

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УЛЬЯНОВСКОЕ ВЫСШЕЕ АВИАЦИОННОЕ УЧИЛИЩЕ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (ИНСТИТУТ)**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Ульяновск 2010

ББК О580.3я7

О-75

Основы теории управления воздушным движением : учеб. пособие / сост. В. А. Карнаухов. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2010. – 78 с.

Рассмотрены вопросы, связанные с анализом и формализацией большого объема информации различных источников, изучение которых вызывает у курсантов и студентов наибольшие затруднения. Подробно показан системный подход при исследовании научно-производственных задач в системе организации воздушного движения.

Рекомендовано курсантам и студентам заочной формы обучения специализации 160505.65.01 – Управление воздушным движением.

Печатается по решению Редсовета училища.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общая структура системы обслуживания воздушного движения	5
2. Основы организации и функционирования системы организации воздушного движения	18
3. Системный подход в исследовании процессов управления воздушным движением	27
4. Моделирование процессов в системе организации воздушного движения....	35
5. Характеристика задач оптимизации процессов управления воздушным движением	44
6. Автоматизация процесса оперативного управления воздушным движением.....	69
Библиографический список.....	78

ВВЕДЕНИЕ

Развитие системы организации воздушного движения (ОВД) и оптимизация процессов на всех этапах ее функционирования связано с решением проблем эффективного использования воздушного пространства. Совершенствование организации и функционирования системы ОВД требует поиска новых решений, отвечающих требованиям времени. Теория УВД ставит своей целью обоснование положений и определение совокупности методов исследования процессов УВД, направленных на получение эффективных рекомендаций, а содержащиеся в теории понятия, положения, идеи и подходы могут применяться для создания новых оптимальных условий функционирования системы в условиях многокритериальности и неопределенности, для обеспечения гарантированной безопасности полетов.

Теория УВД основывается на достижениях в области моделирования, большая часть применяемых методов используется для решения задач УВД.

Формирование методов исследования процессов УВД ведется по двум основным направлениям:

– моделирование процессов УВД в целом, когда путем принятия ряда допущений удастся использовать принцип агрегирования, т.е. объединения группы элементов или процессов, функциональная целесообразность которых одинакова или близка друг к другу, в один композиционный элемент или процесс, называемый в этом случае контуром, агрегатом, подсистемой.

– моделирование отдельных процессов, задач и операций и последующее комплексирование их, когда используется принцип декомпозиции, т.е. рациональное расчленение структурных либо функциональных единиц и связей между ними на ряд самостоятельных элементов структуры либо процессов. Это позволяет существенно упростить исследование и получить результаты их оценки.

При обоих указанных направлениях целесообразно оценить предельно допустимые показатели эффективности процессов и тем самым решить проблемы синтеза методов, совокупность которых с успехом позволяет исследовать процесс на любом из этапов функционирования системы ОВД.

Оценить предельно допустимые показатели целесообразно и в тех случаях, когда практика УВД уже позволила путем проб организовать рациональный процесс, найти удачное решение, структуру взаимодействий в какой-то зоне. Для того, чтобы такие решения использовались и для других зон УВД, целесообразно применить структуру обратной задачи теории оптимальных процессов.

К основным методам прикладной теории УВД относятся:

– методы моделирования и оптимизации динамических процессов, учитывающие стохастический и многоцелевой их характер, наличие логических функций и запаздываний в системах ОВД;

– методы исследования полиэргатических систем управления, используемые, когда характеристики человека – оператора (или коллектива) описываются не только в виде передаточной функции слежения и обработки сигнала, а и в более общем виде (например, структурно – алгоритмических процедур деятельности в рамках простейшего контура системы ОВД);

– методы моделирования и оптимизации процессов системы ОВД как системы организационного управления, к которым относятся структурный синтез систем, интерактивные методы генерации и оценки альтернатив и методы выработки, оценки и принятия решений по организации УВД, планированию и обеспечению потоков ВС, а также по непосредственному УВД.

Прикладная теория УВД представляется комплексом объединенных единым целевым назначением взаимосвязанных теорий, таких как общая теория управления, теория оптимальных процессов, прикладная теория полиэргатических систем управления и теория систем организационного управления.

1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

1.1. Система «человек – машина» (субъект–объект)

Понятие системы «человек – машина» используется как в эргономике, так и в психологии труда. Эта система почти всегда является основой анализа всякой системы, в которой помимо человека выступает какое-либо орудие труда, машина или механическое устройство.

В системе «человек – машина» можно выделить три основные функции:

- 1) функцию входа, обеспечивающую ввод информации в органы чувств человека;
- 2) функцию управления, осуществляемую центральной нервной системой человека;
- 3) функцию выхода, которая обычно, хотя и не всегда, реализуется посредством сенсомоторных органов и мышечной системы человека.

Если между входом и выходом отсутствует непосредственная связь, такая система действует как незамкнутый контур. В том случае, если выход может оказывать какое-то воздействие на вход, система действует как замкнутый контур, в котором человек играет роль управляющего элемента»).

Типичным примером замкнутой системы (или цепи), т. е. системы с обратной связью, является командир ВС, который, например, должен поддерживать заданную скорость (или курс ВС). «Выходом» командира ВС будет его рука, находящаяся на секторе газа, который является «входом» двигателя; в свою очередь «выходом» ВС является указатель скорости, а «входом» командира ВС – его зрение. В этой замкнутой цепи исполнительный механизм (двигатель ВС) связан с предыдущим элементом (действиями командира ВС). Примером разомкнутой системы, связывающей человека и машину, является включение двигателя.

В понятие системы «человек – машина» во многих работах по эргономике включаются взаимные связи работающего человека с окружающей его материальной средой – орудиями труда, машинами, различного рода устройствами,

рабочим местом, а также с такими характеристиками окружающей среды, как освещение, шум, условия микроклимата и др. Многие законы, относящиеся к системе «человек – машина» в строгом значении этого термина, можно перенести также и на взаимосвязи человека с инструментами, несмотря на то, что в отличие от машин инструменты (или «орудия») сами по себе не исполняют никаких действий, а приводятся в действие человеком.

Понятие «человек» в равной степени охватывает как специалиста, выполняющего работу с помощью «орудий», так и авиадиспетчера или пилота, а также оператора, наблюдающего за протеканием автоматизированного процесса по показаниям контрольно-измерительных приборов и индикаторов без какого-либо непрерывного воздействия на протекание процесса, предусмотренного программой.

Во всех процессах, протекающих в системе «Человек – машина» можно выделить три этапа:

1. *Восприятие* информации (перцепция) либо путем непосредственного процесса, либо по наблюдению за показаниями контрольно-измерительных приборов, отражающих параметры протекания процесса. Перцепция осуществляется с помощью органов чувств: зрения, слуха или осязания. Полученная от органов чувств информация передается в центральную нервную систему человека.

Эта фаза процесса (восприятие и передача в центральную нервную систему) относится к сфере действия законов физиологии и психологии. С точки зрения кибернетики информация проходит путь от выхода (машины) до входа (перцептора). Успех кибернетического и эргономического анализа процесса перцепции и передачи сигналов во многом определяется достижениями в области теории информации.

2. *Переработка* (трансформация) полученной информации осуществляется в центральной нервной системе и приводит к принятию определенного решения (решение может состоять и в том, чтобы в данной ситуации ничего не предпринимать). Механизм выработки решения до сих пор еще мало изучен. На характер решения, его правильность и быстроту принятия влияют не только информация, поступающая извне (от машины и из внешнего окружения), но и внутренняя информация. Внутренняя информация поступает из

памяти, в которой содержатся полученные ранее информация и инструкции. Помимо заложенной в памяти человека информации большую роль играет также опыт и интуиция, которая весьма существенно влияет на принятие решения.

Учету подлежат также стрессовые ситуации, или состояния нервного напряжения, которые выражают реакции организма на травмы, шоки, инфекции, а также психологические затруднения, такие, как страх, состояние сильного возбуждения и т. п. Стрессы являются одним из факторов, существенно влияющих на принятие решения.

Центральная нервная система является системой со многими внешними «входами» по восприятию информационных потоков и многими внутренними «входами» – информация, содержащаяся в памяти.

3. Последним этапом процесса является выдача принятого решения исполнительным органам и *выполнение этого решения*. Этот последний этап называется управлением и в системе «человек – машина» осуществляется путем воздействия на органы управления машины с целью внесения требуемых изменений в протекающий в системе процесс. «Выходом» в этом случае являются исполнительные органы, «входом» – органы управления машиной.

Итак, перцепция, принятие решения и его выполнение образуют замкнутую систему трудового процесса. Сутью взаимосвязей двух основных элементов этой системы – человека и машины – являются процессы передачи информации и управления. Существуют также обратные связи между машиной и человеком, причем эти обратные связи могут быть двоякого рода: либо по схеме: устройство сигнализации – рецептор – центральная нервная система – исполнительные органы – органы управления, либо в «укороченном» виде: рецептор – органы управления.

Обратная связь в системе «человек – машина» всегда существует там, где человек является обязательным элементом системы управления, т. е. где количественные или качественные изменения системы выполняются в результате принимаемого человеком решения. Примером служит полиэргатическая система ОВД.

При УВД с высокой интенсивностью ВС необходимо, чтобы диспетчер ни на секунду не отрывал взгляда от индикатора радиолокатора и в связи

с загруженностью органов зрения необходимо, чтобы возможно большее количество информации поступало к нему другими путями.

В тех случаях, когда обратная связь осуществляется без посредничества человека (встроена в саму машину), такая машина представляет собой автомат. Отличительной особенностью автомата является наличие в его конструкции системы обратных связей, на которые оператору не требуется воздействовать, примером может служить АС УВД.

Из всего сказанного можно сделать следующий вывод: анализируя какой-либо технологический процесс (как в стадии разработки конструкции, так и в стадии производства или при внесении изменений в существующую конструкцию), нельзя рассматривать его только с технической стороны, с точки зрения чисто конструктивных решений. Правильное решение проблемы состоит в оптимальном сочетании человека и машины, т. е. в решении системы «человек – машина» как единого, интегрального целого. Организм человека, его мозг, его нервная и мышечная системы представляют собой чудесный по слаженности «механизм». Но этот механизм имеет ограниченные физиологические и психические возможности и дело заключается еще и в том, чтобы правильно включить в автоматизированную систему управления *человека*. А это нельзя сделать, не считаясь со свойственными человеку характеристиками, качеством его личности (типом темперамента, локусом контроля, автономией, и т.д.) и теми возможными для его деятельности техническими параметрами, которые определяются физической и психической природой человека и, следовательно, при введении человека в систему уже *не могут быть существенным образом изменены*.

Несоответствие машин и различного рода устройств с одной стороны, и человека с другой является выражением помех в так называемой интеракции, т. е. во взаимодействии этих двух элементов системы. Эти помехи чаще всего возникают на стыке сфер действия человека и машины, т. е. при считывании показаний сигнализирующих устройств или оперировании органами управления могут также возникнуть ошибки при восприятии информации от органов управления с помощью осязания, о чем говорилось выше и что является другой формой помех в интеракции.

До сих пор речь шла о двух составляющих анализируемой системы: человеке и машине. Помехи в их взаимодействии являются источником нарушений

в восприятии информации или осуществлении управления. Однако на практике в этом случае возникает еще одна причина, не менее важная, чем две предыдущие. Речь идет о факторах материальной среды, в которых действует система, а также об организационно-технических условиях на рабочем месте. Эти факторы могут явиться дополнительным источником помех.

Существуют четыре группы решающих факторов:

- 1) средства отображения информации;
- 2) органы управления;
- 3) факторы окружающей среды;
- 4) условия труда на рабочем месте.

Задача конструктора, проектировщика и технолога (каждого в своей области) состоит в оптимизации этих условий таким образом, чтобы обеспечить максимальную производительность всей системы при возможно меньшем физическом и психическом напряжении входящих в эту систему специалистов.

При конструктивной разработке какого-либо узла машины, обслуживаемого человеком, следует прежде всего выяснить, какая информация ему будет необходима, а затем – в какой форме эту информацию необходимо представить.

Определение количества информации, необходимой обслуживающему персоналу, зависит от того, какие решения он будет принимать. После уточнения количества необходимой информации выбирается форма, в которой эта информация будет представлена (различные способы визуальной или акустической индикации). Выяснение границ возможностей восприятия и передачи информации от рецепторов к центральной нервной системе было темой многолетних исследований в экспериментальной психологии, и в результате удалось разработать ряд конкретных рекомендаций.

Эти рекомендации определяют главным образом форму и величину индикаторов, а также их элементов, размещение аппаратуры (расстояние от оператора, высота, угол наклона по отношению к стоящему оператору, взаимное расположение), компоновку конкретных приборов, логическое их объединение в группы в соответствии с расположением соответствующих органов управления, условия освещения и т. п. Удалось также определить допустимое количество и скорость передачи информации. В отношении акустических

сигналов также удалось установить необходимую громкость по отношению к «маскирующему шуму» (шумовому фону), изучить возможность совмещения звуковых и оптических сигналов, стимулирующее воздействие звуковых сигналов, возможное вредное воздействие шума и т. д.).

Особенно важное значение придается восприятию и передаче информации в процессах, связанных с однообразной работой, состоящей только в наблюдении за сигналами. Типичным примером такой работы является наблюдение за экраном индикатора радиолокатора неавтоматизированной системы ОВД, на котором зачастую в течение нескольких часов вообще не появляются сигналы, а если они и появляются, то оказываются чрезвычайно слабыми и часто трудно отличимыми от фона. Такие процессы могут привести к снижению внимания, монотонии, когда сосредоточенность внимания снижается уже после получасового наблюдения.

Во многих процессах большое значение имеют условия, обеспечивающие правильное восприятие информации, поступающей через органы чувств. Это особенно важно там, где информационные каналы оказываются перегруженными информационными потоками.

При технологических операциях, требующих большого внимания и умственного напряжения, наиболее узким местом являются не органы зрения или слуха, а центральная нервная система. Клетки головного мозга, получающие информацию извне (через органы зрения, слуха или осязания), не в состоянии воспринять и пропустить несколько сообщений одновременно («одноканальность» клеток головного мозга). В случае одновременного поступления нескольких сигналов они как бы выстраиваются в очередь в ожидании освобождения нервных путей.

Время передачи одного сообщения по информационному каналу к головному мозгу составляет около 0,5 с, т. е. такой канал может пропустить в течение 1 с две единицы информации. Если два различных информационных импульса встречаются у входа в канал почти одновременно, то один из них пройдет, а другой будет передан с задержкой или совсем не будет передан. Учитывая это, конструкторы различных агрегатов должны исходить из общего правила, что ни при каких условиях нельзя проектировать машины или какие-либо другие устройства, которые требовали бы от оператора одновременного принятия двух решений независимо от того, будет ли информация

подаваться через один или несколько органов чувств. Тот факт, что пианист-профессионал может выполнять пальцами более двух ударов в секунду, объясняется тем, что каждое его решение включает в себя целую группу ударов, а не один изолированный удар, как это бывает у начинающего пианиста.

Описанным явлением запаздывания передачи информации, поступающей одновременно, объясняется то обстоятельство, что водитель автомашины, стараясь объехать собаку, выбежавшую на дорогу, не может одновременно точно распознать даже очень четкого дорожного знака. Даже если этот сигнал достиг сетчатки его глаза, он не будет передан к клеткам головного мозга. Таким образом, человек может видеть что-то, но не будет понимать увиденного.

Описанный механизм объясняет также, почему включение человека в состав некоторой системы неизбежно вносит в эту систему элемент запаздывания. Если человек должен получать информацию одновременно из нескольких источников, количество перерабатываемой им информации уменьшается пропорционально сложности системы источников информации. Вследствие этого оказывается, что чем больше операций должен выполнить человек, тем меньше данных он будет иметь в своем распоряжении от каждого источника информации, что приведет к неточностям в выполняемой им работе. Поэтому решение о том, использовать ли в данной системе человека или машину, может в подобных ситуациях зависеть от требуемого уровня точности данных. Кроме того, следует учитывать, что реакция человека оказывается непостоянной в течение дня и в течение различных дней недели. Это та цена, которой приходится расплачиваться за большую приспособляемость человеческого организма. Непостоянство – одна из основных причин того, что человек, входящий в качестве составного элемента в замкнутую систему, вносит в эту систему «шум».

