основную деятельность). Научным сообществом исследовался не только тип внешних источников, но и сами источники инновационных знаний и потенциал создания таких знаний. Было доказано, что альянсы между компаниями способны принести важные конкурентные преимущества в инновациях для партнеров [10;11].

В качестве успешного примера совместного предприятия, которое направлено на получение конкурентных преимуществ в инновациях, можно привести PowerJet – совместное предприятие НПО "Сатурн" и французской компании Snecma по выпуску двигателей для региональных самолетов Sukhoi SuperJet 100 - SaM146. По словам генерального директора ОАО НПО "Сатурн" Ю. Ласточкина «Сатурн», имея колоссальный опыт производства двигателей для коммерческой авиации (более 8 тыс. двигателей семейства Д-30КУ/КП), не имело возможности самостоятельно создавать современный двигатель для магистральных самолетов ввиду глубокого технологического отставания от лидеров области. Со своей стороны компания Snecma, имея успешный проект партнерства с General Electric по созданию двигателя для магистральных самолетов (CFM-56), рассматривала возможность создания двигателей для сегмента региональных самолетов, где на тот момент была монополия двигателя CF34 все той же компании General Electric. В результате партнерства НПО "Сатурн" получило доступ к новейшим технологиям проектирования, управления, логистики, сертификации двигателя [12].

В то же время часть исследователей считают, что весьма важным для повышения корпоративных инноваций является поддержание связей с университетами и профессиональными сообществами. В авиации существует множество примеров такого успешного взаимодействия.

Например, канадский авиапроизводитель Bombardier успешно взаимодействует с квебекским консорциумом исследований и инноваций в авиации (CRIAQ), который объединяет университеты, исследовательские центры и промышленные предприятия. Целью консорциума является повышение конкурентоспособности авиакосмической промышленности через развитие коллективных знаний путем улучшения обучения и тренинга студентов и базируется на 5 основных направлениях:

1. Проведение совместных исследовательских проектов по заданиям промышленных предприятий.
2. Создание новых инновационных технологий, которые могут быть применены в авиакосмической промышленности, а также управление интеллектуальной собственностью.
3. Тренинг исследователей.
4. Продвижение в научном сообществе разрабатываемых авиакосмических технологий и существующих исследовательских проблем.
5. Интернациональное взаимодействие с зарубежными исследовательскими центрами.

Интересным также является опыт взаимодействия авиакомпании AirFrance - KLM с Дельфтским технологическим университетом, который не ограничивается только созданием профильной кафедры и исследовательскими проектами, но включает в себя инвестиции авиакомпании в малые инновационные предприятия университета. Для этих целей AirFrance - KLM совместно с аэропортом Шипхол, Рабобанком и Дельфтским технологическим университетом создали венчурный фонд Mainport Innovation Fund для инвестиций в технологические стартап компании. Среди инвестиций этого фонда компании по созданию тренажеров для пилотов, мониторингу орнитологической ситуации, выработке ветровой электроэнергии во время полета [13].

В нашей стране можно привести пример концерна EADS, который подписал соглашение о долгосрочном научном сотрудничестве с Российской академией наук и Санкт-Петербургским

государственным политехническим университетом, а также создал исследовательский центр в Сколково.

Ведущая российская авиакомпания ОАО «Аэрофлот» также развивает сотрудничество с вузами и научно-исследовательскими центрами в рамках своей Программы инновационного развития ОАО «Аэрофлот – Российские авиалинии». В качестве успешного примера такого сотрудничества можно привести увеличение количества НИР с МГТУ ГА, а также приобретение авиакомпанией исключительных прав на патенты на изобретение «Способ обеспечения орнитологической безопасности аэропорта» и на патенты на полезные модели «Система пространственной ориентации пилотов воздушных судов при посадке» и «Тренажерный комплекс для обучения авиадиспетчеров диспетчерских пунктов руления, старта и посадки на реальном летном поле», разработанных учеными университета.

Тем не менее, положительный эффект от совместной работы с внешними источниками инноваций обусловлен способностью самих компаний успешно устанавливать и использовать эти связи. Данная компетенция становится ключевой для поддержания конкурентоспособности как высокотехнологичных компаний авиационной промышленности, так и авиакомпаний. Компании вынуждены заново пересматривать принципы работы с интеллектуальной собственностью, взаимодействия и обмена информацией с внутренними и внешними контрагентами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Hirsch-Kreinsen H., Jacobson D.** “Innovation in Low Tech Firms and Industries” Edward Elgar Publishing Limited, UK, 2008.
2. **Chesbrough H.** The era of open innovation. MIT Sloan Management Review, 2003. 44, 35-41.
3. **Chesbrough H.** Open Innovation: the new imperative for creating and profiting from innovation. Harvard Business School Press, Boston, 2003.
4. Сайт EADS <http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-boeing-embraer-collaborate-on-aviation-biofuel-commercialisation/>.
5. **Nicholls-Nixon S., Woo C.** Technology sourcing and output of established firms in a regime of encompassing technological change. Strategic Management Journal 24 (7), 2003. 651-666.
6. **Bettis R., Hitt M.** The new competitive landscape. Strategic Management Journal 16, 1995. 7-19.
7. **Foster R., Kaplan S.** Why companies that are built to last underperform the market- and how to successfully transform them. Doubleday/Currency, 2001.
8. **Arora, Fosfurri A., Gambardella A.** Markets for technology: the economics of innovation and corporate strategy. MIT press, Cambridge, MA, 1990.
9. **Nagarajan, Mitchell W.** Evolutionary diffusion: internal and external methods used to acquire encompassing, complementary and incremental technological changes in the lithotripsy industry. Strategic Management Journal 19 (11), 1998. 1063-1077.
10. **Dushnitsky G., Lenox M.** When do firms undertake R&D by investing in new ventures? Strategic Management Journal 26, 2005. 947-965.
11. **Hagedoorn J., Schakenraad S.** The effect of strategic technology alliances on company performance. Strategic Management Journal 15, 1994. 291-309.
12. **Пантелеев О.** Мы близки со Snesma по ментальности // Коммерсант - Business Guide, 02.04.2008 г.
13. Сайт Mainport innovation fund <http://www.mainportinnovationfund.nl/Portfolio/Overview>.

#### INNOVATIONS IN AVIATION INDUSTRY

Gorbachev M.V., Gorbachev V.I.

In the article described causes and prerequisites of innovations in aviation industry. Is shown principles of open innovations and forms of using external innovations to increase company own R&D efficiency.