Описываемые факторы становятся решающими, когда основным является вопрос о времени реакции, которое увеличивается в тех случаях, когда человеку предстоит сделать выбор между несколькими возможными решениями. Задача упрощается, если возможные решения унифицированы и выбор делается только между уже известными и опробованными решениями.

Полное время реакции складывается из двух составляющих: времени восприятия и времени принятия решения. Кроме того, следует учитывать также

время выполнения принятого решения. Человек реагирует на воспринятые им раздражители не непрерывно, а дискретно. Как уже отмечалось, ответные импульсы от человека следуют со скоростью примерно 2 импульса в секунду, причем время от момента подачи возбуждающего импульса до момента исполнения принятого решения делится примерно поровну между временем реакции и временем выполнения принятого решения.

Простая реакция на световой раздражитель длится от 0,15 до 0,30 с (реакция на звуковой или осязательный раздражитель несколько быстрее). Если работник должен сделать выбор между сигналами перед тем, как принять решение, время это будет достаточно большим. Кроме того, следует учитывать время, необходимое для перенесения руки или перестановки ноги с одного органа управления на другой, на что обычно требуется 0,5 с при расстоянии 25 см; соотношение между расстоянием и временем выполнения движения, как правило, определяется логарифмической зависимостью.

1.2. Определение системы организации воздушного движения

Системы ОВД относятся к эргатическим системам управления динамическими объектами. Понятия «система», «управление», «динамические объекты», «эргатическая система» – фундаментальные понятия теории УВД. Каждая реально существующая система состоит из конкретных объектов: технических устройств, людей, управляющих ими, материальных ресурсов и т.д. «Система» есть совокупность конкретных объектов, рассматриваемых как единое целое, объединенных между собой и окружающим миром определенными связями, представляющими силы, потоки энергии, вещества, информации. Критерием для выделения совокупности объектов в систему обычно можно считать степень связности объектов внутри системы и с внешним миром. Чем больше объединены объекты внутри системы и чем больше обособлена данная совокупность от внешнего мира, тем больше оснований рассматривать ее как систему. При УВД объединяющим признаком объектов внутри системы могут служить информационные потоки. Потоки информации внутри системы ОВД, состоящие из различных сообщений по каналам связи между диспетчерами и экипажами воздушных судов, между различными

диспетчерскими пунктами несоизмеримо больше, чем поток информации, характеризующий связь системы ОВД с «внешним» миром или органами аэронавигационного обслуживания. Характерной чертой любых систем является выделение в них трех составляющих – энергии, материи (вещества) и информации, последняя из которых является организующей. Как правило, системы сохраняют свою организованность во времени при функционировании и развитии, что объясняется непрерывным «потреблением» системой потока информации извне и о внутренних процессах.

Составляющими организующего потока информации для систем ОВД являются приказы, инструкции и другие документы и сообщения. При структурном анализе реальную систему допустимо рассматривать как абстрактное множество элементов, наделенных определенными свойствами и находящихся друг с другом в некоторых отношениях, определяемых характером существующих внутрисистемных и внешних связей. Такое представление позволяет ввести понятие абстрактной системы с помощью модели в виде совокупности взаимосвязанных и воздействующих друг на друга элементов, физическая природа которых в зависимости от разделения их на механические, электрические, химические, биологические и т. п. учитывается различными моделями, вид которых определяется существом задач исследования. Рассмотрим пример простейшего контура подсистемы УВД (рис. 1).

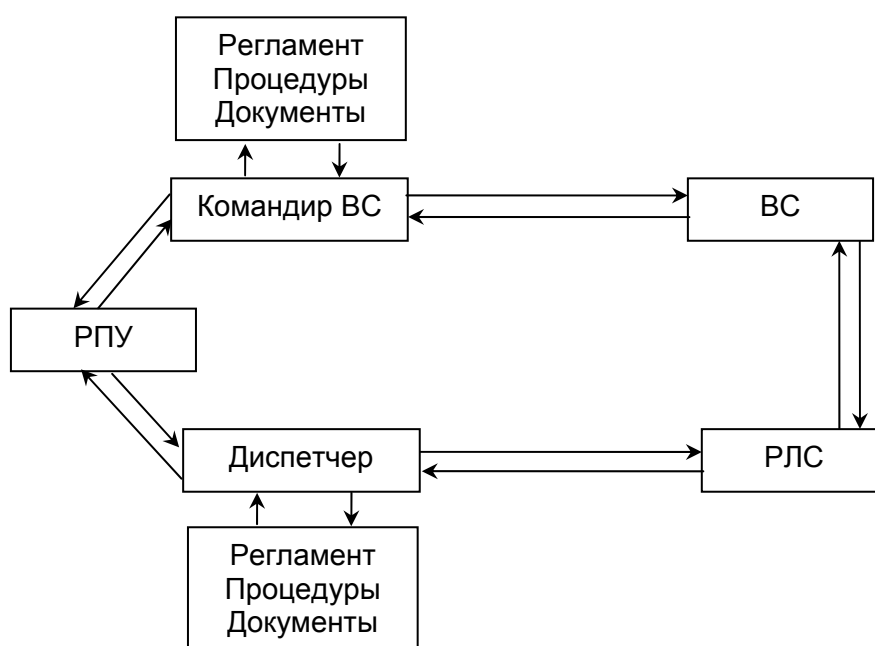


Рис. 1. Простейший контур УВД

Рассмотрение любой системы, как совокупности элементов дает возможность привлечь для ее математического описания теорию моделирования, поэтому одним из важнейших разделов теории УВД является теория математического моделирования.

Среди систем можно различать множество связанных и функционирующих совокупностей элементов. Интерес представляют эргатические системы управления. В широком смысле слова под эргатической системой управления понимают систему с организационно-управленческой деятельностью элементов, включающих человека-оператора и (или) коллективы людей, которые руководят работой других элементов, также включающих человека-оператора и (или) коллективы людей, направленные на достижение определенных целей. Наличие человека, характеризующееся его творческими особенностями, определяется термином «эргатическая система». Человек, осуществляющий управление, планирует и принимает решение, оценивая планы и окружающую обстановку с помощью получаемой информации. В примере простейшего контура подсистемы УВД диспетчер принимает решения и осуществляет управление. Информацию об окружающей обстановке он получает с помощью радиолокационного устройства и радиообмена с командиром ВС. Иногда информации об окружающей обстановке оказывается недостаточно для однозначной ее оценки и принятия решения, тогда оператор использует свой опыт, знания, память и интуицию. Эти качества наделяют человека в системе управления замечательным свойством – принимать решения в условиях значительной неопределенности в окружающей обстановке и при неполностью заданных целях, что и обусловило необходимость участия человека в системах ОВД. По этой причине наиболее перспективными являются автоматизированные системы ОВД, а не автоматические, полностью исключающие участие человека в процессах УВД.

Одна из наиболее характерных черт систем управления – способность изменять свое состояние под влиянием различных управляющих воздействий. Любую управляемую систему можно представить совокупностью двух различных частей: управляемой (объекты управления), и управляющей, в роли которой может быть специальное устройство либо оператор.

Всякий объект, движением которого управляют, считается управляемым. В системе УВД таковыми являются ВС в воздушном пространстве или на

маневренной площади аэродрома. Управляемое движение отличается от неуправляемого своей целенаправленностью. Управление состоит в «навязывании» объекту такого движения, которое отвечает определенной цели. Для управляемых объектов существует множество состояний (движений), из которых производится выбор одного предпочтительного. Решение задачи выбора неразрывно связано с управлением. Предпочтительность того или иного состояния (движения) определяется количественными характеристиками системы управления (показателями), которые должны отражать (описывать) состояние системы управления и ее отдельных элементов в процессе их движения и развития. Изменение состояния системы управления происходит во времени в результате переходного процесса. Систему управления, переход которой из одного состояния в другое совершается в период времени, соизмеримый с временем наблюдения, считают динамической. Если время наблюдения не ограничено, то любая реальная система является динамической. Для упрощения описания системы управления в теории чаще всего принято условно выделять три группы систем:

- динамические;
- статические, для которых длительность переходного процесса достаточно большая и значительно превосходит время наблюдения, а характер перехода не оказывает существенного влияния на поведение системы;
- системы конечных автоматов, когда длительность переходного процесса исчезающе мала по сравнению с временем наблюдения и изменение состояния системы можно приближенно считать следующим мгновенно за вызывающими его причинами.

Характерная задача оператора-диспетчера в простейшем контуре – воздействие на другие элементы системы с тем, чтобы объект управления изменил свое состояние и достиг цели. Диспетчер обязан учитывать время переходного процесса, которое соизмеримо с временем наблюдения. Для этого между управляющим и управляемым объектами должен происходить взаимный обмен информацией. Такой информацией являются сигналы, с помощью которых оператор воздействует на объект управления, и сведения о состоянии объекта управления, на основании которых оператор определяет вид управляющих сигналов.

Для успешного управления объектом оператор должен получать информацию о внешних условиях (рис. 2), воздействующих на объект управления, учитывать ее при выработке управляющих сигналов и располагать информацией о цели управления. Оператору необходимо иметь возможность сравнивать действительное состояние (движение) с тем, которое выбрано и задается в качестве цели либо желаемого или предпочтительного состояния (движения). Если обнаружено отклонение, оператор изменяет состояние (движение) объекта так, чтобы устранить его.

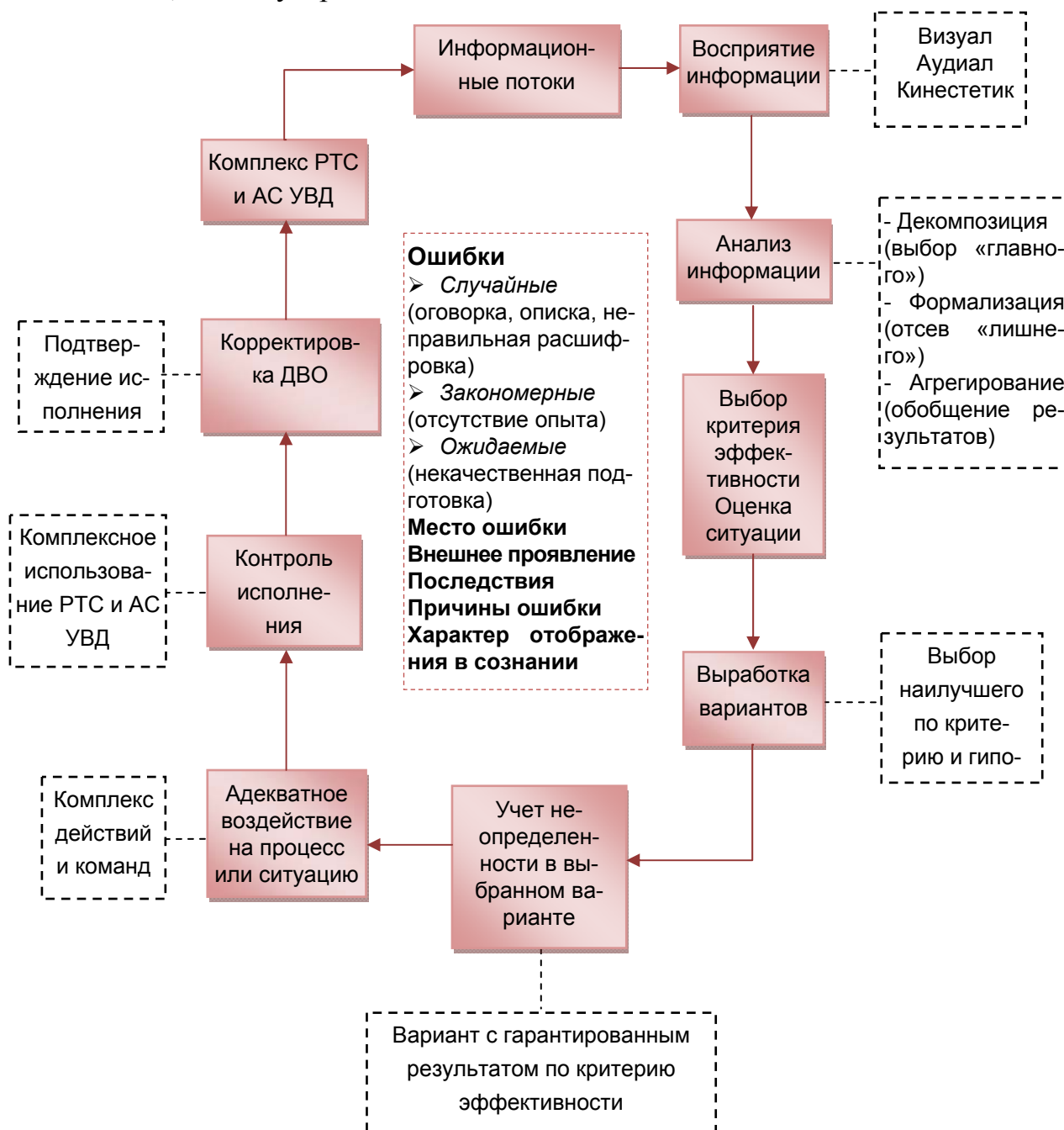


Рис. 2. Схема непрерывного процесса принятия оперативного решения при УВД

Для этого в системе управления необходимо:

- проводить выбор желаемого состояния (движения);
- осуществлять измерения, дающие информацию о действительном состоянии (движении) объекта управления;
- сравнить эти два состояния и получить (выработать) информацию об отклонениях;
- на основании информации об отклонениях и окружающей обстановке произвести выбор определенного предпочтительного образа изменения состояния (движения) для устранения отклонений;
- преобразовать информацию о предпочтительном образе изменения состояния в непосредственные изменения состояния (движения) объекта управления;
- осуществить контроль за выполнением предпочтительного образа изменения состояния.

Одной из проблем процесса УВД, с целью адекватного воздействия на ДВО, является возможность принятия не любого пригодного решения, а наилучшего в данной конкретной ситуации. Для построения и использования алгоритмов необходим всесторонний анализ процессов, включающий их моделирование в системе ОВД на каждом этапе ее функционирования, а также построение оценок эффективности, что дает возможность корректной формулировки задач оптимизации процессов. Для осуществления такого подхода необходимо четко представлять общие задачи, присущие системе ОВД на каждом этапе ее функционирования.

1.3. Цель и основные задачи системы организации воздушного движения

Основной целью системы ОВД является эффективное использование воздушного пространства (достижение высокой пропускной способности в условиях безопасности, регулярности и экономичности полетов).

Основные задачи системы ОВД:

- организация структуры воздушного пространства;
- рациональное размещение РТС УВД;

- рациональное планирование(предварительное и текущее) и обеспечение движения ВС;
- непосредственное УВД на всех этапах;
- обеспечение безопасных интервалов между ВС;
- принятие своевременных мер по оказанию помощи экипажам ВС, терпящим бедствие, а также при особых случаях в полете;
- доведение до всех органов аэронавигационного обслуживания и экипажей ВС режима полета и осуществление контроля за его соблюдением;
- контроль уровня организации, планирования и непосредственного УВД в целях совершенствования структуры и функционирования всех подсистем системы ОВД.

Научные дисциплины, формирующие методы решения перечисленных задач, и составляют управление воздушным движением как прикладную научную теорию, в которую входят:

- исследования операций, позволяющих формировать показатели эффективности при оценке процессов и решений в системе УВД;
- решение задач оптимизации и осуществление выбора стратегий в конфликтных ситуациях;
- моделирование и идентификация, необходимые при формализации процессов в системе УВД.

2. ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

Управление воздушным движением заключается в анализе и контроле состояния динамической воздушной обстановки и осуществлении непосредственного управления процессом выполнения полетов для установления и поддержания регламентированного порядка движения ВС на аэродроме и в воздушном пространстве с обеспечением требований безопасности, регулярности и экономичности полетов.

Динамической воздушной обстановкой (ДВО) называют действительное состояние объекта управления или ту картину, которая создается у главного

действующего лица – диспетчера дежурной смены службы движения, осуществляющего непосредственное УВД.

ДВО характеризуется наличием движущихся ВС, схем полета, метеорологическими, навигационными и некоторыми радиотехническими параметрами. Анализ и контроль состояния ДВО в целях управления возможен лишь при наличии определенных технических средств и регламентирующих правил полета, а также планов движения ВС, организации их движения и управления ими.

Эти сложные функции может выполнять лишь высокоорганизованная система, включающая такие взаимодействующие подсистемы, как наземные радиотехнические средства УВД (радионавигационные станции, радиопеленгаторы, радиопереговорные устройства), авиационно-технические средства (ВС, их оборудование и бортовые ответчики), подсистемы связи, наземные и бортовые системы навигации и посадки и, наконец, экипажи ВС, дежурные смены службы движения и др.

Функционирование системы регламентируется совокупностью правил, определяющих порядок проведения полетов и порядок взаимодействия между подсистемами. Все, подсистемы, входящие в систему ОВД, должны соответствовать своему определенному назначению в целях обеспечения выполнения общего назначения системы УВД по решаемым задачам.

2.1. Периодичность функционирования системы организации воздушного движения

Совокупность задач, стоящих перед системой УВД, обуславливает ее сложную структуру, оснащение ее подсистем современными техническими средствами, а также наличие в рамках службы движения высококвалифицированных специалистов. Система должна иметь возможность самонастройки путем изменения структуры, т. е. изменения числа связей и порядка взаимодействия подсистем, повышения качества ее элементов.

Изменение структуры – это, прежде всего, деление воздушного пространства, введение новых диспетчерских пунктов, изменение взаимодействия между управляющими органами, планирующими движение, в целях создания условий, повышающих эффективность системы ОВД. Повышение качества

подсистем связано также с совершенствованием работы диспетчерских смен и повышением профессионального уровня диспетчеров, с применением новых технических средств УВД.

Совершенствование подобной непрерывно действующей системы происходит постоянно.

Совершенствование системы определяется потребностью УВД и зависит от многих факторов, в частности, от темпов изменения уровня ее технического оснащения.

Период функционирования системы ОВД условно можно разделить на ряд циклически повторяющихся этапов (временных отрезков). Например, отрезок времени, определяющий продолжительность этапа непосредственного (оперативного) УВД, может быть определен в связи со временем полета данного ВС в границах заданной зоны ответственности диспетчера или любым другим способом, связанным с функциями непосредственного УВД.

Продолжительность этапа организации связана с созданием структуры ВП, размещением РТС, организацией работы органов аэронавигационного обслуживания.

Продолжительность этапа планирования и обеспечения воздушного движения определяется в зависимости от вида плана и функции планирования и обеспечения движения ВС. При этом часть операций планирования, таких, как текущее, выполняется при непосредственном УВД. Отсюда и следует условность деления периода функционирования системы ОВД на этапы организации, планирования и непосредственного УВД (тактического и оперативного).

Более продолжительным является этап организации УВД, основной смысл которого составляют подготовительные процессы, их выполнение происходит в условиях функционирования системы ОВД. Найденные же новые условия функционирования ОВД проверяются обычно длительное время, которое и определяет продолжительность этапа организации УВД. Внедрение новых параметров происходит «скачком» – без прекращения функционирования системы.

Таким образом, следует различать этапы функционирования системы ОВД, состоящие из совокупности процессов, выполнение которых связано с решением множества отдельных задач, делящихся на ряд операций.

Рассмотрим более подробно совокупность процессов, наиболее характерных для каждого из перечисленных этапов.

Этап организации УВД включает в себя целый ряд процессов, перечень которых и порядок их выполнения зависит в каждом конкретном случае от фактического состояния организации УВД в данной зоне.

При вновь организуемом УВД весь этап организации должен быть проведен в полном объеме. Полученные организационные решения утверждаются вышестоящими органами.

1. Начинать целесообразно с процесса исследования существующей и прогнозируемой на ближайшие плановые периоды в 5, 10, 15 лет интенсивности воздушного движения по транспортной авиации и потребностей в авиационных работах в данной зоне. Получив данные по интенсивности, следует определить число ВПП и выбрать для них место.

2. Следующие – два взаимосвязанных процесса организации УВД. Это решение проблемы рационального деления воздушного пространства и определение обоснованного перечня радиотехнических средств УВД с выбором рациональных точек их размещения. Таким образом создается система контроля движения ВС (рис. 3). Далее следует провести расчеты, связанные с установлением трасс полетов в районах рассматриваемой зоны, с разработкой схемы коридоров и правил полетов в район аэродрома (РА) данной зоны, составить инструкции, регламентирующие порядок проведения полетов и УВД в РА (рис. 4).



Рис. 3. Схема организации воздушного движения

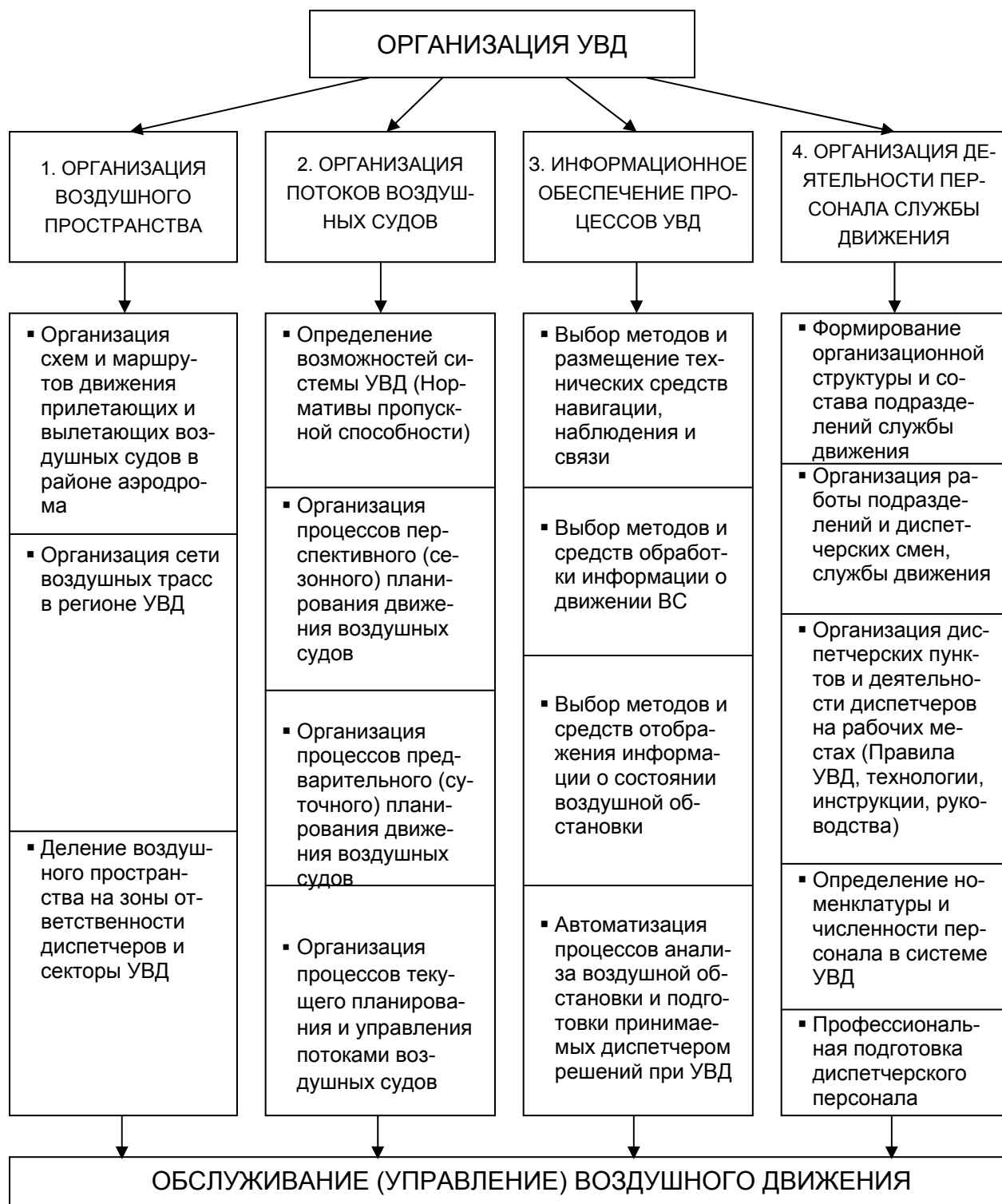


Рис. 4. Задачи организации управления воздушным движением

3. Определяется число диспетчерских пунктов, штатное расписание и организуется работа службы движения в данной зоне УВД. На этом же этапе организуется подготовка и переподготовка диспетчерского состава службы движения. Создается система связи и взаимодействия диспетчерских пунктов, смен службы движения с экипажами ВС и другими объектами (рис. 5).

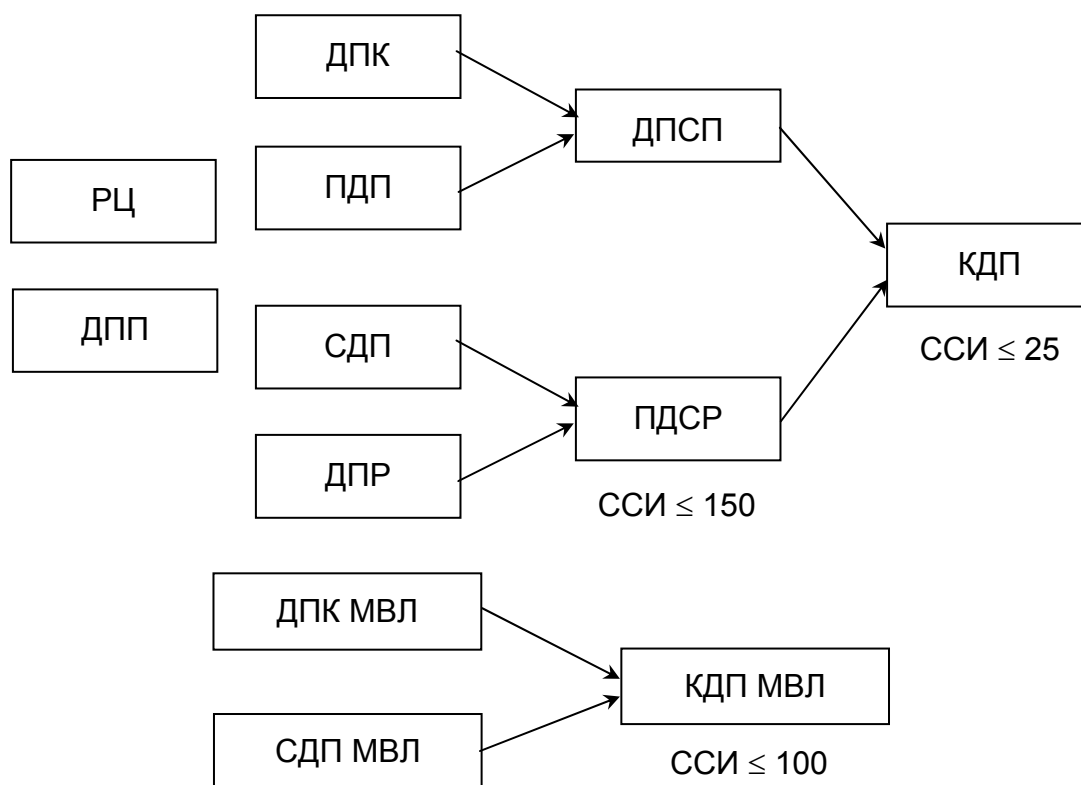


Рис. 5. Примеры диспетчерских пунктов службы движения:

РЦ – районный центр; ДПП – диспетчерский пункт подхода; ДПК – диспетчерский пункт круга; ПДП – пункт диспетчера посадки; ДПСР – диспетчерский пункт системы посадки; КДП – командный диспетчерский пункт; СДП – стартовый диспетчерский пункт; ДПР – диспетчерский пункт руления; ПДСР – пункт диспетчера старта и руления; ССИ – среднесуточная интенсивность полетов (взлетов и посадок) в месяц «пик»; МВЛ – местные воздушные линии

4. Следующим является процесс создания системы планирования и обеспечения движения ВС: составляются документы, регламентирующие деятельность службы движения. Для данного этапа организации УВД появляется возможность записи общего алгоритма, характеризующего последовательность и взаимосвязь проведения исследования процессов. Основными пунктами такого алгоритма и служат названные процессы, выполняемые на этапе организации УВД.

Более типичен случай, когда необходимо принимать решение по проведению организационных мероприятий в условиях уже существующей организации УВД и функционирующей системы УВД.

По аналогии с только что описанным общим алгоритмом в этом случае можно наметить порядок исследования процессов, выполнение которых в той или иной мере неизбежно при организации УВД в данной зоне.

При этом необходимо выполнить следующие мероприятия:

- провести анализ интенсивности воздушного движения и прогноз интенсивности на ближайшие плановые периоды;
- провести анализ состояния безопасности полетов и оценка факторов, связанных с организацией УВД;
- провести анализ показателей качества организационных решений и принятие решения по необходимости проведения реорганизации.

Если необходимость реорганизации необоснована, то процессы, приведенные выше, выполняются в установленные календарные сроки.

Если реорганизация обоснована и принято соответствующее решение, то возникает необходимость постановки конкретных организационно-структурных задач. При этом понятно, что такие задачи должны носить характер поиска оптимальных организационно-структурных решений. Чаще всего это задачи деления воздушного пространства, либо задачи изменения структуры трасс и схем полетов, либо задачи совершенствования документации и организации мероприятий по повышению качества работы диспетчерских смен.

После процедур исследования на основе анализа ряда процессов принимается решение о проведении реорганизации, выполняется поиск рациональных организационно-структурных решений, устанавливаются тенденции и направления совершенствования организации УВД. Именно этот процесс установления тенденций позволяет осуществлять прогноз будущих мероприятий, повышающих качество организации УВД в целом.

2.2. Основной показатель функционирования системы организации воздушным движением, критерий эффективности использования воздушного пространства

Оценка эффективности процессов в системах ОВД может быть проведена с помощью количественной меры – показателя эффективности. При большом разнообразии процессов в системах УВД трудно установить единую меру эффективности для системы в целом, поэтому для всех процессов, существенно различных по своей физической природе, используют различные показатели и связанные с ними меры эффективности. Такими показателями могут являться количественные характеристики (табл. 1). При сравнении систем

и отдельных процессов следует иметь единый подход к оценке их эффективности. Простой способ формирования показателей есть сопоставление их с требованиями, например, той части технического задания, непосредственно относящейся к данному (оцениваемому, оптимизируемому) процессу. В большинстве случаев удается выписать ряд конкретных требований, выполнение которых определяет качество процесса.

Таблица 1

**Количественные характеристики в системе
управления воздушным движением**

Количественные характеристики внешней среды	Количественные характеристики потоков воздушных судов	Внутрисистемные количественные характеристики	Показатели эффективности системы УВД
<ul style="list-style-type: none"> • Температура (t°) • Давление (P_0) • Ветер ($U, \delta, U_{бок}$) • Состояние ВПП ($K_{сц}$) • $L_{вид}$ • $L_{вид\ ВПП}$ • $H_{нго}$ • Характеристики опасных метеоявлений • Характеристики орнитологической обстановки 	<ul style="list-style-type: none"> • Интервал движения (τ, l) • Интенсивность (λ) • Скорость (W) • Плотность (η) 	<ul style="list-style-type: none"> • Загруженность (\bar{N}) • Время движения (\bar{T}) • Занятость ВПП ($T_{впп}$) • Формируемый интервал посадки (x) • Время задержки ($\Delta t_{зад}, y$) • Частота (вероятность) ухода на второй круг (P_0) • Загруженность диспетчера ($K_{зан}$) • Частота конфликтов (E) 	<ul style="list-style-type: none"> • Пропускная способность (μ) • Регулярность полетов (ρ) • Показатели экономичности полетов (Q) • Показатели безопасности полетов (P)

Безопасность полетов является комплексным показателем, включающим совокупность составляющих, каждая из которых определяет одну из ее сторон.

Система ОВД как составная часть авиационной транспортной системы непосредственно влияет на безопасность воздушного движения по воздушным трассам (МВЛ), в районах аэродромов (аэроузлов) и в районах авиационных работ.

Основными причинами авиационных происшествий и предпосылок к ним по вине системы ОВД являются:

- неудовлетворительная организация управления воздушным движением;

- неудовлетворительная организация воздушных трасс и местных воздушных линий;
- неудовлетворительное разграничение зон и районов УВД, воздушного пространства в районе аэродрома (аэроузла);
- низкий профессиональный уровень специалистов УВД;
- низкий уровень дисциплины специалистов УВД;
- неудовлетворительная деятельность персонала службы УВД.