**Key words:** innovations, open innovations, R&D, joint venture, aerospace industry, external sourcing, alliances.

**Сведения об авторах**

**Горбачев Максим Васильевич**, 1975 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (1997), Финансовую Академию при Правительстве РФ (2000), заместитель директора Дирекции бизнес-планирования ЗАО «Гражданские самолеты Сухого», область научных интересов – инновации, бизнес планирование.

**Горбачев Василий Иванович**, 1946 г.р., окончил КИИ ГА (1970), начальник отдела инновационной работы МГТУ ГА, автор 11 научных работ, область научных интересов – информационные технологии в гражданской авиации, коммерциализация разработок в ведущих российских авиакомпаниях.

УДК 629.7.351

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ГОЛОСОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

А.Ю. ИВАНОВ, К.А. АСТАПОВ, А.П. ПЛЯСОВСКИХ

Рассмотрены вопросы распознавания речи, проанализированы перспективы использования систем голосового управления в тренажерных комплексах УВД. Предложен метод повышения эффективности распознавания речи путем использования контекстного анализа элементов фразеологии радиообмена при выполнении полётов и управлении воздушным движением.

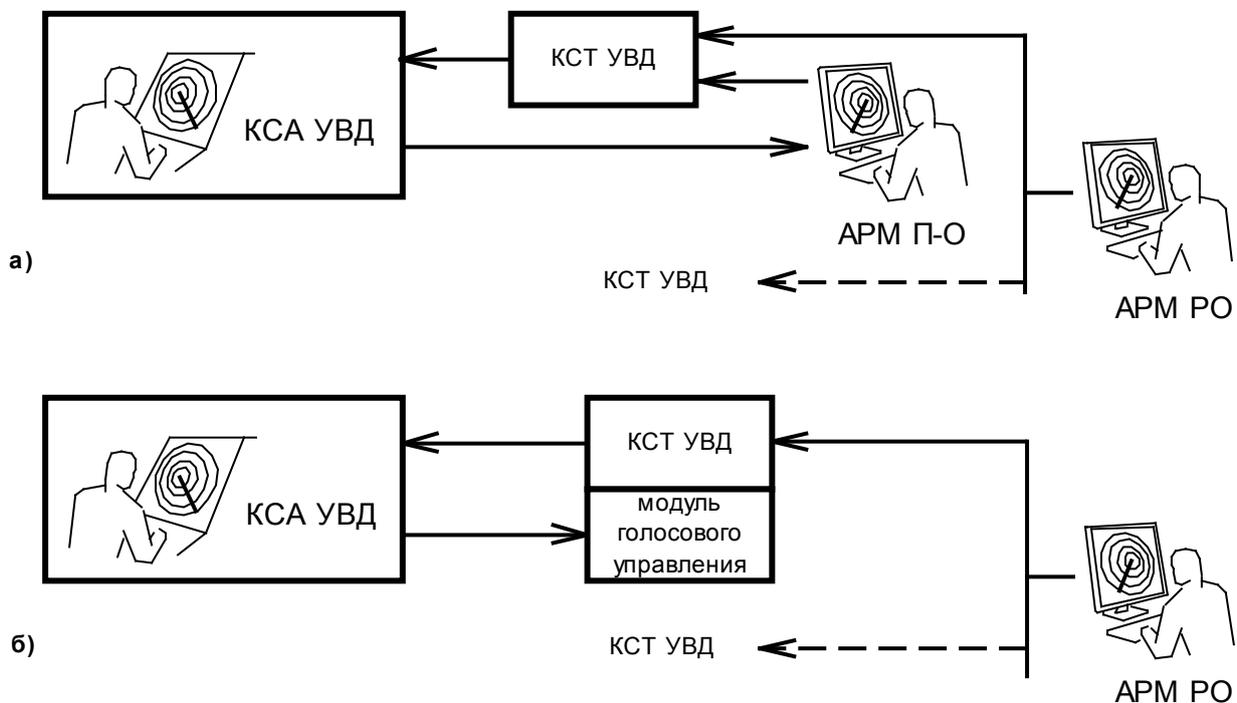
**Ключевые слова:** распознавание речи, голосовое управление, тренажерный комплекс УВД.

Автоматизированная система управления воздушным движением (АС УВД) – это сложная полиэргатическая система, осуществляющая управление динамическими объектами, главной целью которой является наиболее эффективное использование воздушного пространства [1]. Это достигается путем обеспечения требуемой пропускной способности элементов УВД и экономичности полетов воздушных судов (ВС) при соблюдении требуемого уровня безопасности полетов.

Важным аспектом в деятельности системы УВД является подготовка специалистов службы движения. Эту задачу призваны решать комплексные системные тренажеры УВД (КСТ УВД), основная функция которых вырабатывать навыки, позволяющие в полном объеме решать задачи, стоящие перед службой движения. Однако подобные тренажерные системы обладают рядом недостатков, связанных с необходимостью использования в обучении пилотов-операторов: субъективизм в обучении и в оценке качества работы тренируемого диспетчера, ошибки, сопровождающие процесс обучения, высокая стоимость обучения. Разработка системы голосового управления для тренажера могла бы позволить избавиться от этих недостатков. Поскольку основная задача пилота-оператора заключается в том, чтобы имитировать радиообмен и обеспечивать динамическое изменение воздушной обстановки, своевременно реагируя на голосовые команды обучаемого, то модуль голосового управления мог бы взять на себя часть его функций или даже полностью исключить участие человека из процесса обучения (рис. 1). Кроме этого разработка системы голосового управления могла бы позволить создать ряд процедурных тренажеров, нацеленных на отработку у диспетчеров навыков, связанных с использованием речевых сообщений и позволяющих более полно, автоматически оценивать их профессиональный уровень.