Уровень безопасности полетов является одной из основных характеристик авиационно-транспортной системы. Для оценки безопасности полетов используются количественные и качественные показатели. К общим количественным показателям безопасности полетов относятся:

- средний налет на одно авиационное происшествие;
- среднее количество полетов, приходящееся на одно авиационное происшествие.

В качестве показателей безопасности полетов при регулярных сообщениях всеми странами-членами ИКАО используются следующие коэффициенты:

- количество катастроф на 100 млн км налета:

$$K_1 = \frac{n_{\text{кат}}}{L_1} \cdot 10^8,$$

где n – количество катастроф за анализируемый период; L_1 – налет в километрах за тот же период;

- количество катастроф на 100 тыс. ч налета:

$$K_2 = \frac{n_{\text{кат}}}{L_2} \cdot 10^5,$$

где L_2 – налет в часах за анализируемый период;

- количество катастроф на 100 тыс. полетов:

$$K_3 = \frac{n_{\text{кат}}}{N} \cdot 10^5,$$

где N – количество полетов за анализируемый период;

- количество погибших пассажиров на 1 млн перевезенных:

$$K_4 = \frac{i}{L_4} \cdot 10^6,$$

где i – количество погибших пассажиров за анализируемый период; L_4 – количество перевезенных пассажиров за тот же период;

– количество погибших пассажиров на 100 млн пассажиро-километров перевозок:

$$K_5 = \frac{i}{L_5} \cdot 10^8,$$

где L_5 – объем перевозок в пассажиро-километрах за анализируемый период.

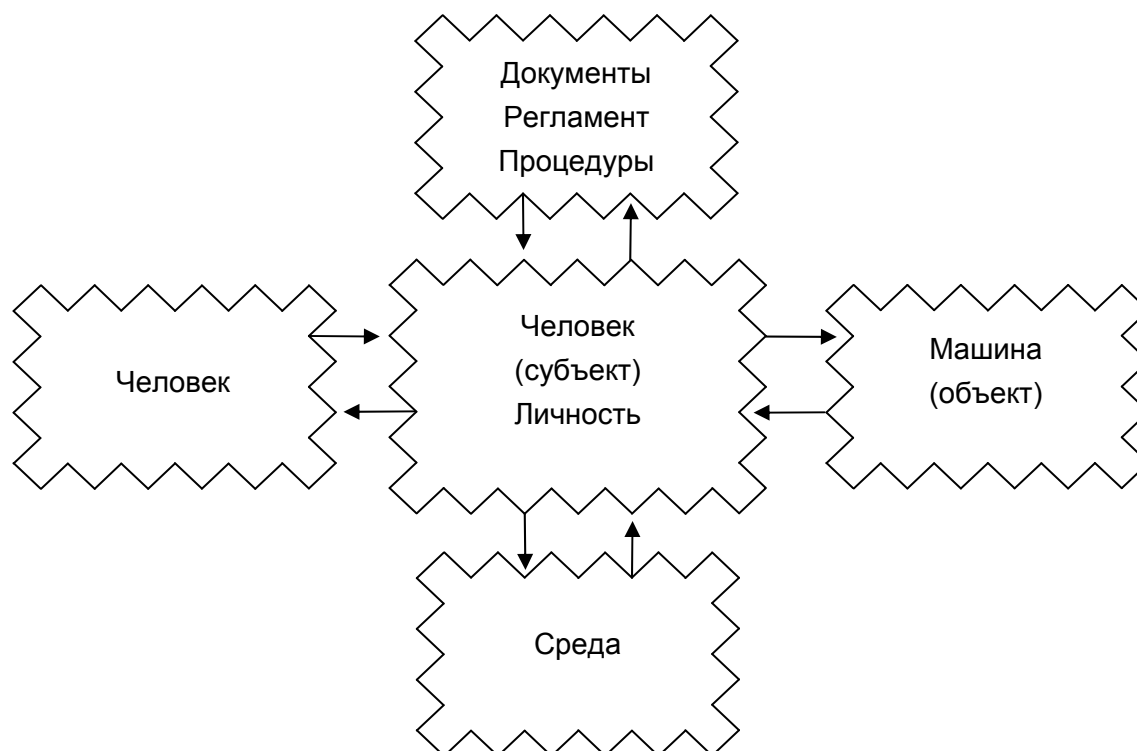
3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Системный подход к исследованию различных объектов и явлений характеризуется тем, что мы рассматриваем эти объекты и явления в их системообразующей связи с другими объектами и явлениями. Центральным понятием в этом подходе является понятие «система».

Система: (целое, составленное из частей соединение) множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Совокупность некоторых элементов, объединенных в одно целое так, что это целое приобретает новое свойство, отсутствующее у элементов в отдельности. Принципы системности: внешняя и внутренняя целостность, иерархичность. Система имеет вход, внутреннее состояние и выход. При изучении системы (используя системный подход) выполняют два этапа: анализ и синтез.

3.1. Модель «SHEL»

Системный подход в исследованиях можно обеспечить, используя модель, позволяющую осуществить поэтапный подход. Ее можно представить в виде блоков (интерфейсов), представляющих различные факторы, влияющие на результат деятельности человека и определить величину ошибки человека в процессе принятия решения, что обычно называют человеческим фактором. Эту модель называют «модель SHEL».



Аббревиатура состоит из начальных букв английских названий ее составных элементов: Liveware – субъект (человек), Hardware – объект (машина), Software – процедуры (правила, руководства, символы, документы), Environment – среда (условия, в которых должны взаимодействовать первые три компонента). Эта модель служит лишь основой для понимания человеческого фактора или исследований полиэргатических систем и процессов в них.

Алгоритм самого исследования представляет собой схему, содержащую компоненты, совокупность которых позволяет определить задачи, решения которых необходимо осуществить. Определяют:

- | | |
|---|--|
| ➤ Область и направления исследования | Актуальность и новизна исследования |
| ➤ Тема исследования | |
| ➤ объект исследования | |
| ➤ предмет исследования | Принципы исследования: декомпозиция, формализация, агрегирование |
| ➤ <u>проблема → цель → гипотеза (предположение)</u> | |
| ➤ задачи исследования и их решение | Методы исследования (выбор зависит от опыта исследователя) |
| ➤ Выводы и рекомендации | |
| ➤ теоретическая значимость исследования | |
| ➤ практическая значимость исследования | |

Пример. Тема: «Повышение эффективности использования ВП в районе аэродрома Ульяновск».

Объект исследования – структура и организация ВП района аэродрома Ульяновск.

Предмет исследования – условия, повышающие эффективность использования ВП района аэродрома Ульяновск.

Проблема – снижение безопасности и экономичности ИВП при повышении интенсивности воздушного движения.

Цель – поиск условий, изменяющих структуру и организацию ВП района аэродрома Ульяновск, и устраняющих факторы, снижающие эффективность ИВП.

Гипотеза – обеспечение предлагаемых в работе новых условий организации ВП в районе аэродрома Ульяновск повысит эффективность использования данного ВП при УВД.

Задачи – 1., 2., 3.,

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что содержащаяся в нем совокупность положений, идей и подходов может быть квалифицирована как решение проблемы поиска условий повышения эффективности использования ВП в районе аэродрома Ульяновск.

Практическая значимость исследования состоит в том, что:

– созданы предпосылки повышения эффективности использования потенциала ВП в районе аэродрома Ульяновск;

– новая организация ВП в районе аэродрома Ульяновск, апробированная в условиях высокой интенсивности ВД может быть использована для повышения эффективности использования ВП района аэродрома Ульяновск в рамках аэронавигационного паспорта;

– определены новые показатели характеристик процесса УВД с учетом критериев эффективного использования воздушного пространства в районе аэродрома Ульяновск.

Используя системный подход при исследовании системы ОВД и этапов её функционирования применяют принципы декомпозиции, формализации и агрегирования.

3.2. Принципы декомпозиции и агрегирования в исследовании процессов управления воздушным движением

В связи со сложностью процессов УВД при их исследовании используется принцип декомпозиции. В соответствии с принципом декомпозиции любая сложная система или процесс ее функционирования могут быть расчленены на более мелкие элементы или этапы и процессы с целью исследования их доступными на данном уровне развития способами. Понятно, что подобное членение должно быть оправданным и подчиняться определенным правилам или рекомендациям. Следует подчеркнуть особую важность принципа декомпозиции при исследовании процессов деятельности человека-оператора и взаимосвязи их с процессами других этапов функционирования системы ОВД. Например, при использовании принципа декомпозиции процессов деятельности человека-оператора удастся исследовать одну из наиболее интересных и важных проблем оптимизации решения организационных задач УВД. Действительно, к процессам организации УВД, как известно, относятся процессы организации полетов ВС, деления воздушного пространства, назначения схем полетов определения рубежей приема-передачи, пунктов обязательных донесений и др. Решение совокупности задач, на которые разбивались эти процессы, производилось ранее лишь с учетом оптимизации движения ВС (по показателю быстродействия, энергетическому показателю относительной безопасности), обеспеченности полями действия РТС воздушной навигации и УВД, характеристик бортового оборудования и иногда с учетом действий экипажа. Об учете характеристик деятельности человека-оператора, в данном конкретном случае оператора радиолокационного контроля – диспетчера УВД при решении таких задач обычно не заботились. Во всяком случае, влияние результата их решения на загруженность диспетчера не принималось во внимание. Такие характеристики деятельности диспетчера, как число ошибок, скорость восприятия информации, число пропусков в решении конкретного вида задач по УВД в определенной ситуации при определенном уровне профессиональной подготовки и качестве плана движения, находятся в зависимости от качества решения задач организации УВД. Получение такой зависимости возможно лишь при декомпозиции процессов организации УВД, с одной стороны, и декомпозиции деятельности диспетчера, с другой. Полагая, что вероятностные характеристики ошибок диспетчера

или скорости восприятия информации при выполнении однозначно определенных операций, на которые декомпозируется его работа в строго оговоренных условиях, могут служить мерами качества определенных операций, на которые декомпозируются процессы организации УВД, можно выразить эти характеристики, например, через число точек пересечения воздушных трасс, число точек обязательных донесений, зон отсутствия или нарушения радиолокационного контроля и др. Принцип декомпозиции позволяет выделить в качестве самостоятельных ряд типовых задач, каждая из которых характеризуется своими локальными целями и показателями, математическими моделями, методами решения и формализации. При использовании принципа декомпозиции всегда возникает целая совокупность вопросов, зачастую носящих достаточно общий характер. Декомпозиция системы ОВД с целью ее исследования практически всегда предполагает не только разделение функционирования системы на этапы, процессы, задачи и т.д. (вплоть до операций), т.е. членение сложной задачи на более мелкие, решение которых обозримо, но и агрегирование, т.е. объединение их вокруг типовых задач, выделенных по ряду общих признаков. Так происходит процесс классификации задач. О принципе декомпозиции можно говорить, как о средстве борьбы с избыточностью, и его использование неизбежно при разработке алгоритма искусственного интеллекта: число типовых задач, процессов и моделей, вокруг которых происходит агрегирование и концентрация при членении, находится в подсознании оператора. Таким образом, очень важно разработать классификационные признаки при декомпозиции, а следовательно, и правило декомпозиции. Важно также решить вопрос о выборе и формализации границы членения задач. Важность и проблематичность данного вопроса иллюстрируется современным состоянием общей теории управления, разделом которой является и теория УВД. Действительно, при использовании принципа декомпозиции в общей теории управления известны и формализованы две группы задач: задачи программного управления, когда рассчитываются оптимальная траектория процесса в пространстве состояний, оптимальные команды управления и параметры процесса (значения показателей его эффективности); задачи стабилизации или управления с обратной связью, когда находятся те же характеристики, что и при регулировании процесса, по отклонениям относительно программной его траектории, найденной из реше-

ния задачи программного управления. Реализация принципа декомпозиции возможна на различных уровнях исследования процессов УВД с помощью различных подходов. Так, если речь идет относительно одного из общих направлений исследований, характеризующего общий замысел моделирования путем создания иконографических моделей, разработки диопозиционных моделей принятия решения или решений обратной задачи теории оптимальных процессов, то декомпозиция здесь происходит на концептуальном уровне.

Чаще всего принцип декомпозиции используется все же на уровне пространственно-временных характеристик, описывающих цели и ограничения процесса. Здесь реализация его связана конкретно с выбором вида математических моделей процесса, т. е. с определением уровней и структуры иерархии задач, природы приоритетов, линеаризацией, дискретизацией и другими видами упрощений реально протекающих процессов.

Еще одним уровнем можно считать уровень отдельных задач. При исследовании основной задачи УВД часто используется декомпозиция и на отдельные взаимосвязанные задачи: задачи измерений, оценки и прогноза состояния процесса, его идентификации; задачи оптимального принятия решений, разделяющиеся, в свою очередь, на анализ состояний, учет ограничений, выработку команд; задачи выбора, выполнения решения и контроля.

При исследовании подобных задач обычно переходят к еще одному уровню декомпозиции, связанному с расчленением показателей эффективности, управлений и параметров математических моделей процесса. Важно заметить, что полученные на данном уровне результаты могут поставить под сомнение правильность выбранного направления исследования на самых высоких уровнях применения принципа декомпозиции. Особое значение при исследовании процессов УВД на всех уровнях приобретает декомпозиция целей. Поскольку речь идет о процессах в полиэргатических системах УВД, то цели, формализованные в виде показателей эффективности, которым должны соответствовать оптимальные процессы УВД, формируются на основе анализа и декомпозиции функций ценности и функции полезности лиц, принимающих решения (ЛПР): диспетчеры при непосредственном УВД, руководители полетов при управлении работой диспетчерской смены, начальника СД при принятии решений по управлению работой службы движения и организации

УВД в районе аэродрома и т. д. Использование принципа декомпозиции показывает возможности, открывающиеся в исследовании процессов УВД. Применение принципа декомпозиции позволяет проводить исследования системы ОВД на количественном уровне. Это дает возможность разделить весь период функционирования системы ОВД таким образом, чтобы получить отдельные процессы, задачи, и так далее – вплоть до микроопераций; и все это производится именно с целью возможности упрощения количественного анализа (рис. 6). На этом пути уже возможно использование имеющихся математических моделей для установления основных функциональных зависимостей, анализа факторов и их взаимосвязей. Применение принципа декомпозиции позволяет получить некоторые важнейшие выводы и обоснованные рекомендации по оптимизации структурно-организационных решений в отдельных зонах УВД и процессов предварительного планирования и обеспечения полетов, а также по внедрению технических средств УВД, повышающих уровень автоматизации труда диспетчера, и по вопросам профессиональной подготовки диспетчеров. Именно поэтому в системе ОВД так важно использовать второй принцип общесистемного подхода – принцип агрегирования. Он заключается в использовании возможности свертки полученных при декомпозиции конкретных результатов в конечное, возможно малое их число, удобное для восприятия ЛПР. Таким образом, речь идет об отображении результатов исследований из области, удобной для их математического моделирования, в область, удобную для восприятия ЛПР. Применение принципа агрегирования состоит в максимальной группировке параметров и всего множества частных показателей и представлении их в виде составных показателей. Подобные составные показатели в социально-экономических исследованиях получили название обобщенных индикаторов и с их помощью можно характеризовать динамику развития процессов. В качестве примеров составных показателей процессов на этапе организации УВД можно привести число потенциально конфликтных ситуаций, определяемое топологией схем движения, его интенсивностью и другими параметрами, среднее время занятости диспетчера, интегрально характеризующее параметры организации УВД, уровень профессионального мастерства диспетчера и качество фразеологии радиообмена. Аналогичные составные показатели могут быть получены для этапа планирования и обеспечения полетов, а также для этапа непо-

средственного УВД. Оперирование с ними помогает ЛПР разрабатывать обоснованный и гибкий план мероприятий по повышению эффективности функционирования системы УВД, чутко и своевременно реагировать на изменение состояния эффективности системы. Принцип агрегирования, таким образом, оказывается центральным в системах организационного типа. Важно подчеркнуть, что сущность его состоит в выявлении ряда общих признаков (корреляции частных результатов) показателей и объединении на этой основе их в составные; это же относится и к группировке технических устройств, информационных потоков и т. п. Поскольку число указанных признаков большей частью не определено, то принцип агрегирования, так же как и принцип декомпозиции относят к эвристическим принципам, эффективность использования которых определяется опытом, интуицией и удачностью выбора как числа разбиений в каждом конкретном случае декомпозиции, так и числа признаков группировки при агрегировании.