Рассмотрим основные методы распознавания. Как правило, в существующих системах используются два подхода: распознавание голосовых меток и распознавание лексических элементов. Первый подход предполагает распознавание фрагментов речи по заранее записанному образцу: пользователь записывает в устройство голосовую метку (это может быть любое слово или фраза), которую ассоциирует с какой-либо командой, и впоследствии использует эту фразу для выполнения заданного приказа. Этот подход достаточно прост в реализации и показывает вполне удовлетворительные результаты, если количество команд невелико и устройством пользуется один человек. Однако данный метод мало подходит для задания большого количества команд, т.к. в этом случае требуется много хорошо отличимых друг от друга уникальных голосовых меток, что уже является проблемой для органов человеческой речи. Кроме того, необходимость в точности воспроизводить заданную голосовую фразу также вызывает определенные трудности в процессе использования. Второй метод основывается на выделении из потока речи отдельных лексических элементов (букв или слогов), с помощью которых в свою очередь рас-

познаются слова и предложения, т.е. осуществляется полноценное распознавание [2]. Этот способ отличает гораздо более сложная реализация, но зато большая гибкость и точность. Построение команд, применяемых для УВД, использует строго формализованную структуру, для их формирования употребляется фиксированный словарь и лингвистические конструкции, утвержденные нормами ИКАО, т.е. для любой ситуации предусмотрено свое уникальное сообщение, которое, впрочем, может незначительно отличаться от какого-либо другого с похожим содержанием [3]. Конечно, в реальной жизни далеко не всегда удается ограничиваться набором готовых форм и, кроме того, могут случаться внештатные ситуации, для разрешения которых утвержденного лексикона может оказаться не достаточно. Однако подавляющее большинство голосовых сообщений возможно представить изначально. Достаточная сложность построения и сходность звучания делают затруднительным распознавание по меткам, но, с другой стороны, некоторая предсказуемость позволяет несколько упростить распознавание по элементам. Таким образом, для построения системы голосового управления воздушным движением второй подход представляется более перспективным.



**Рис. 1.** Структурная схема тренажерного комплекса УВД:

а) при наличии пилота-оператора; б) при наличии модуля голосового управления:

КСА УВД – комплекс средств автоматизации управления воздушным движением; КСТ УВД – комплексный системный тренажер; АРМ П-О – автоматизированное рабочее место пилота-оператора; АРМ РО – автоматизированное рабочее место руководителя обучения

Проведем краткий обзор процесса распознавания речи и традиционно используемых при этом механизмов. Распознавание, как правило, начинается с выделения информативных признаков речевого сигнала. Человеческая речь представляет собой сплошной поток звуков, которые делятся на голосовые и шумовые. Голосовые звуки образуются путем накладывания на основной тон модулирующих частот. Наиболее активную роль играют четыре из них, они называются формантными. Шумовые звуки можно разделить на турбулентные и импульсные. Турбулентные образуются за счет прохождения воздуха через сужения голосового тракта. Импульсные получаются при резком изменении давления при прерывании струи воздуха. Получить из шумовых звуков формантные составляющие весьма затруднительно. Таким образом, информа-

ционные составляющие доступные для анализа строятся из формантных частот и шума [2]. Выделения информативных признаков речевого сигнала обычно происходит в два этапа. На первом осуществляется получение частотного спектра речевого сигнала. Обычно оно заключается в обработке сигнала с использованием набора полосовых фильтров, выполняя оконное преобразование Фурье, либо вейвлет-преобразования. На втором этапе выполняются преобразования полученного речевого сигнала: логарифмическое изменение масштаба в пространстве амплитуд и частот, сглаживание спектра с целью получения его огибающей, кепстральный анализ.

Процесс распознавания осуществляется путем сравнения полученного сигнала с набором акустических моделей. Наиболее распространенная из них – шаблонная, в которой по образцу сопоставляются различные варианты произношения слова целиком и модель состояний, где сравнение происходит с набором звуков, который выбирается согласно неким вероятностным правилам. В результате работы система выдает несколько вариантов последовательностей, которые наиболее соответствуют входному набору [4]. Ключевым моментом, обуславливающим успех распознавания, является процедура сравнения полученных составляющих с эталонными значениями. Для её решения, как правило, используются алгоритмы, основанные на скрытых марковских моделях или нейронные сети. При использовании марковских моделей сопоставление осуществляется с элементами (словами или их составляющими), вероятность появления которых, исходя из текущей последовательности элементов речи, наиболее высока [4]. При использовании искусственных нейронных сетей (ИНС) распознавание осуществляется благодаря тому, что нейронные сети (а именно, самый распространённый их вид – перцептроны) являются универсальными аппроксиматорами. Доказано, например, что двухслойный перцептрон (один из самых распространённых видов ИНС) способен аппроксимировать произвольную непрерывную функцию [5; 6; 7]. За счёт этого становится возможным обучение ИНС, что позволяет распознавать объекты, принадлежащие к определенному набору классов или группировать объекты по неопределённым заранее видам. Главным преимуществом нейронных сетей является то, что они не требуют никакой информации о решаемой задаче, обучаясь только на примерах. Обучение происходит за счет задания механизма перебора весовых коэффициентов, которые перемножаются со значением входных сигналов и изменяются в зависимости от того, соответствует ли выходной сигнал заданному значению, или нет. Для этого обычно вводят функцию ошибки нейронной сети, а далее минимизируют её стандартными методами, например, методом градиентного спуска, BFGS. Следует различать нейронные сети, построенные на разных принципах и парадигмах (обучение с учителем, без учителя, полуконтролируемое). Выше мы говорили о перцептронах. Как пример иного подхода к ИНС можно привести самоорганизующуюся карту признаков Кохонена. Карты Кохонена – это метод нейросетевой кластеризации данных, нейросетевая версия алгоритма k-means. По этому методу, для каждой группы входных сигналов (кластера) формируются нейронные структуры, определяющие принадлежность к этому кластеру, т.е. каждой комбинации входных воздействий соответствует своя структура, их распознающая и формирующаяся в процессе обучения сети.

Самым популярным и хорошо разработанным методом распознавания речи являются скрытые марковские модели (СММ). Но следует отметить, что использование их для задач голосового управления проблематично, так как они обладают слабой различимостью, особенно на больших словарях. Поэтому нам представляется перспективной для данных задач разработка специализированных ИНС.

По лингвистической классификации, в построении речи можно выделить шесть этапов, каждый из которых в той или иной мере должен присутствовать и в алгоритмах распознавания.

**Фонетический** – на этом этапе оперируют такими понятиями, как фонемы и аллофоны. Фонемы – это единицы звукового строя, которые образуются при произнесении одних и тех же букв в разных сочетаниях. Они характеризуются звонкостью, твердостью, переднеязычностью/заднеязычностью и другими свойствами. Комбинаторные аллофоны – это варианты произнесения одной и той же фонемы с учётом явления коартикуляции. Коартикуляция – это влия-

ние фонетического окружения и положения фонемы на её произношение. Различают так же основной аллофон – это такой аллофон, произнесение которого минимально зависит от его положения и фонетического окружения.

**Фонологический** – на этом уровне определяются комбинации фонем и аллофонов, реально встречающихся в заданном языке.

**Морфологический** – здесь происходят оперирования слогами и морфемами (минимально значимыми частями слова).

**Лексический** – здесь определяются слова и словоформы, возможные для данного языка.

**Семантический** – составляются предложения, т.е. происходит отображение речевых конструкций на понятия и образы, устанавливаются отношения между объектами и обозначающими их словами [2].

Как можно было заметить, на каждом уровне построения, сигнал кодируется представителями предыдущих уровней, т.е. слоги и морфемы составляются из аллофонов, слова из слогов и т.д. При переходе с уровня на уровень, помимо представителей сигналов, также передаются и временные зависимости отношений между сигналами. Собирая сигналы с предыдущих уровней, высшие уровни располагают большим объемом информации, что может быть использовано для управления процессами на низших уровнях.

В рассмотренных выше этапах наибольшую трудность при реализации распознавателя речи представляет собой контекстный анализ, который позволяет выбрать из наиболее вероятных результатов распознавания те, которые соответствуют осмысленным предложениям и более того, максимально подходят под контекст сообщения. Например, человек распознаёт речь в некоторых условиях с точностью не более 80 %, но это не мешает ему воспринимать информацию, т.к. информационные потери и ошибки компенсируются за счёт анализа контекста. Таким образом, заключительным этапом распознавания должно стать оперирование представлениями. На данном этапе развития техники сложно представить возможность конструирования универсального распознавателя речи, наделенного такими свойствами, однако при уменьшении словарного запаса, с которым необходимо работать, а, следовательно, количества объектов и связей между ними, можно получить образную конструкцию, состоящую из ограниченного набора сущностей, все состояния которых и действия над которыми возможно перечислить. Так для систем УВД определение предмета управления на ранних стадиях процесса позволило бы найти набор возможных действий, которые тот мог бы совершать и, соответственно, набор диспетчерских разрешений, которые можно было бы ему отдать. Выявление дополнительных признаков, присущих множеству допустимых диспетчерских разрешений может позволить ещё более ограничить пределы области распознавания, удалив варианты ветвлений, не удовлетворяющих полученным признакам. В качестве одного из возможных решений можно предложить создание моделей диалога, т.е. описание возможных запросов и ответов. Если инициатор диалога - диспетчер или если сообщение ВС требует ответ диспетчера, то пользуясь набором ключевых фраз определить основную тему, найти соответствующую ей модель и выявить возможные варианты хода беседы. Далее, опираясь на лексические конструкции этих вариантов выделить оставшиеся нерасшифрованными фрагменты, сделать предположения о характере их содержания (например числовые значения). Ограничив подобным образом область возможных значений оставшейся нераспознанной части, сделать новый поиск, перебирая значения из полученного набора (например, перебирая цифры).

В качестве примера рассмотрим диалог, в котором задается команда изменения высоты ВС. Данное сообщение может инициироваться диспетчером, например, при возникновении конфликтных ситуаций. Экипаж, которому адресовано это сообщение, может согласиться, отказать, указав причину или, к примеру, сославшись на неудовлетворительную радиосвязь, попросить повторить. Так же одновременно с командой изменения высоты сообщение может содержать информационную часть, например, о текущем местоположении ВС, об опасных метеоявлениях или ещё одну команду.

На первом этапе необходимо выделить из фразы командную и идентификационную части. Для этого нужно определить является ли сообщения началом нового, продолжением существующего или обращением ко всем, т.к. в первом случае сообщению предшествует адресная конструкция, в которой содержится имя получателя и имя отправителя. Во втором её может и не быть, а в третьем сообщения начинаются со стандартной безличностной фразы. Вследствие того, что отправитель известен заранее (к примеру "Moscow Control"), и в ходе тренинга он не меняется, то расшифровку удобнее начинать с этого. Поскольку указание отправителя, происходит как раз между именем получателя и сообщением, то выделив его, мы сразу получим набор звуков, соответствующий первой и второй части. Т.к. любая возможная воздушная ситуация подразумевает вполне определенный набор диспетчерских разрешений, допустимых при её возникновении, будем считать, что команда смены высоты входит в набор разрешенных. Большинство фраз, используемых в УВД, согласно их функциональному предназначению, можно разбить на некие логические группы (например, команды изменения высоты, изменения скорости, команды задания курса, метеосводки и др.). Каждая из этих групп использует определенный набор словосочетаний, употребляемых в определенном порядке, присущим только ей одной. Назовем их ключевыми. Таким образом, можно предположить, что если в полученном диспетчерском разрешении удастся выделить ключевые слова, то путем сравнения порядка их употребления с эталонными последовательностями ключевых слов, удастся с достаточно высокой степенью вероятности определить принадлежность полученной команды к той или иной группе. Этот вывод позволит далее выбирать варианты для определения нераспознанных слов, исходя из возможности их употребления в найденной группе. Причем порядок их употребления относительно ключевых может внести дополнительные ограничения в перечень возможных вариантов и тем самым ещё более уменьшить количество доступных вариантов, а в случаях особых затруднений способствовать составлению адекватной замены нераспознанной части фразы.

Hifly 45 **Moscow control** Desend to **flight level** 600 meters now **due** traffic ahead

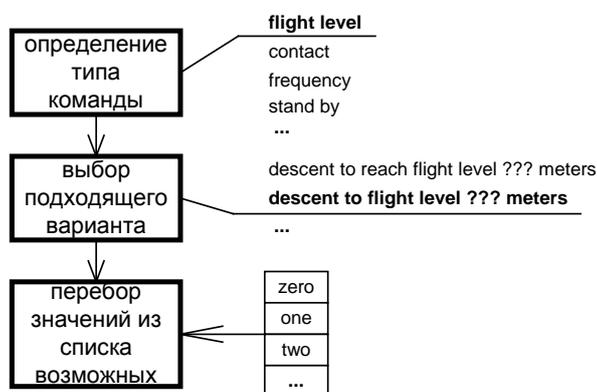


Рис. 2. Обобщенная блок-схема распознавания элементов фразеологии диспетчера УВД

Так для команд изменения эшелона (высоты) полета в качестве ключевых к примеру можно использовать "climb", "descend", "maintain", "flight lever" и т.п. Т.е., обнаружив любое вхождение из вышеперечисленного списка в указанном порядке, можно сделать вывод, что речь идет об изменении эшелона. Исходя из этого, получаем следующий список наиболее вероятно используемых фраз: "flight level ???", "descend/climb to flight level ???", "descend/climb to reach flight level ???", "descend/climb at ???", "descend/climb until passing flight level ???" где "???" подразумевается высота в метрах или наименование эшелона (рис.2). Если сообщение не ограничено командной составляющей и имеет нераспознанные участки до или после текста команды, можно предположить, что указывается дополнительная информация, связанная с местом проведения маневра, моментом времени, скорости, чрезвычайными обстоятельствами из-за которых

необходимо изменить направление движения, текущее местоположение ВС и пр., чему соответствует новое множество ключевых слов (after, before, continue, stop и т.п.), которые так же имеют свои закономерности использования и могут способствовать распознаванию остальных частей фразы. Для данного примера требование изменения эшелона сопровождается указанием причины (ключевое слово "due") [3]. Эти правила позволяют уменьшить объем словаря, используемого для распознавания речи, и тем самым снизить вероятность ошибочного распознавания.