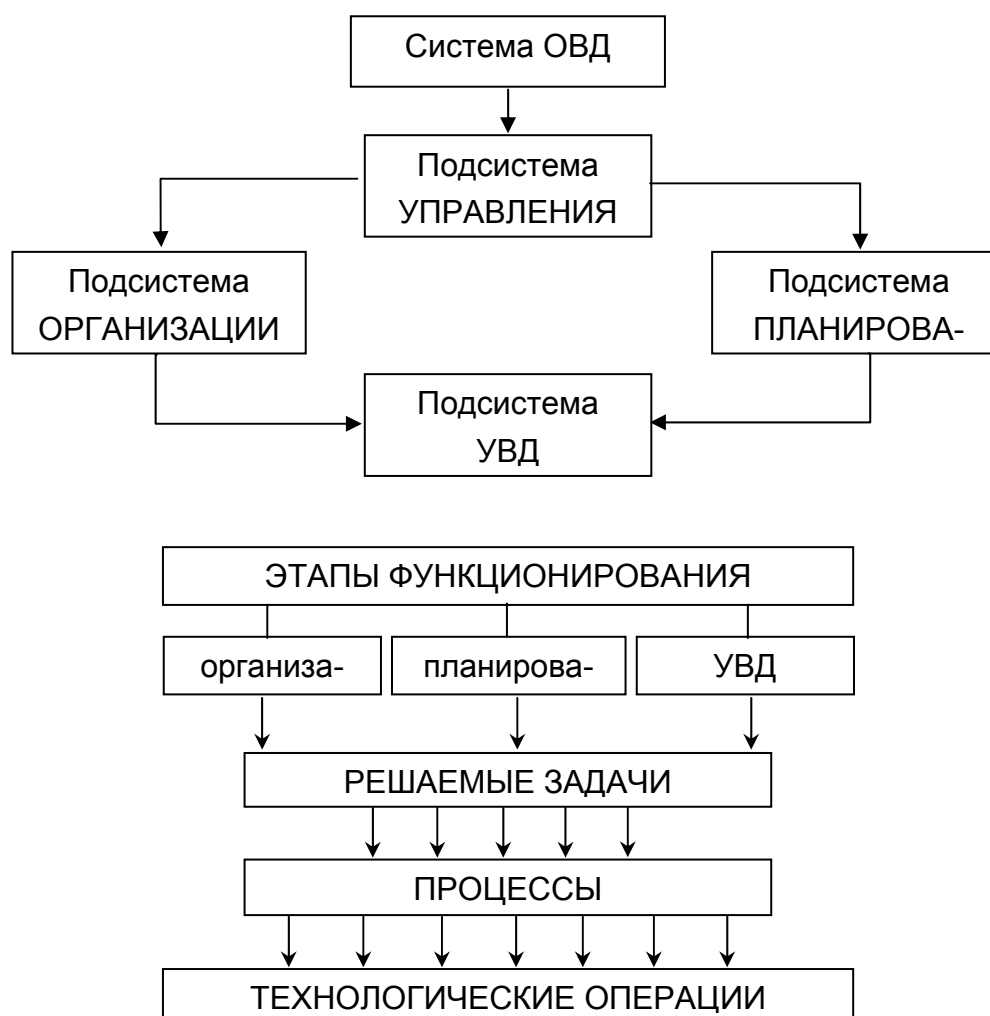


Рис. 6. Декомпозиция системы организации воздушного движения

Таким образом, принцип агрегирования – это процесс, обратный принципу декомпозиции. Полученные в результате исследования элементы, необходимые для получения конечного результата, собираются в единое целое, определяемое целью исследования и гипотезой.

Принцип формализации представляет собой процесс выбора из общего материала элементов, необходимых для анализа, влияющих на результат исследования и отсева элементов, не влияющих на конечный результат и не имеющих отношения к проблеме и цели исследования, что экономит время и средства, необходимые для исследования и делает конкретным результат.

Помимо принципов исследования применяют различные методы, например метод моделирования, где выбор модели зависит от цели исследования и знаний исследователя.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

4.1. Основные принципы моделирования

С целью исследования системы ОВД на этапах функционирования выделяют процессы, достаточно полно отражающие определенную сторону системы. Выбор процесса, описание его состояния и изменения состояния количественной его характеристики является основой моделирования процессов в системе ОВД. Модель – это идеальный или материальный объект, который в некоторых условиях заменяет объект-оригинал (копия объекта-оригинала). Моделью называют приближенное или упрощенное представление о действиях любой конкретной системы, позволяющее анализировать и синтезировать различные по своей природе системы едиными методами. Это понятие основывается на существующей адекватности между двумя процессами, один из которых происходит в реальной системе, другой – в модели. Если такая адекватность устанавливается в отношении необходимых количественных или качественных характеристик процессов, то между ними существуют отношение оригинала и модели, то есть один из процессов рассматривается как оригинал, другой – как модель. Адекватность, или подобие, как и

различие, могут быть использованы в различных аспектах, например, можно потребовать от модели изменения (уменьшения) геометрических размеров либо скорости протекания процесса. Большую роль в изучении процесса сложной природы играют упрощенные модели, в которых сохранены лишь существующие для круга изучаемых явлений черты оригинала. Такими чертами может служить внешнее сходство, – когда речь идет о макетировании, сходство структуры или сходство в изменении состояния процессов. **Модели можно классифицировать**, например, по:

- степени подобия (схожести) – изоморфные, гомоморфные;
- средствам исполнения – идеальные, материальные;
- характеру взаимодействия с объектом-оригиналом – описательные, функционирующие, модели внешнего подобия, символические, модели-аналоги.

Практика и теория исследований систем ОВД на различных этапах ее функционирования показывает, что традиционным подходом обычно служит подход, использующий принципы агрегирования и декомпозиции, когда весь период функционирования системы УВД делится на этапы, этапы, в свою очередь, – на процессы и т.д. При этом для анализа вводят количественные (либо качественные) характеристики процессов и при исследованиях используют уже только эти введенные характеристики. При объединении результатов, полученных при моделировании процессов, происходит синтез и оценка обобщенных характеристик системы УВД, т.е. агрегирование ее качеств на всех этапах функционирования.

В выделении процесса, а также в описании основных закономерностей, определяющих область и виды изменения характеристик, и состоит моделирование.

Изучение системы ОВД невозможно без моделирования ее процессов. Употребляя слова «модель», «моделирование», «модельное описание», обычно имеют в виду выбор на этапе функционирования системы определенного исследуемого процесса и выявление именно тех особенностей, которые и интересуют исследователя.

Построение модели характеристик процессов как декомпозиция этапов на процессы и выбор основных характеристик процесса, всегда было неформальной процедурой. Качество модели в значительной мере зависит от

исследователя, его опыта, способностей и т.п. Поэтому процесс моделирования во многом зависит еще и от экспериментальных данных, их полноты и точности. Модель должна достаточно точно отражать процесс. При этом она должна быть удобной для использования, например, для восприятия ЛПР. Детализация параметров и характеристик, степень полноты учета всех факторов, форма представлений модели и другие моменты зависят от целей исследования.

Обычно моделью считают какое-либо (не обязательно самое простое) подобие исследуемого процесса. Например, для выработки оптимальной команды управления диспетчеру необходимо уметь прогнозировать развитие ДВО. Можно представить себе устройство, которое с не меньшей точностью смогло бы осуществить такой прогноз развития ДВО. Подобное устройство служило бы моделью процесса прогнозирования, но и только. Диспетчер же способен выполнять и другие, гораздо более сложные функции, для повторения которых понадобилось бы введение других устройств с еще более сложной структурой и т.д.

Таким образом, модель является приближенным или упрощенным представлением любого конкретного процесса исследуемой системы или его изменения и дает возможность исследовать его различными методами. Если количественные либо качественные характеристики двух процессов подобны, то говорят, что между этими процессами существуют отношения оригинала и модели, т.е. один из процессов рассматривается как оригинал, другой – как модель. При этом подобие, так же как и различие между оригиналом и моделью, может быть использовано в различных аспектах. Так, можно при моделировании измерять геометрические размеры объекта, либо скорости протекания процесса. Большое значение имеют упрощенные модели, позволяющие изучать сложные процессы, сохраняя лишь те черты оригинала, которые существенны для изучаемых явлений. Такими чертами могут быть внешнее сходство, когда речь идет о таком виде моделей как макетирование, сходство структуры, а также сходство в изменении процессов, описываемое изменением их количественных характеристик.

Для оценки подобия модели и процессов необходимо оценить схожесть изменений их характеристик при одинаковых условиях. В качестве таких

условий рассматривают внешние воздействия, управляющие сигналы, действующие на процесс и соответственно на модель и т.д. Можно построить шкалу схожести, началу которой соответствует абсолютное совпадение характеристик модели и процесса, а другие деления определяют различные степени нарастающего различия этих характеристик при одних и тех же исходных условиях. Так определяются переменные параметры – входные сигналы, обобщающие внешние условия и т.д.

Сопоставление модели и реального процесса теперь можно проводить, пользуясь введенными понятиями характеристик и параметров. При таком сопоставлении модель называют изоморфной, если между ней и оригиналом наблюдается полное соответствие. Чтобы пояснить понятие «полное соответствие», рассмотрим случай, когда изменение процесса определяется его входными и выходными сигналами, которые определяют в конечном итоге количественные характеристики процесса. Если два процесса определяются идентичными наборами входных и выходных сигналов и изменение их характеристик одинаково при изменении входного сигнала, то говорят об их изоморфизме или о полном соответствии. Во многих случаях изоморфные модели оказываются чрезвычайно сложными и неудобными для практического использования хотя бы уже по той причине, что число компонент их выходного сигнала оказывается большим. Условия изоморфности не являются необходимыми условиями соответствия модели оригиналу во всех случаях исследования свойств процесса. Часто модель может быть использована и тогда, когда ее соответствие оригиналу не столь полно, как этого требуют условия изоморфности. Так, если среди компонент выходного сигнала – количественных характеристик процесса есть существенные и менее существенные для решения поставленной задачи, модель можно строить лишь с учетом существенных компонент. Тогда вместо оригинала с числом компонент выходного сигнала получают упрощенную модель.

Упрощение модели может быть получено не только путем уменьшения числа компонент выходного сигнала, но также и путем объединения некоторого их множества в одно. Так, иногда динамический процесс со сравнительно коротким переходом из одного состояния в другое может быть изучен с помощью статистической модели, подобной этому процессу в его конечном

состоянии. Процесс, полученный из исходного процесса реальной системы путем его упрощения за счет уменьшения компонент выходного сигнала или более грубой оценки его изменения во времени, называют гомоморфной или упрощенной моделью исходного процесса. Можно сказать, что гомоморфная модель содержит элементы, соответствующие лишь крупным частям оригинала и полное поэлементное соответствие между ними отсутствует. В качестве примера можно снова использовать процесс управления движением ВС. Для пилота существенными величинами являются все компоненты вектора скорости центра масс ВС, координаты его положения в заданной системе координат, значения углов и угловых скоростей движения ВС вокруг центра масс, положения всех органов управления и многие другие параметры. Диспетчера районного центра системы ОВД, управляющего воздушным движением группы ВС в данной зоне, интересуют лишь координаты положения центра масс и (в меньшей степени) компоненты вектора линейной скорости ВС. Такая замена большого числа параметров (компонент выходного сигнала) на небольшое их число и означает переход к гомоморфной модели.

4.2. Виды моделей

При исследовании сложных систем в настоящее время широко используются главным образом три вида моделей: графы систем или иконографические модели, математические модели и физические модели.

Иконографические модели используются для представления структуры систем и соответствующих или функциональных взаимосвязей. Примером иконографической модели для системы УВД является структурная схема совокупности простейших контуров управления: ВС – пилот – радиопереговорное устройство – диспетчер – радиолокатор – ВС. Понятно, что такая модель не дает полного представления о системе. Для более полного исследования больше подходят физическая или математическая модели.

При построении физических моделей используются результаты формального сравнения некоторых компонент, характеризующих процессы, происходящие в реальных системах и гомоморфных моделях, отличающихся от оригинала по своей природе и устройству. Примером физических моделей могут

служить электрические аналоги механических или пневмогидравлических систем. В системах УВД физическое моделирование используется при построении имитаторов и тренажеров. Наиболее полное представление о зависимости выходных характеристик системы от входных обычно можно получить с помощью математического моделирования процессов. Математической моделью обычно считают описание на каком-либо формальном языке изменений наиболее существенных компонент количественной характеристики состояния процесса. Она может быть представлена в виде графиков, таблиц, программ для ЭВМ, уравнений, систем уравнений либо неравенств. Математическая модель является удобным средством анализа процессов, происходящих в реальной системе. С помощью формальных процедур над описаниями можно получить ряд выводов и суждений об интересующих исследователя чертах изучаемого процесса. В этом и состоит смысл анализа процессов систем с помощью математического моделирования. Далее везде, где только речь идет о моделях, имеются в виду математические модели. Математические модели не могут идеально отражать изменения состояния процесса; они относятся к гомоморфным моделям. Нельзя разработать правила построения математической модели, можно лишь говорить об общих требованиях, предъявляемых к ним: заданная характеристика модели должна совпадать с характеристикой оригинала, модель должна быть проста и доступна для восприятия ЛПР. По причине неформализуемости моделирования при исследовании одного и того же процесса различные исследователи пользуются иногда разными математическими моделями. В настоящее время имеются различные подходы к моделированию процессов в системе ОВД. Все они могут быть условно объединены в два направления, при первом из которых ставят своей целью построение как можно более эффективной модели каждой операции, затем – модели их совокупности, модели задачи, агрегируя которые, строят модель целого процесса. К этому направлению относятся подходы, позволяющие получить так называемые элементарные модели, объединяя (агрегируя) которые и получают модели процессов.

Ко второму направлению относятся подходы, заключающиеся в попытках моделировать процессы всей системы ОВД либо отдельных ее подсистем на уровне отдельной зоны УВД (РЦ, АУЗ и т.п.), объединяющей несколько секторов с простейшими контурами УВД.

Оба направления содержат подходы, учитывающие свойства системы ОВД как системы организационного управления либо как системы планирования, формирования и управления потоками ВС, потоками заявок, событий или учитывающие динамические свойства объектов управления информационных потоков, явлений и процессов в системе ОВД.

Оба направления наиболее отчетливо различаются моделями объектов управления: если в первом из направлений эти модели характеризуют динамические процессы движения отдельных ВС, то во втором они характеризуют поток ВС. Моделирование процессов УВД отличается в этих двух направлениях тем, что модели процессов в первом направлении рассматриваются как характеристики отдельных ВС, тогда как во втором – как характеристики непрерывных потоков совокупности прилетающих, пролетающих и вылетающих ВС. В первом из рассматриваемых случаев вводится вектор состояния и возникает возможность количественной оценки характеристики ДВО в зоне УВД, учитывающей состояние каждого из ВС. Во втором используются количественные характеристики, такие, как интенсивность, плотность воздушного движения и др., т.е. вводятся функции, описывающие изменение процесса полета, но только не одного ВС, а какого-то их потока.

Примеры наиболее важных моделей целесообразно показать, начиная с этапа непосредственного УВД, приведя модели основных задач, решаемых при функционировании простейшего контура, и добавляя к ним в дальнейшем модели операций, задач и процессов, протекающих на этапе планирования воздушного движения и обеспечения полетов, а также на этапе организации УВД. Примеры постановки таких наиболее характерных задач и построения элементарных моделей для каждого из этапов позволяют продемонстрировать достаточно полный набор элементарных моделей процессов, протекающих в системе ОВД.

Для общей характеристики второго направления можно привести следующий пример: требуется определить наилучшую структуру трасс в данном РЦ, либо стандартных коридоров в данной зоне подхода РА или АУЗ. Наилучшей считается такая структура, при которой загруженность диспетчера будет наименьшей и топливно-энергетические затраты на полеты в данной зоне также будут минимальными. Аналитические исследования подобной

задачи вызывают значительные трудности из-за отсутствия математических моделей взаимосвязи загруженности с характеристиками структуры трасс, а также из-за сложности учета изменений структуры трасс при взаимодействиях между смежными диспетчерами и ряда других факторов.