Таким образом, предлагаемый в настоящей статье метод распознавания с использованием контекстного анализа элементов фразеологии радиообмена позволит увеличить эффективность распознавания элементов фразеологии диспетчера УВД за счет дальнейшего анализа результатов распознавания, полученных при помощи существующих программных продуктов. Это позволит разработать программный модуль тренажерных комплексов УВД, поддерживающий функции голосового управления, который обеспечит возможность тренировки диспетчерского состава без участия пилотов-операторов, что обеспечит снижение стоимости тренажерной подготовки. Кроме того, наличие подобного модуля позволит создать серию дешевых и малогабаритных процедурных тренажеров для отработки навыков радиообмена как на русском, так и на английском языке. Использование модуля распознавания речи в диспетчерских тренажерах позволит снизить стоимость обучения, а так же уменьшить роль субъективного человеческого фактора, что положительным образом отразится на эффективности подготовки диспетчерского персонала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин В.И., Дарымов Ю.П., Крыжановский Г.А. и др. Организация управления воздушным движением / под ред. Крыжановского Г.А. – М.: Транспорт, 1988.
2. Фролов А.В., Фролов Г.В. Синтез и распознавание речи // Современные решения. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.frolov-lib.ru/books/hi/ch01.html>.
3. Правила и фразеология на английском языке при выполнении полетов и управлении воздушным движением в воздушном пространстве Российской Федерации. - 2-е. изд. – М.: Министерство транспорта РФ. Государственная служба гражданской авиации, 2001.
4. Бойков Ф.Г. Применение вейвлет-анализа в задачах автоматического распознавания речи: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2003.
5. Арнольд В.И. О представлении непрерывных функций трех переменных суперпозициями непрерывных функций двух переменных // Матем. сб. - 1959. - Т. 48(90). - № 1. - С. 3-74.
6. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одной переменной и сложения // ДАН СССР. - 1957. - Т. 114. - Вып. 5. - С. 953-956.
7. Cybenko G. Approximation by Superpositions of Sigmoidal Function. Cybenko G. - Urbana: University of Illinois, 1988.

#### SOME QUESTIONS OF MAKING VOICE COMMAND SYSTEMS WITH APPLY IN AIR TRAFFIC CONTROL TRAINING COMPLEXES

Ivanov A.Y., Astapov K.A., Plyasovskih A.P.

The experience of making speech recognizing in voice command systems is summarized in the report. Some ways of creating speech recognizing gears with applying in Air Traffic control training complexes are outlined.

**Key words:** speech recognizing, voice command.

#### Сведения об авторах

**Иванов Александр Юрьевич**, 1980 г.р., окончил ПГУПС (2002), ЛИМТУ (2008), инженер Санкт-Петербургского всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры (ВНИИРА), область научных интересов – программное обеспечение тренажерно-моделирующих комплексов УВД.

**Астапов Константин Андреевич**, 1981 г.р., окончил СГУ (2004), область научных интересов – нейронные сети, вейвлеты, распознавание речи, искусственный интеллект.

**Плясовских Александр Петрович**, 1960 г.р., окончил Актюбинское высшее летное училище гражданской авиации (1985), доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории

---

Санкт-Петербургского всероссийского научно-исследовательского института радиоаппаратуры (ВНИИРА), автор более 45 научных работ, область научных интересов – автоматизация управления воздушного движения.

УДК 621.396

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ

Б.И. ШАХТАРИН, В.В. ВЕЛЬТИЩЕВ, Т.Г. АСЛАНОВ

В статье рассмотрена линеаризованная модель фазового дискриминатора в системах фазовой автоподстройки. Приведена функциональная модель схемы Костаса с линеаризованной характеристикой фазового дискриминатора, а также имитационная модель электрической схемы Костаса, построенная в среде MultiSim.

**Ключевые слова:** Схема Костаса, фазовая автоподстройка, дифференциальное уравнение.

### 1. Линеаризация дискриминационной характеристики фазового дискриминатора

Фазовый дискриминатор в системах фазовой автоподстройки (ФАП) предназначен для преобразования разности фаз двух гармонических сигналов  $\Delta\varphi$  внешнего и генератора управляемого напряжением (ГУН) в сигнал рассогласования в форме напряжения  $e(\Delta\varphi)$ . Существует огромное количество различных видов дискриминаторов. Некоторые из них приведены в табл. 1, однако в большинстве из приведенных случаев на практике с дискриминатором таких типов затрачивается слишком много времени на вычисления.

**Таблица 1**

	Тип дискриминатора	Фазовая ошибка на выходе дискриминатора
	$D = u_c(t)u_\Gamma(t)$	$\sin(\Delta\varphi)$
	$D = u_c(t)/u_\Gamma(t)$	$\tan(\Delta\varphi)$
	$D = \arctg(u_c(t)/u_\Gamma(t))$	$\Delta\varphi$

Рассмотрим один из простейших видов ФД, суть которого заключается в мгновенном перемножении значений напряжений сигналов внешнего  $u_c(t)$  и ГУН  $u_\Gamma(t)$ :

$$e(t) = ku_c(t)u_\Gamma(t) = \frac{1}{2}kU_c(t)U_\Gamma(t)(\sin \Delta\varphi(t) + \sin[\varphi_\Gamma(t) + \varphi_c(t)]), \text{ где } u_c(t) = U_c(t)\cos \varphi_c(t);$$

$$u_\Gamma(t) = U_\Gamma(t)\cos \varphi_\Gamma(t); \Delta\varphi(t) = \varphi_\Gamma(t) - \varphi_c(t); k - \text{коэффициент передачи перемножителя.}$$

Второе слагаемое в скобках представляет сигнал с частотой, равной сумме частот ГУН и внешнего сигнала, а поэтому этот сигнал не пройдет через фильтр низких частот (ФНЧ), в итоге будем иметь  $e(\Delta\varphi) = 0,5kU_c(t)U_\Gamma(t)\sin \Delta\varphi(t)$ .

Недостатком данного типа ФД можно назвать нелинейность его дискриминационной характеристики, что может негативно сказаться на синхронизации при больших значениях фазовых рассогласований.