Чаще всего при решении поставленной задачи используют метод имитационного или полунатурального моделирования, когда диспетчеры «проигрывают» различные варианты структуры трасс на моделирующих тренажерных комплексах, имитирующих практически все процессы организации УВД, планирования и осуществления движения совокупности ВС. Основой такого моделирующего тренажерного комплекса служит мощная вычислительная машина. Применение ЭВМ для проведения таких машинных экспериментов превращало ее в экспериментально-тренажерную установку, что означает качественно новый подход к ее использованию в виде имитационной системы. Именно благодаря возможностям ЭВМ стала доступной реализация вариантного метода исследования в виде диалога между исследованием и моделирующим комплексом.

При втором направлении моделирования применяются вычислительные комплексы, т.е. машинные аналоги изучаемых процессов, и оно наиболее эффективно при исследовании системы ОВД в целом. Для моделирования всего множества процессов необходимо иметь математические модели динамических процессов движения отдельных ВС, либо характеристик их потоков в данной зоне, процессов, характеризующих работу их навигационно-пилотажных комплексов, иметь модели, учитывающие влияние метеофакторов на процессы УВД, структуру зоны УВД, радиотехнические средства и др. Реализация подобных математических моделей требует применения самых мощных вычислительных устройств, объединения их в целые моделирующие комплексы. Принимая во внимание сложность процедуры построения математических моделей процессов, необходимо помнить о неоспоримых преимуществах математического моделирования как метода исследования, к которым, в первую очередь, относятся следующие:

– наличие математических моделей процессов позволяет проводить численное экспериментирование при исследовании их характеристик, что гарантирует полную безопасность системы;

– масштабы времени в численных исследованиях моделей процессов могут быть существенно меньше реального масштаба времени протекания процесса, что ускоряет исследования, позволяет получить ряд качественных результатов при использовании такой модели в управлении процессами;

– воспроизводимость исследования математических моделей позволяет устанавливать причины и предпосылки неожиданных результатов, что часто невозможно в реальной системе;

– проведение экспериментов с помощью математических моделей в основном экономически выгодней, чем экспериментирование с реальной системой.

Значительную трудность всегда представляет программирование и разработка средств математического обеспечения, стоимость которых составляет до 30 % стоимости всей разработки моделирующего комплекса.

Совмещение функций научно-исследовательских центров с функциями центров по обучению носит принципиальный характер и вызвано главным образом двумя причинами. Каждый из центров использует очень дорогое оборудование и оснащение, требующее значительных затрат. Наибольшую сложность при моделировании представляет деятельность диспетчеров и экипажей ВС, входящих в простейший контур. Именно поэтому в моделях систем ОВД часто функции диспетчеров и пилотов не моделируются, а в контур моделирующего устройства включаются специалисты, выполняющие функции диспетчеров и пилотов. Построенная таким образом модель может быть использована как для проведения научно-исследовательских работ, так и для обучения диспетчеров. Подобные модели, работающие в реальном масштабе времени, представляют собой исследовательские диспетчерские тренажеры и включают ЭВМ, пульта пилотов-операторов, диспетчерские пульта, аппаратуру видеозаписи, воспроизведения, передачи и обработки данных, а также другие вспомогательные устройства.

Исследовательские диспетчерские тренажеры обычно используются при решении целой совокупности задач, основными из которых являются:

- анализ и изучение потоков ВС в конкретных зонах УВД;
- исследование эффективности системы ОВД в определенном регионе;
- определение рациональных структурных характеристик зон УВД;

- исследование эффективности функционирования отдельных элементов систем ОВД (в том числе и внедряемых) с целью выявления узких мест и рационального распределения функций между элементами системы;
- подготовка, переподготовка и совершенствование навыков специалистов УВД;
- проведение широкого комплекса эргономических исследований;
- проверка эффективности взаимодействия диспетчеров смежных секторов управления;
- отработка пооперационной технологии работы диспетчеров различных пунктов.

5. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Понятие оптимизации связано с поиском или созданием чего-то наилучшего в определенном смысле, наиболее полно удовлетворяющего определенным потребностям. Оптимизировать процесс функционирования системы – значит найти и установить такие условия (значения параметров процесса), при которых наиболее полно проявляется то или иное свойство системы; разработать оптимальный план полетов – создать такой план, который бы наиболее полно удовлетворял некоторым требованиям, например, заявленным авиакомпаниями времени и количеству вылетов; спроектировать оптимальный маршрут вылета в районе аэродрома – такой маршрут, который бы наиболее полно удовлетворял требованиям, например, безопасности и экономичности.

Найденные при оптимизации решения будут оптимальны именно в определенном смысле. Чтобы указать, в каком же смысле искомое решение должно быть оптимально, при постановке задачи оптимизации вводится оптимизируемый критерий (критерий оптимизации). Критерий (своего рода мерило оценки эффективности) отражает цели оптимизации и, как правило, может быть выражен количественно. Под критерием оптимизации можно понимать некоторый показатель функционирования системы, который выбирается главным при постановке задачи поиска наилучшего решения. В системе УВД

на разных этапах функционирования в качестве критериев могут выступать такие показатели, как пропускная способность зоны УВД или предельно допустимая интенсивность воздушного движения, ожидаемая частота потенциально конфликтных ситуаций, показатель сложности УВД в той или иной зоне, показатели отклонения от запланированной программы полета ВС в зоне ответственности диспетчера, число допущенных опасных сближений за некоторый период времени, средний возраст персонала службы движения и т.п.

Выбор показателя в качестве критерия оптимизации означает, что дальнейшее решение должно, по возможности, максимизировать или минимизировать (в зависимости от смысла задачи) значение этого показателя. На практике бесконечно увеличивать (уменьшать) значение показателя не удастся, т.к. присутствуют некоторые ограничения, которым искомое решение также должно удовлетворять. Например, повышение интенсивности воздушных потоков ограничено, в частности, допустимой загруженностью диспетчера. Эта загруженность, которая выражается в виде коэффициента загруженности диспетчера, является тем ограничением, которому должно удовлетворять оптимальное решение. В качестве примера другого ограничения, которое появляется при оптимизации организации УВД по критерию интенсивности, можно привести ограничение безопасности полетов, выражаемое в виде установленных норм эшелонирования между ВС – исходя из этого ограничения невозможно бесконечно увеличивать интенсивность потока воздушных судов, т.к. это в итоге приведет к такому большому количеству ВС в зоне УВД, что они там просто не поместятся без нарушения интервалов. Еще один пример ограничений: установленные схемы и правила полетов в районе того или иного аэродрома, которые ограничивают возможные траектории полета ВС и таким образом могут выступать в качестве ограничений задачи оптимизации УВД по критерию экономичности.

Сказанное выше позволяет выделить два основных элемента задачи оптимизации: критерий оптимизации и ограничения. Поскольку при оптимизации речь идет, главным образом, о поиске решения, оптимальность которого была бы обоснована количественно, т.е. расчетами, то как критерий, так и ограничения должны быть такими, чтобы они могли выражаться количественно, кроме того, должны быть известны зависимости их значений от некоторого

набора параметров. Именно набор этих параметров, управляя значениями которых добиваются максимизации (минимизации) критерия, составляет третий важный элемент задачи оптимизации.

Для возможности применения математических методов при решении задач оптимизации и, таким образом, количественного обоснования оптимальности решений, задача оптимизации формулируется в виде математической модели, т.е. формализуется. Это позволяет абстрагироваться от первоначального смысла задачи, от несущественных деталей, затрудняющих решение, и применить известные типовые методы и алгоритмы оптимизации.

Процесс постановки и решения задач оптимизации связан со следующим алгоритмом:

1) изучение системы – изучение особенностей функционирования, факторов, влияющих на ее работу, формулируются цели и выбирается критерий и ограничения;

2) описательное моделирование – устанавливаются и описываются словесно зависимости между параметрами процессов в системе с точки зрения критерия оптимизации и ограничений;

3) математическое моделирование - перевод описательной модели на формальный математический язык;

4) выбор или создание метода решения;

5) выбор или написание алгоритма и программы для ЭВМ;

6) решение на ЭВМ;

7) анализ полученных результатов – формальный, т.е. на правильность введения данных и работы программы; семантический, т.е. анализ смысла результатов, что должно показать пригодность использованных описательной и математической моделей и применимость полученных результатов на практике.

В общем виде задачу оптимизации можно сформулировать так: среди допустимых значений параметров процесса из набора $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ найти такие, при которых критерий I достигает своего наибольшего (наименьшего) значения. Обобщенная математическая модель запишется следующим образом:

$$I = f(X) \rightarrow \max (\min),$$
$$g_j(X) \leq (\geq, =) b_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m,$$

где I – критерий оптимизации; $f(X)$ – целевая функция, т. е. функция, указывающая зависимость критерия оптимизации от значения параметров X ; $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – набор из n параметров процесса, которыми можно управлять при поиске (создании) оптимального решения, эти параметры процесса называют в теории оптимизации переменными процесса, а X – вектором состояния процесса, еще говорят, что x есть компоненты (координаты) вектора X ; $g_j(X)$ – функции-ограничения, число которых m ; b_j – некоторые постоянные величины, выражающие количественные значения ограничений, знаки (\geq , $=$) подразумевают, что в записи ограничения вместо « \leq » может быть « \geq » или « $=$ ».

Чаще при записи задачи критерий I опускается. Если значения переменных вектора X таковы, что удовлетворяются условия ограничений задачи, то это есть вектор допустимых значений или допустимое решение задачи (но не обязательно оптимальное). Если при текущих значениях переменных X выполняются условия максимума (минимума) целевой функции и выполняются ограничения, то это есть вектор оптимальных значений параметров процесса, или оптимальное решение. Рациональное решение, т. е. разумное, является допустимым и лучшим среди множества других решений, однако не оптимальным, т.е. не самым лучшим среди допустимых.

Вид задачи оптимизации и соответственно выбор того или иного метода нахождения оптимального решения зависят от вида целевой функции и вида функций-ограничений. Классифицируя задачи оптимизации, в самом общем виде можно выделить задачи оптимизации без ограничений или, точнее, с простыми ограничениями, которые легко проверить – ограничения вида $x_i \leq (\geq) b_i$ и задачи с ограничениями. Задача с ограничениями называется еще задачей математического программирования. В зависимости от того, к какому из названных классов относится конкретная задача, для ее решения применяются, соответственно, методы безусловной или методы условной оптимизации.

Задача математического программирования сама подразделяется на подклассы, в частности такие, как задача линейного программирования и задача нелинейного программирования, выделяются также задачи параметрического программирования, целочисленного, стохастического программирования и

др. Для всех их применяются те или иные, наиболее пригодные для данного класса задач, методы оптимизации.

5.1. Методы оптимизации процессов в системе организации воздушного движения

При выборе методов оптимизации процессов УВД их целесообразно разделить на два вида – статические и динамические. К статическим процессам УВД относят в основном процессы планирования и организации управления воздушным движением, в которых не рассматриваются или не учитываются динамические свойства объектов системы УВД, в частности таких объектов, как воздушные суда.

К динамическим процессам относят, прежде всего, процессы непосредственного УВД, а также процессы организации, связанные с организацией траекторий движения ВС. В обоих случаях в процессе решения задачи воздушное судно рассматривается как динамический объект, состояние которого в воздушном пространстве и характеристики движения меняются и могут быть управляемы. В отличие от этого, например, при планировании потоков воздушного движения исходные данные о расположении воздушных трасс и аэродромов, состоянии технических средств обеспечения полетов, метеоусловия и т. п. считаются статичными, т. е. не учитываются их возможные изменения. С точки зрения оптимизации отличие между статическими, и динамическими процессами следующее: при оптимизации статических процессов следует найти одно оптимальное решение – вектор X^* ; при оптимизации динамических процессов необходимо найти последовательность оптимальных решений $X_1^*, X_2^*, X_3^*, \dots$, для одного состояния динамического объекта, второго, третьего и т.д., тем самым найти оптимальную траекторию движения объекта из начального в конечное желаемое состояние.

5.2. Оптимизация статических процессов

При оптимизации статических процессов используются модели задач математического программирования. Наиболее известной является задача линейного программирования (ЗЛП), в которой все функции $f(X)$, $g(X)$ – линей-

ны. Линейность, например, функции $f(X)$ означает, что, если вектор X содержит только одну переменную, то эта функция на рисунке может быть изображена в виде прямой линии, если переменных две, то функция представляет из себя плоскость, при большем количестве переменных функция представляет из себя гиперплоскость (пытаться представить внешний вид такой функции не стоит). Подобно уравнению прямой на плоскости, линейная функция может быть представлена в виде суммы:

$$f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + \dots + c_nx_n,$$

где n – количество переменных x в векторе X .

Запись ЗЛП получается из записи общей задачи математического программирования путем конкретизации вида функций $f(X)$, $g(X)$:

$$f(X) = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max(\min)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \leq (\geq, =) b_1$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n \leq (\geq, =) b_m.$$

Здесь m – количество ограничений, в каждом ограничении может стоять или знак равенства, тогда это уравнение-ограничение, или знак неравенства, тогда это неравенство-ограничение; коэффициенты c_i , a_{ji} , b_j – некоторые константы, которые характеризуют условия, для которых осуществляется поиск оптимальных решений, таких как неуправляемые параметры процесса, имеющиеся ресурсы, значимость переменных и др. в зависимости от смысла задачи и переменных. Можно использовать более лаконичную форму записи:

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max(\min),$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq (\geq, =) b_j, j = 1, 2, 3, \dots, m,$$

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Последняя строчка в выражении есть запись условия неотрицательности всех переменных вектора X , т.е. в ЗЛП считается, что все переменные x должны быть больше или равны 0.

Приведем простой пример задачи линейного программирования (пример имеет иллюстративное, а не практическое значение, поэтому не стоит ис-

пользовать его в том же виде для практической оптимизации деятельности авиапредприятий).

Пример 1. Авиакомпаниям требуется организовать регулярные перевозки пассажиров между двумя городами. В распоряжении авиакомпании имеется два типа ВС, известны следующие характеристики: c_1, c_2 – пассажировместимость первого и второго типов; a_{11}, a_{12} – средние затраты топлива одного и второго типа ВС за полет между двумя городами; b_1 – топливные ресурсы в авиакомпании; b_2 – количество имеющихся ВС первого типа; b_3 – количество имеющихся ВС второго типа. Задача оптимизации состоит в следующем. Необходимо так выбрать количество ВС по типам при планировании рейсов, чтобы количество перевезенных пассажиров было максимальным, при имеющихся запасах топлива и количестве ВС по типам. Для формальной записи задачи введем переменные: x_1 – количество ВС первого типа, x_2 – количество ВС второго типа. Тогда задача запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} c_1x_1 + c_2x_2 &\rightarrow \max, \\ a_{11}x_1 + a_{12}x_2 &\leq b_1, \\ x_1 \leq b_2, \quad x_2 &\leq b_3, \\ x_1, x_2 &\geq 0. \end{aligned}$$

5.3. Виды записи задач линейного программирования

Чтобы в множестве ограничений было единообразие при решении различных задач линейного программирования, их целесообразно привести к одному из двух видов – стандартному, когда все ограничения записаны в виде неравенств с одним знаком, скажем, со знаком « \leq »; каноническому, когда все ограничения есть равенства. Приведение к каноническому виду используется, в частности, при решении ЗЛП симплекс-методом.

Преобразование одного вида записи в другой, т.е. приведение к одному виду записи всех ограничений, может быть выполнено следующим образом.

1. Стандартный к каноническому - путем введения дополнительных переменных: например, если в ЗЛП с неравенствами типа $a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 \leq b_j$ добавить переменную x_4 с коэффициентом $a_{j4} = 1$ (или « -1 » в случае « \geq »), то можно записать $a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 + a_{j4}x_4 = b_j$.

2. Канонический к стандартному – путем введения вместо одного равенства двух неравенств: вместо $a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 + a_{j4}x_4 = b_j$ можно записать

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 + a_{j4}x_4 \leq b_j,$$

$$a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + a_{j3}x_3 + a_{j4}x_4 \geq b_j.$$

Кроме упомянутых видов записи и их взаимных преобразований можно преобразовать задачу поиска минимума в задачу поиска максимума (или наоборот) путем изменения знаков при коэффициенте c_i , в выражении целевой функции.