Другими распространенными типами ФД можно назвать кольцевой ФД (рис. 1а), использующий в своей основе диодный мост и балансный ФД (рис. 1б), представляющий собой суммарно-разностную схему.

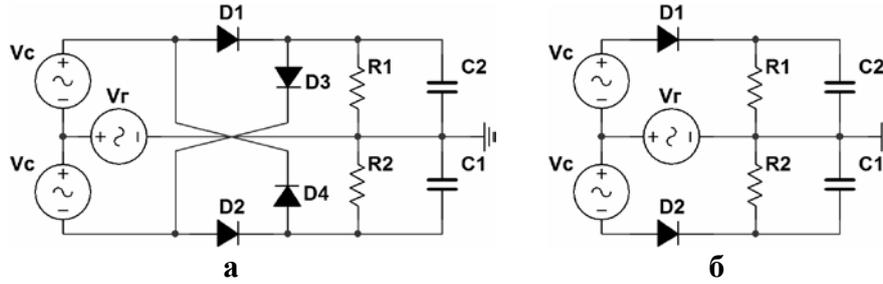


Рис. 1. Кольцевой и балансный ФД

Балансный ФД представляет собой два диодных однотактных ФД, в каждом из которых производится векторное сложение сигналов внешнего  $u_c(t)$  и ГУН  $u_r(t)$ , а далее берется разность обеих плеч для определения фазового рассогласования сигналов:

$$e_1(t) = k\sqrt{u_r^2 + u_c^2 + 2u_r u_c \cos \Delta\varphi}; \quad e_2(t) = k\sqrt{u_r^2 + u_c^2 - 2u_r u_c \cos \Delta\varphi}; \quad e(\Delta\varphi) = e_2(t) - e_1(t).$$

При равных амплитудах будем иметь  $e(\Delta\varphi) = \sqrt{2}ku_c(\sqrt{1 - \cos \Delta\varphi} - \sqrt{1 + \cos \Delta\varphi})$ . В этом случае дискриминационная характеристика принимает вид по форме, близкой к треугольной ломаной линии. Если внешний сигнал и сигнал ГУН отличаются по амплитуде, то на вход внешнего сигнала можно установить две последовательно соединенные микросхемы с усилителями и автоматическими регулировками усиления (АРУ) AD604ARS. На рис. 2 пунктирными линиями приведена идеальная линейная дискриминационная характеристика ФД, точками показана дискриминационная характеристика, полученная по уравнению (2) и сплошная кривая – кривая, полученная при последовательно присоединенном АРУ. Среднеквадратическое отклонение ФД с АРУ от линейной дискриминационной характеристики составляет 0.052.

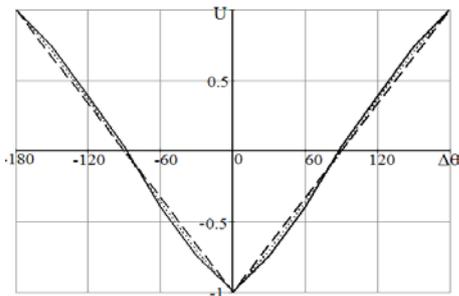


Рис. 2. Дискриминационная характеристика ФД

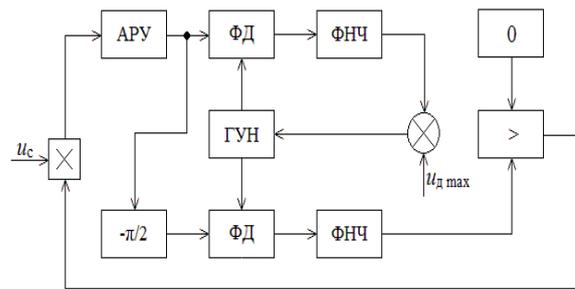


Рис. 3. Функциональная схема ФАП

На рис. 3 приведена функциональная схема ФАП с линеаризованной дискриминационной характеристикой. Так как изображенная на рис. 2 дискриминационная характеристика является четной, введем еще одну ветвь с ФД со смещенным входным сигналом на  $\pi/2$ , которая позволяет определить знак разности фаз. Сигнал с выхода ФД со смещенным входом поступает на компаратор LT1720CDD, и с выхода компаратора поступает на умножение с входным сигналом. На сумматор с сигналом с выхода ФД не со смещенным входом поступает напряжение, равное максимальному значению напряжения рассогласования фаз на ФД  $u_{д\max}$ . После реализации данной схемы дискриминационная характеристика ФД примет вид приведенной на рис. 4.

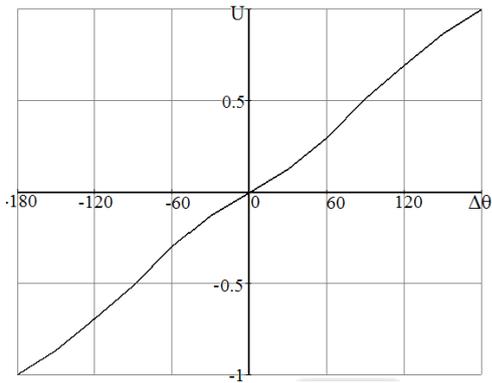


Рис. 4. Дискриминационная характеристика ФД

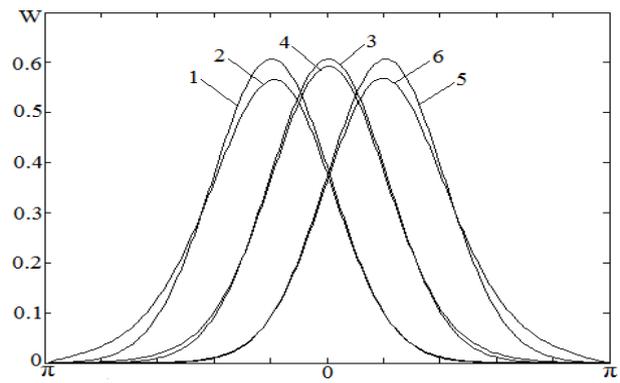


Рис. 5. ПРВ сигнала рассогласования ФАП

На рис. 5 приведены графики плотности распределения вероятностей для ФАП с заменой  $g(x) = x$  и  $g(x) = \sin(x)$ , где кривые 1, 3, 5 получены при линейризованной характеристике фазового детектора, а кривые 2, 4, 6 – при синусоидальной характеристике при значении ОСШ  $r = 2$ . Кривые 1 и 2 получены при значении  $\beta = -1$ ; кривые 3 и 4 при значении  $\beta = 0$ ; 5 и 6 получены при значении  $\beta = 1$ .