5.4. Графическая интерпретация задач линейного программирования

Особенности задач линейного программирования, на которых основаны методы решения ЗЛП, можно проиллюстрировать с помощью графической интерпретации. Это можно сделать, когда вектор X содержит две переменные. Рассмотрим графическую интерпретацию ЗЛП на следующем примере (сравните с примером 1).

Пример 2. Дана следующая задача линейного программирования:

$$3x_1 + 2x_2 \rightarrow \max,$$

$$2x_1 + 4x_2 \leq 16,$$

$$x_1 \leq 6,$$

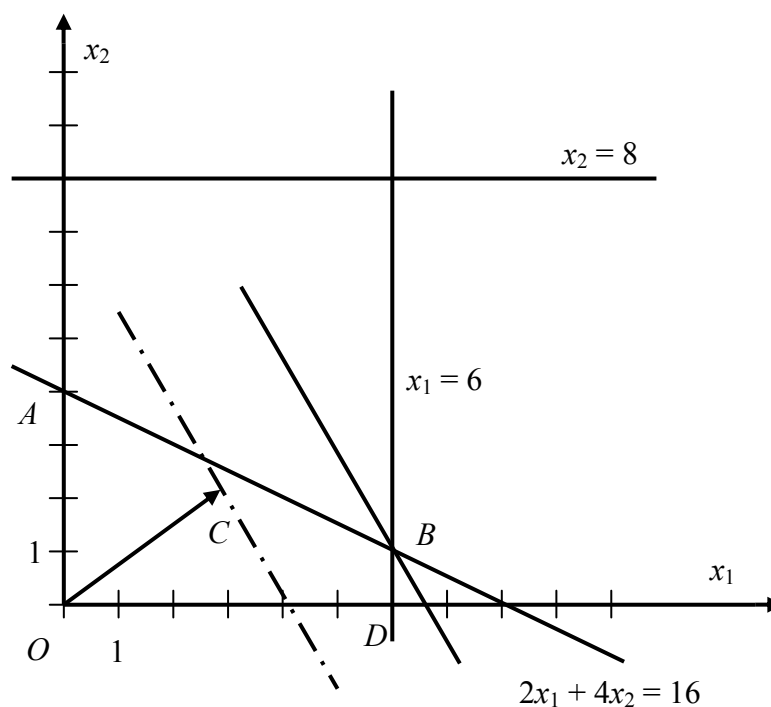
$$x_2 \leq 8,$$

$$x_1, x_2 \geq 0.$$

Шаг 1. Для графической интерпретации задачи построим систему координат x_1Ox_2 (рис. 7). Любая точка в этой системе задается своими координатами на осях Ox_1 и Ox_2 – (x_1, x_2) , т. е. так же, как и вектор X . Таким образом, решением задачи будет некоторая точка в пространстве x_1Ox_2 .

Если учитывать требование неотрицательности переменных и не учитывать другие ограничения ЗЛП, то решением задачи может быть любая точка из той части плоскости, которая расположена выше и левее осей Ox_1 и Ox_2 . Определим в этой части плоскости область допустимых решений нашей задачи (говорят также область допустимых значений переменных вектора X). Для этого нарисуем прямые, заданные уравнениями $2x_1 + 4x_2 = 16$, $x_1 = 6$, $x_2 = 8$.

Относительно ограничения $x_1 \leq 6$ допустимыми будут те решения (точки), которые лежат левее прямой $x_1 = 6$ или на ней. Относительно ограничения $x_2 \leq 8$ – те решения, которые лежат ниже прямой $x_2 = 8$ или на ней. Относительно ограничения $2x_1 + 4x_2 \leq 16$ допустимыми будут те решения, которые лежат левее или на прямой $2x_1 + 4x_2 = 16$. Область допустимых решений задачи есть та область в x_1Ox_2 , точки которой удовлетворяют всем этим ограни-



чениям, включая требования неотрицательности. Такой областью на рис. 7 является область $OABD$, которая есть пересечение перечисленных областей, и решением заданной ЗЛП является точка этой области. Решим эту задачу графическим методом, т.е. по рисунку.

Рис. 7. Графическая интерпретация задач линейного программирования

Для этого после определения области допустимых решений (первый шаг алгоритма решения ЗЛП графическим методом) задачи необходимо выполнить следующие шаги.

Шаг 2. Построить вектор OC с координатами (c_1, c_2) . Здесь c_1, c_2 – коэффициенты при переменных в выражении целевой функции. В нашем примере это вектор $OC = (3, 2)$, который изображен на рис. 7.

Шаг 3. Провести линию, перпендикулярную вектору OC . Это есть линия уровня целевой функции (на рис. 7 она показана штрих-пунктиром).

Шаг 4. Для поиска оптимального решения перемещать линию уровня по направлению вектора OC при поиске максимума или против направления вектора OC – при поиске минимума. Линию перемещаем до тех пор, пока она не достигнет последней точки области допустимых решений. Эта точка и будет оптимальным решением задачи (на рис. 7 оптимальное решение – точка B).

Замечание. Линию уровня нужно перемещать изнутри области допустимых решений к ее краю. В нашем примере это замечание неактуально, однако в других задачах может получиться так, что, рисуя перпендикуляр вектору OC в конце вектора, мы получим линию вне области допустимых решений, в этом случае ее надо переместить внутрь области, а потом уже осуществлять поиск оптимума.

Шаг 5. Определить координаты оптимального решения. Это делается или по рисунку, или решая систему уравнений тех прямых, на пересечении которых лежит точка оптимального решения. В нашем примере это была бы система уравнений

$$\begin{aligned}2x_1 + 4x_2 &= 16, \\ x_1 &= 6.\end{aligned}$$

Для заданной задачи решением будет точка B с координатами $(6; 1)$. Иначе говоря, решением задачи являются значения переменных $x_1 = 6$, $x_2 = 1$. Подставляя эти значения в выражение для целевой функции, можем определить оптимальное значение критерия, в нашем случае $I - f(X^{\text{opt}}) = 27$. Если бы в примере 2 необходимо было найти минимум целевой функции, то решением была точка $(0; 0)$. Анализируя результаты решений, предлагается сравнить задачу с задачей в примере 1.

На основе анализа примера 2 можно сформулировать следующие особенности ЗЛП:

– область допустимых решений задачи линейного программирования ограничена прямыми линиями, т.е. является многогранником;

– решение ЗЛП, если оно единственно, лежит в одной из вершин многогранника (точка B в примере 2). Если решений множество, то они лежат на грани многогранника (это могло бы получиться, если бы в примере 2 вектор OC оказался перпендикулярным прямой $2x_1 + 4x_2 = 16$, тогда было бы бесконечное множество решений – точек на отрезке AB);

– в ЗЛП может и не существовать решений, если область допустимых решений не замкнута. Так, если в примере 2 убрать ограничения $2x_1 + 4x_2 \leq 16$ и $x_2 \leq 8$, и убрать соответствующие прямые на рис. 7, то двигать линию уровня можно было бы до бесконечности, т. е. решение бы отсутствовало.

На этих особенностях основан наиболее известный метод решения ЗЛП – симплекс-метод. Сущность его сводится к следующему: по определенным правилам при решении задачи ищутся так называемые базисные решения (симплексы). Эти базисные решения совпадают с вершинами многогранника области допустимых решений (на рис. 7 это точки O, A, B, D). В процессе поиска базисных решений оценивается их оптимальность по правилам, позволяющим определить, можно ли улучшить значение целевой функции, если выбрать какое-то другое базисное решение. Если можно – выбирается новое базисное решение (новая вершина многогранника) и проверка повторяется. Так делается до тех пор, пока найденное базисное решение не окажется оптимальным.

5.5. Двойственность задач линейного программирования

Двойственность ЗЛП сводится к тому, что вместо поиска максимума можно искать минимум двойственной задачи с другими переменными, и наоборот. В итоге это может дать один и тот же эффект. Например, если необходимо в течение рабочего дня получить дополнительное время на решение выполнения некоторого задания, то можно или максимизировать скорость выполнения других заданий при сохранении ограничения на время отдыха, или, наоборот, минимизировать время отдыха при сохранении ограничения на скорость выполнения других заданий.

Преобразование прямой задачи в двойственную производится следующим путем: вместо n переменных прямой задачи в двойственной задаче вводятся m новых переменных (z) по количеству ограничений в прямой задаче; в выражение целевой функции с новыми переменными вместо коэффициентов c_i записываются коэффициенты b_j , которые в прямой задаче есть значения ограничений; вместо поиска максимума в прямой задаче осуществляется поиск минимума в двойственной задаче; вместо m ограничений прямой задачи вводятся n ограничений двойственной задачи. Результаты этих преобразований представлены ниже.

Прямая задача:

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max,$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq b_j, j = 1, 2, 3, \dots, m,$$

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Двойственная задача:

$$\sum_{j=1}^m b_j z_j \rightarrow \min,$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} z_j \geq c_i, i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$z_j \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, m.$$

С математической точки зрения переход к двойственной задаче позволяет в ряде случаев упростить решение, применить более эффективные методы, невозможные для прямой задачи.

5.6. Транспортная задача линейного программирования

К специальному типу ЗЛП относится транспортная задача, а также схожая с ней задача о назначениях. Рассмотрим транспортную задачу программирования.

Пример 3. Пусть имеется некоторый район аэродрома с n коридорами подхода. На момент решения задачи в первом коридоре подхода находится a_1 прилетающих на данный аэродром ВС, во втором – a_2 , в третьем – a_3 и т. д. Предположим, что по некоторым причинам, например, по метеоусловиям, аэродром закрывается, возникает задача распределения ВС, находящихся в данном районе, на запасные аэродромы (для обобщения задачи можем предположить, что в число n входят не только коридоры, но и зоны ожидания, а также зона взлета и посадки (ЗВП), соответственно, некоторые a_i будут означать количество ВС в зоне ожидания или в ЗВП). Положим, что всего запасных аэродромов для данного m , причем первый может принять b_1 ВС, второй – b_2 , третий – b_3 и т. д. Затраты на полет ВС из первого коридора на первый запасной аэродром, выраженные, например, в дальности полета, обозначим c_{11} ; в более общем случае будем говорить о затратах на полет одного ВС из i -го коридора в j -й аэродром и обозначать c_{ij} . Введем переменную x_{ij} – количество ВС, направленных из i -го коридора на j -й запасной аэродром. Тогда затраты

на полет из i -го коридора на j -й запасной аэродром x_{ij} ВС будут выражены произведением $c_{ij} x_{ij}$, а суммарные затраты для распределения всех ВС, находящихся в данном районе, на запасные аэродромы в виде суммы $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}$.

Для случая, когда, например, $n = 3$ и $m = 2$, это выражение будет выглядеть так: $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} = c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + c_{21}x_{21} + c_{22}x_{22} + c_{31}x_{31} + c_{32}x_{32}$.

Задача состоит в том, чтобы так распределить ВС по запасным аэродромам, чтобы суммарные затраты были минимальны и выполнялись следующие требования (ограничения): во-первых, все ВС из всех коридоров были распределены по запасным аэродромам; во-вторых, все ВС были приняты на этих запасных аэродромах. Первое ограничение запишется так: $\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i$ для всех $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Второе ограничение запишется следующим образом: $\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j$ для всех $j = 1, 2, 3, \dots, m$.

Теперь можем записать поставленную задачу в виде транспортной задачи линейного программирования:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \\ & \sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i, i = 1, 2, 3, \dots, n, \\ & \sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j, j = 1, 2, 3, \dots, m, \\ & x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m. \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что в каком-то ином случае речь может идти о поиске максимума, это определяется смыслом переменных и коэффициентов задачи. Если в записи транспортной задачи раскрыть знаки суммы, то получим по сути такую же ЗЛП, как и ранее. Для решения транспортной задачи используются свои собственные методы.

Задача о назначениях по форме похожа на транспортную и запишется следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Интерпретация такой задачи может быть следующая. Имеется n работников и n пунктов – рабочих мест. Известно, что в силу различия квалификации персонала вероятность ошибочных действий работников на разных местах различна, введем коэффициент c_{ij} , отражающий некоторым образом вероятность ошибочных действий i -го работника на j -м рабочем месте. Требуется так назначить работников смены на рабочие места, чтобы суммарная вероятность была минимальна. Для формализации задачи вводится переменная x_{ij} , которая может принимать два значения: $x_{ij} = 1$ – если i -й работник назначен на j -е место; $x_{ij} = 0$ – в противном случае. Ограничения имеют следующий смысл: первое ограничение: каждый i -й работник должен быть назначен на одно рабочее место; второе: на каждое j -е место должен быть назначен один работник.

Другим примером использования задачи о назначениях является задача планирования очередности захода на посадку.

5.7. Задача нелинейного программирования

Частным случаем задачи математического программирования является задача нелинейного программирования (ЗНЛП). Особенностью ЗНЛП является то, что любая из функций $f(X)$, $g_j(X)$ или все они могут быть нелинейны, т.е. или целевая функция, или функции ограничений не представимы в виде суммы. Для примера запишем следующую задачу нелинейного программирования с нелинейной целевой функцией и линейными ограничениями:

$$(4 - x_1)^2 + 3x_2 \rightarrow \max,$$

$$2x_1 + 4x_2 \leq 16,$$

$$2x_1 - 3x_2 = 6,$$

$$x_2 \leq 7.$$

В отличие от ЗЛП область допустимых решений ЗНЛП необязательно ограничена прямыми линиями (многогранник), а решение необязательно лежит в вершине или на грани многогранника. В силу этих особенностей методы, которые используются при решении ЗЛП, здесь непригодны. С другой стороны, для решения задач оптимизации с нелинейными целевыми функциями существует ряд методов безусловной оптимизации (градиентные методы, поисковые методы и другие), которые, однако, не предназначены для поиска решений в таких областях допустимых решений сложной конфигурации, которые могут быть в ЗНЛП.

Так как и методы линейной оптимизации, и методы безусловной оптимизации достаточно развиты, идея их применения к решению ЗНЛП является весьма привлекательной. Для ее воплощения используются два подхода. Первый основывается на возможности линеаризации некоторых видов ЗНЛП (т.е. сведение ЗНЛП к линейной задаче или последовательности линейных задач) и применении методов линейного программирования или их модификаций к решению преобразованной задачи (метод Франка-Вулфа, метод кусочно-линейной аппроксимации). Вторым подходом основан на таком преобразовании целевой функции ЗНЛП, когда она становится задачей без ограничений, и после этого следует применение методов безусловной оптимизации (методы штрафных функций, метод Лагранжа и др.)

5.8. Особенности задачи целочисленного, параметрического, стохастического программирования

Особенности задач выражены в их названиях:

- задача целочисленного программирования есть ЗЛП, в которой переменные могут принимать только целые значения, для ее решения используются специальные модификации методов линейного программирования;
- задача параметрического программирования есть ЗЛП, в которой коэффициенты c_i , a_{ij} , b_j не являются постоянными, а зависят от некоторого параметра;
- в задаче стохастического программирования переменные задачи являются случайными величинами, зависящими от различных факторов.

5.9. Оптимизация динамических процессов.

Динамическое программирование

При оптимизации динамических процессов необходимо определить оптимальную траекторию движения управляемого объекта из первоначального состояния в желаемое и последовательность управляющих воздействий, которая позволяет реализовать эту оптимальную траекторию.

В динамическом программировании как и ранее при оптимизации статических процессов состояние объекта описывается вектором X . При этом состояние объекта на первом шаге управления описывается вектором X^0 ; на втором шаге (т.е. состояние после первого шага управления) вектором X^1 , значения координат которого отличны от значений координат вектора X^0 ; на k -м шаге – X^k ; конечное состояние, в которое попадает управляемый объект после m -го шага управления – вектором X^m .