## 2. Схема Костаса с линейной характеристикой ФД

Демодуляция сигналов BPSK осуществляется при помощи схемы Костаса, которая приведена на рис. 6, в основе своей использующая систему синхронизации в форме ФАП.

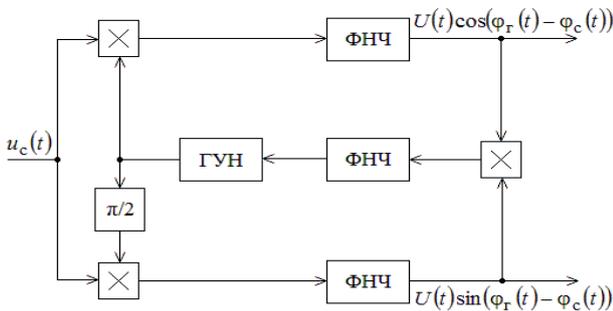


Рис. 6. Функциональная схема петли Костаса

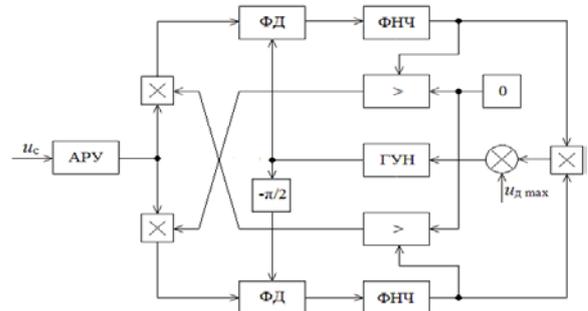


Рис. 7. Функциональная модель петли Костаса

Рассмотрим функционирование схемы Костаса при отсутствии шума на входе, когда входное колебание имеет вид  $u_c(t) = U(t)\cos(\omega t + \varphi_c(t))$ , где  $U(t) = A\cos(\pi s(t))$ , а  $s(t)$  принимает два значения 0 или 1.

Запишем выражение на выходе УГ  $u_r(t) = 2\cos(\omega t + \varphi_r(t))$ .

Тогда на выходе умножителя в верхней ветви (I-ветви) получим

$$e_1(t) = 2U(t)\cos(\omega t + \varphi_c(t))\cos(\omega t + \varphi_r(t)) = U(t)[\cos(\varphi_r(t) - \varphi_c(t)) + \cos(2\omega t + \varphi_r(t) + \varphi_c(t))]$$

Пренебрегая второй гармоникой колебания, которая фильтруется ФНЧ, находим на выходе фильтра  $e_1(\Delta\varphi) = U(t)\cos(\varphi_r(t) - \varphi_c(t)) = A\cos(\pi s(t))\cos(\Delta\varphi)$ .

При условии совершенной синхронизации, когда  $\varphi_r(t) - \varphi_c(t) \approx 0$ , получаем на выходе I-ветви напряжение  $e_1(t) = A\cos(\pi s(t))$ , представляющим собой поток передаваемых данных, т.е. верхняя ветвь совместно с ГУН выполняет роль демодулятора BPSK сигналов.

Рассмотрим работу ФАП. На выходе умножителя в нижней ветви (Q-ветви) получим

$$e_2(t) = 2U(t)\cos(\omega t + \varphi_c(t))\sin(\omega t + \varphi_r(t)) = U(t)[\sin(\varphi_r(t) - \varphi_c(t)) + \sin(2\omega t + \varphi_r(t) + \varphi_c(t))]$$

Пренебрегая второй гармоникой, на выходе ФНЧ получим  $e_2(\Delta\varphi) = U(t)\sin(\varphi_T(t) - \varphi_C(t)) = A\cos(\pi s(t))\sin(\Delta\varphi)$ . На выходе правого умножителя в результате получим  $e_3(t) = 0,5U^2(t)\sin(2\Delta\varphi) = 0,5A^2\cos^2(\pi s(t))\sin(2\Delta\varphi)$ .

В этом напряжении снимается манипуляция за счет возведения в квадрат манипулируемого (на  $\pm 1$ ) колебания, и оно через ФНЧ поступает на ГУН.

В данном случае рассматривался принцип работы схемы Костаса, в которой дискриминатор представлял собой умножитель сигналов I-ветви и Q-ветви.

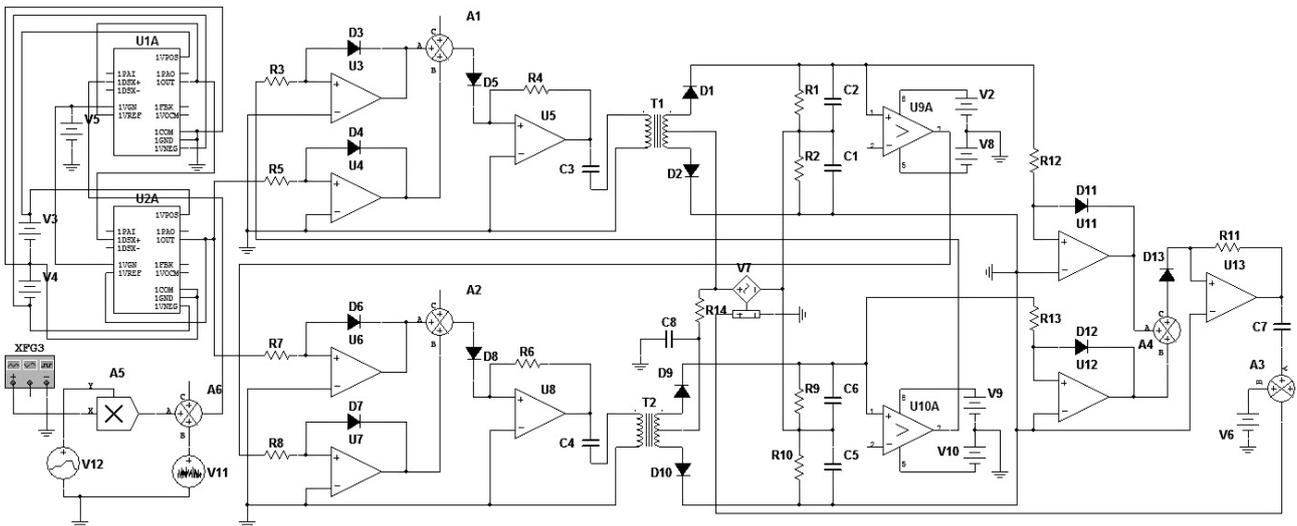
На рис. 7 приведена функциональная модель схемы Костаса с линейризованными дискриминационными характеристиками, где  $U_{\text{дmax}}$  – максимальное значение напряжения на выходе фазового детектора. На рис. 8 приведена электрическая модель схемы Костаса, выполненная в имитационной среде MultiSim.

На рис. 9а и 9б приведены осциллограммы с выходов петлевого ФНЧ схемы Костаса, промоделированной в среде MultiSim с синусоидальной характеристикой фазового детектора (рис. 9а) и с линейризованной характеристикой (рис. 9б).

### Заключение

Таким образом, по результатам сравнительного анализа ПРВ сигнала рассогласования ФАП с линейной и синусоидальной характеристикой ФД показывают, что при нулевой начальной расстройке, расхождения ПРВ в указанных двух случаях несущественны, в то же время при ненулевой начальной расстройке наблюдается более существенные расхождения.

Также при рассмотрении осциллограммы напряжения ошибки с фазового дискриминатора можно отметить, что при линейной характеристике ФД время сведения ошибки к нулю в разы быстрее, чем в случае синусоидальной характеристики ФД.



**Рис. 8.** Модель схемы Костаса электрическая с линейной дискриминационной характеристикой ФД

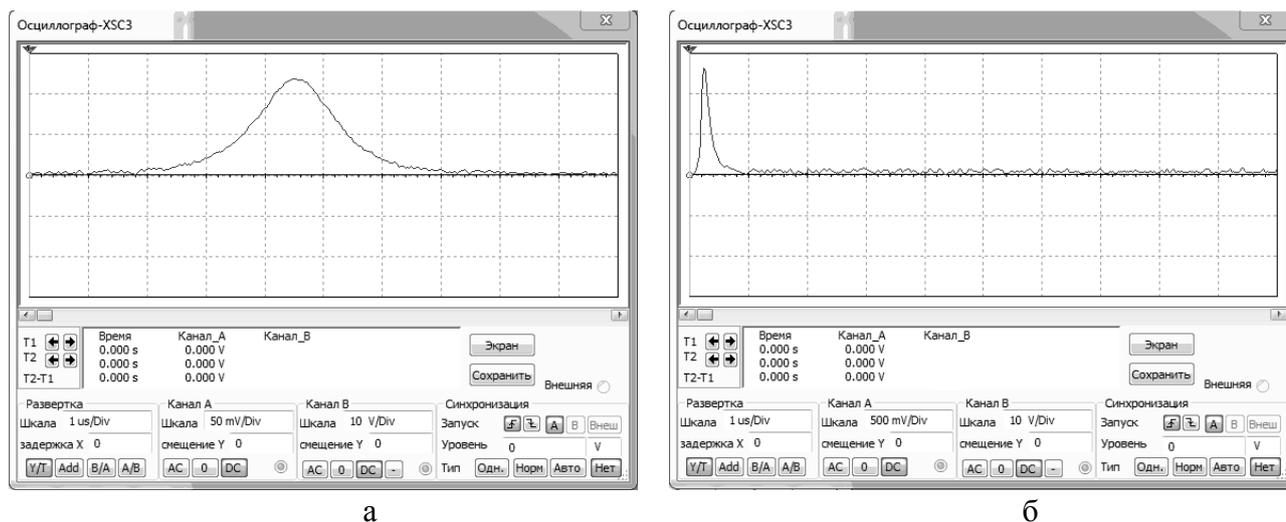


Рис. 9. Осциллограмма с выхода петлевого ФНЧ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Первозванский А.А. Случайные процессы в нелинейных автоматических системах. - М.: Наука, 1962.
2. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации при наличии помех. - М.: ИПРЖР, 1996.

## SIMULATION OF A PHASE-LOCKED LOOP

Shakhtarin B.I., Veltishev V.V., Aslanov T.G.

In this paper the linear model of phase discriminator in a phase-locked loop. Is a functional model of the Costas Loop with linear characteristic of the phase discriminator. As well as a simulation model of an electric Costas Loop built in the environment MultiSim.

**Key words:** phase-locked loop, differential equation, Kostas Loop.

## Сведения об авторах

**Шахтарин Борис Ильич**, 1933 г.р., окончил ЛКВВИА (1958) и ЛГУ (1968), доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 250 научных работ, область научных интересов - радиотехника, статистический анализ, фазовая синхронизация, формирование и обнаружение сигналов.

**Вельтищев Виталий Викторович**, 1943 г.р., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана (1972), кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор более 80 научных работ, область научных интересов - информационные технологии, робототехника, CALS-технологии, имитационное моделирование.

**Асланов Тагирбек Гайдарбекович**, 1988 г.р., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана (2011), аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор 3 научных работ, область научных интересов - системы синхронизации, сейсмологии, радиолокации и радиопеленгации.

**Editor-in-chief**

Boris Eliseev, Rector, MSTU CA.

**Deputy Editor-in-chief**

Vadim Vorobyev, Vice Rector for Research and Innovations, MSTU CA.

**Executive Secretary**

Oksana Feoktistova, Professor, Chair of Safety and Life Activities, MSTU CA.

**Member of the chief editorial Board**

Olga Garanina, Professor, Chair of Humanitarian and Social-Political Sciences, MSTU CA, Moscow, Russia.

Anatoly Kozlov, Professor, Chair of Technical Operation of Radio/Electronic Systems in Air Transport, MSTU CA, Moscow, Russia.

Vladimir Tchipenko, Head of Chair of Aircraft Aerodynamics, Design and Strength, MSTU CA, Moscow, Russia.

Vladimir Kalugin, Dean, Department of Special Machine Design, Bauman University, Moscow, Russia.

Dmitry Lukin, Professor, Chair of Wave Processes, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia.

Vacily Shapkin, General Director, State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Bruno Lamiscarre, Deputy Dean, French Civil Aviation University (ENAC), France.

Franco Persiani, Director, Interdepartmental Centre of Industrial Research in Aeronautics, University of Bologna, Italy.

Damian Rivas, Professor, Department of Aerospace Engineering, University of Seville, Spain.

ББК 05  
Н 34  
Св. план 2013 г.

Научный Вестник МГТУ ГА  
№ 198

ISBN 978-5-86311-904-5

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.

Редакторы Т.М. Приорова, Е.В. Гаранина  
Компьютерная верстка Т.Н. Котиковой

---

Подписано в печать 10.12.13 г.

Печать офсетная  
17,75 усл. печ. л.

Формат 60x90/8  
Заказ № 1685/

13,55 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз.

---

*Московский государственный технический университет ГА*  
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20  
*Редакционно-издательский отдел*  
125493 Москва, ул. Пулковская, д. 6а

Подписной индекс в каталоге Роспечати 84254  
© Московский государственный  
технический университет ГА, 2013