Считается, что на каждом шаге управления имеется доступное множество управляющих воздействий U_k , из которого выбирается то управление u_k , которое будет переводить объект в последующее состояние. Этот k -й шаг управления записывается так:

$$X^{k-1} \xrightarrow{u_k \in U_k} X^k.$$

Выбирая различные управляющие воздействия на том или ином шаге управления, в итоге можно получить различные траектории движения объекта из состояния X^0 в состояние X^m . Это значит, что каждой возможной траектории соответствует своя последовательность управляющих воздействий, которая называется также стратегией управления:

$$U = (u^1, u^2, u^3, \dots, u^k, \dots, u^m).$$

Задача состоит в том, чтобы найти такую стратегию управления, которая была бы оптимальной, т.е. соответствовала оптимальной траектории движения объекта (в зависимости от смысла задачи можно говорить о первичности стратегии управления и траектории, которая ей соответствует). Оптимальная стратегия управления обозначается U^* оптимальная траектория – X^* .

Для количественной оценки оптимальности вводится функция затрат на управление, которая может быть на каждом шаге разная, значение ее зависит от выбранного в данном состоянии управления: $f^k(X^{k-1}, u_k)$.

Функция затрат показывает, какие затраты на управление на k -м шаге потребуются, если для перевода объекта из состояния X^{k-1} в состояние X^* применить управляющее воздействие u_k . Задача оптимизации заключается в том, чтобы минимизировать суммарные затраты на управление за все шаги:

$$\sum_{k=i}^m f^k(X^{k-1}, u_k) \rightarrow \min.$$

При ограничениях на возможности выбора управляющих воздействий $u_k \in U_k$ (можно отметить, что в конкретной задаче могут присутствовать и другие ограничения).

Трудность оптимизации заключается в том, что выбирая в одном состоянии управление, трудно оценивать его оптимальность с точки зрения суммарных затрат на последующих шагах. Иными словами, выбор на k -м шаге управления, которое наименьшее по затратам именно на этом шаге, в итоге может привести в такие состояния на последующих шагах, которые потребуют значительных затрат для вывода объекта в желаемое состояние; наоборот, менее предпочтительное управление на данном шаге может оказаться выгодным в том смысле, что приведет в такие состояния, которые на следующих шагах потребуют минимальных затрат. Чтобы преодолеть эти трудности, метод динамического программирования основывается на использовании так называемого принципа оптимальности (принцип Беллмана). Одна из его формулировок следующая: каково бы ни было состояние объекта на некотором, k -м шаге управления, управляющее воздействие на этом шаге нужно выбирать так, чтобы затраты на этом шаге плюс затраты на всех последующих шагах были наименьшие по сравнению со всеми другими возможными управляющими воздействиями.

Принцип, конечно же, хорош, однако остается вопрос, как практически его реализовать (прогнозирование оптимальности действий при управлении состояниями объектов (особенно сложных объектов) остается проблематичным, т. к. требует прогнозирования возможных траекторий развития объекта (путей развития ситуации), сравнения их между собой и прогнозирования возможных затрат на управление. Жизненные реалии же таковы, что выбор, который делает человек на данном этапе и который кажется во всех отношениях оптимальным сегодня, оказывается отнюдь не таковым по прошествии лет).

В методе динамического программирования проблема разрешается таким образом: поиск оптимальной стратегии управления осуществляется с конечного, желаемого состояния объекта. Находясь в конечном состоянии X^m , определяют возможные предыдущие состояния X^{m-1} , из которых можно было объект перевести в состояние, конечное за один шаг управления при имеющемся множестве возможных управляющих воздействий U^m . Точнее, речь идет о вариантах состояния объекта на предыдущем шаге, которые обозначим X_1^{m-1} – первый вариант, X_2^{m-1} – второй, X_j^{m-1} – j -й вариант состояния на m -шаге управления и т.д. Для каждого варианта из условия минимума

$$F^m(X_j^{m-1}, u_m) \rightarrow \min$$

находится то управляющее воздействие, которое требует наименьших затрат при переходе в желаемое состояние X^m . Это управляющее воздействие назовем условно-оптимальным и обозначим $u^0(X_j^{m-1})$ – управление, которое позволяет перевести объект из состояния X_j^{m-1} в конечное состояние при минимуме затрат. Те наименьшие затраты, которые все же появятся при переводе объекта из X_j^{m-1} в X^m обозначим $F(X_j^{m-1})$ – условные затраты для данного варианта состояния на $m - 1$ шаге.

Далее все повторяется, только теперь определение предыдущего состояния осуществляется не из конечного X^m , а из состояний X_j^{m-1} , т.е. определяются те варианты состояний X_j^{m-2} , из которых можно перейти в X_j^{m-1} . Перебирая все возможные управления, для каждого из X_j^{m-2} находят величину условных затрат по формуле

$$F(X_j^{m-2}) = \min [f^{m-1}(X_j^{m-2}, u_{m-1}) + F(X_j^{m-1})].$$

Эта сумма говорит о том, что здесь уже находятся наименьшие возможные затраты, которые будут при переводе объекта из текущего состояния X_j^{m-2} через состояние X_j^{m-1} в желаемое X^m . Затратам $F(X_j^{m-2})$, т.е. тем суммарным затратам, которые наименьшие, соответствует условно-оптимальное управляющее воздействие, переводящее объект из X_j^{m-2} в X_j^{m-1} . Его обозначим как и ранее $u^0(X_j^{m-2})$. Внимательный читатель уже может обнаружить определенную закономерность и спрогнозировать, что же и как делается далее. Далее выполняются аналогичные действия, т.е. продолжается движение от конца к началу, вплоть до перехода к начальному состоянию X^0 . При движении из состояния X^1 уже никаких вариантов не предполагается, т.к. начальное состоя-

ние X^0 считается известным и заранее определено. Общая формула этого движения, которая называется рекуррентной формулой динамического программирования и по которой осуществляется определение условных затрат на каждом шаге и выбор условно-оптимального управления, запишется так

$$F(X_j^{k-1}) = \min [f^k(X_j^{k-1}, u_k) + F(X_j^k)],$$

$$u_k \in U_k,$$

где нижняя запись означает, что выбор минимального значения на каждом шаге осуществляется путем перебора управляющих воздействий из множества доступных на данном шаге U_k .

Таким образом, в результате описанного процесса получены следующие результаты:

- для каждого шага управления спрогнозированы возможные варианты состояний, из которых в итоге можно прийти в конечное;
- для каждого варианта состояний на всех шагах определены условно-оптимальные управляющие воздействия, которые позволяют из этого состояния прийти в конечное с наименьшими затратами.

Далее остается только, двигаясь в обратном направлении, от начала к концу, применить найденные условно-оптимальные управления. Это делается так: сначала из состояния X^0 применяется условно-оптимальное управление $u^0(X^0)$, которое сразу же записывается в оптимальную стратегию U^* , т.е.

$u_1^* = u^0(X^0)$. Потом смотрим, куда же объект попал под действием этого управления. А попал он, по-видимому, в один из вариантов состояний первого шага управления, например, X_2^1 , который становится состоянием оптимальной траектории, т.е. $X^{*1} = X_2^1$. Из предыдущего этапа известно уже условно-оптимальное управление для этого состояния. Значит берем его и применяем к данному объекту, а применяя, записываем в оптимальную стратегию управления, т.е. $u_2^* = u^0(X_2^1)$. Аналогичным образом находим u_3^* , u_4^* и т.д. вплоть до u_m^* . Итак, оптимальная стратегия управления и оптимальная траектория найдены.

Подводя итог вышесказанному, отметим, что алгоритм динамического программирования состоит из двух этапов. На первом этапе, двигаясь от конечного состояния, для всех вариантов предшествующих состояний находят-

ся условно-оптимальные управления, которые переводят объект в конечное состояние с наименьшими затратами. На втором этапе, двигаясь от начального состояния, применяют найденное условно-оптимальное управление, которое переводит объект из начального состояния в последующее; в этом последующем состоянии применяют найденное для него условно-оптимальное управление, которое переводит объект дальше и т.д. до конечного состояния (все эти состояния и их условно-оптимальные управления уже известны из первого этапа). Таким образом, среди всего множества состояний, найденных на первом этапе, находят оптимальную траекторию и среди множества всех условно-оптимальных управлений - оптимальную стратегию управления.

5.10. Оптимизация и принятие решений в условиях многокритериальности и неопределенности

До сих пор, говоря об оптимизации, мы предполагали, что имеется один критерий оптимизации. В реальных задачах оптимизации процессов УВД чаще требуется учесть сразу несколько критериев, т.е. найти решение, которое было бы лучшим с разных точек зрения. Например, при совершенствовании функционирования авиатранспортной системы часто говорят, что нужно сразу улучшить безопасность, экономичность, регулярность полетов. Сложность заключается в том, что реально эти критерии достаточно противоречивы, т.е. улучшая решение по одному критерию, приходится поступаться другим. Так, если попытаться составить и решить задачу оптимизации воздушных потоков в зональном центре ЕС ОрВД по критерию только безопасности полетов, можно получить решение, смысл которого может быть выражен следующим образом: оптимальным с точки зрения безопасности полетов будет поток воздушного движения, интенсивность которого равна нулю. Конечно, заказчик оптимизации вправе решать, руководствоваться ему этим результатом или нет, мы же предполагаем, что нулевая интенсивность в данном случае не является тем, что ожидалось при планировании воздушного движения (здесь как раз и проявляется значимость семантического анализа результатов оптимизации).

Выводом данного примера должно стать следующее: при составлении задачи оптимизации в модели необходимо, по возможности, учитывать те критерии, которые наиболее полно позволяют реализовать все цели заказчика оптимизации. Запишем общую формулировку задачи оптимизации с M -критериями:

$$\begin{aligned} H(I_1, I_2, I_3, \dots, I_r, \dots, I_M) &\rightarrow \max (\min), \\ g_j(X) &\leq (\geq, =) b_j, j = 1, 2, 3, \dots, m, \\ I_r = f_r(X_r) &\leq (\geq, =) B_r, r = 1, 2, 3, \dots, M. \end{aligned}$$

Эту задачу целесообразно сравнить с задачей математического программирования с одним критерием. Здесь H есть целевая функция задачи оптимизации, аргументы которой уже не параметры, а критерии, и каждый из них сам есть функция от X , т.е. $I_r = f_r(X_r)$. Видно также, что в задаче могут присутствовать уже известные нам функции-ограничения $g_j(X)$. Кроме этого, появляются новые ограничения, которые называются критериальными $I_r = f_r(X_r) \leq (\geq, =) B_r$. Эти ограничения могут быть нестрогими, выражать лишь пожелания заказчика (например, ограничением может быть желаемый уровень экономичности маршрута ВС). Если же в процессе оптимизации оказывается, что эти ограничения так сужают область возможных решений, что реально приемлемых там не остается, то они могут быть ослаблены.

Целевая функция H по сути есть функция, указывающая, каким образом получить компромиссное решение, которое бы удовлетворяло сразу всем критериям. Наличие такой функции позволяет из частных критериев получить составной, обобщенный критерий, отражающий глобальные интересы (цели) оптимизации. На практике в задаче не всегда можно формализовать все ее элементы, т.е. не всегда удастся (или нецелесообразно) определить компоненты вектора X и выявить математические зависимости критериев от них, не всегда удастся определить вид функции H , устанавливающей компромисс между частными критериями. Иначе говоря, возможны различные уровни формализации задачи, в зависимости от чего условно можно выделить следующие виды задач оптимизации с многими критериями.

1. Задача оптимизации, в которой известна функция H , позволяющая свести задачу с несколькими критериями к задаче оптимизации с одним критерием; область допустимых решений может быть задана в виде математиче-

ских выражений. Эта задача может быть решена уже рассмотренными методами или их модификациями как задача однокритериальной оптимизации.

2. Задача оптимизации, в которой неизвестна функция H , т.е. известны лишь требования об оптимизации частных критериев и неизвестны отношения между критериями, область допустимых решений может быть задана как в виде аналитических зависимостей, так и в виде описания, возможно неформального, некоторых условий допустимости решений. Это задача векторной оптимизации. Она решается с привлечением человека – лица, принимающего решение (ЛПР), и в процессе решения используются методы, позволяющие человеку с учетом его собственного опыта и предпочтений сначала определить среди допустимых подмножество эффективных решений, а потом – выбрать то решение, которое, по его мнению, является наилучшим (при наличии объективной информации о взаимосвязях элементов задачи определение подмножества эффективных решений может осуществляться без привлечения ЛПР методами прикладной математики).

3. Задача принятия решений, в которой, как правило, неизвестны математические зависимости, область допустимых решений задается явным образом – перечислением вариантов выбора (альтернатив). Эти альтернативы определяются и характеризуются экспертами. Считается, что критерии, позволяющие оценить полезность альтернатив, являются субъективными и устанавливаются ЛПР. Выбор лучшей альтернативы является также субъективным, т.е. осуществляется ЛПР на основе собственных предпочтений и целей. Сами задачи принятия решения подразделяются по многим признакам, в частности, это могут быть задачи принятия решений в уникальных или уже в известных ситуациях, задачи принятия организационных или оперативных решений, задачи принятия решений в условиях определенности и в условиях неопределенности и т.п. Методы теории принятия решений предназначены для того, чтобы помочь ЛПР осуществить обоснованный выбор наилучшего решения.

Рассмотрим некоторые способы устранения многокритериальности. Важность этого вопроса обусловлена тем, что такие способы в той или иной мере используются во всех трех видах задач, в первом – для сведения задачи оптимизации с многими критериями к задаче оптимизации по одному критерию; во втором и третьем – для осуществления окончательного выбора. Кро-

ме того, практически при принятии решений, особенно при планировании и организации УВД, варианты оцениваются по нескольким частным критериям, а реальное оценивание их полезности с точки зрения глобальных интересов оптимизации производится с использованием различных способов устранения многокритериальности, т.е. способов агрегирования оценок по частным критериям. (Здесь целесообразно отметить, что рассматриваемые способы есть пример использования принципа агрегирования – одного из основных принципов при исследовании и оптимизации процессов УВД. Среди способов разрешения проблемы многокритериальности можно отметить следующие:

1. Перевод всех критериев кроме одного в ранг ограничений. Этот способ часто используется в задачах, которые в силу своей формализуемости, целесообразно свести к задаче с одним критерием. При этом выбирается один из критериев, для которого добиваются наилучшего значения, а на значения других накладываются ограничения или строгие, или рекомендуемые (например, повышение экономичности траекторий движения ВС при строгом ограничении уровня безопасности).

2. Упорядочение критериев по важности и последовательная оптимизация. Этот способ также используется для решения задач вида 1 и определения множества эффективных решений в задачах векторной оптимизации. Сначала проводится оптимизация по наиболее важному критерию. Найденное значение становится ограничением. Потом проводится оптимизация по следующему критерию и т.д. В итоге остается задача оптимизации по одному критерию с областью допустимых решений, включающей в себя решения, оптимальные (точнее - рациональные) по предыдущим критериям.

3. Введение составного критерия. Этот способ в основном используется при выборе альтернатив из множества решений в задачах векторной оптимизации и принятия решений. Например, используются следующие составные критерии:

– **критерий аддитивный**

$$I^* = \max \left[\sum_{r=1}^m a_r I_r \right],$$

где a_r – коэффициент важности r -го критерия.

Значение a_r принимается от 0 до 1, сумма всех коэффициентов равна 1. Этот критерий используется как при решении задач с помощью многокритериального симплекс-метода, так и при выборе из множества альтернатив в других задачах.

Значение составного критерия вычисляется выражением, записанным в квадратных скобках. Запись «тах» означает, что в результате введения составного критерия выбирается та альтернатива, для которой значение составного критерия наибольшее по сравнению с другими;

– **составной критерий Вальда**

$$I^* = \max [\min I_r]$$

выбирается та альтернатива, для которой наихудшая оценка по частным критериям I_r больше, чем наихудшие оценки по частным критериям у других альтернатив;

– **составной критерий наилучшей оценки**

$$I^* = \max [\min I_r]$$

выбирается та альтернатива, для которой наилучшая оценка по частным критериям I_r самая большая среди других альтернатив;

– **составной критерий Гурвица**

$$I^* = \max [\min aI_r + \max (1 - a)I_r]$$

этот критерий нечто среднее между предыдущими двумя, т.к. здесь $a \in [0; 1]$ и если $a = 1$, то критерий обращается в критерий Вальда, если $a = 0$ – в критерий наилучшего.

Могут быть использованы и другие составные критерии.

4. Постулирование некоторых принципов оптимальности решения, например, принцип равномерности достижения качества по всем критериям, справедливости уступок по всем критериям.

5. Выбор главного критерия, после чего оценки альтернатив по остальным критериям при выборе не учитываются.

Необходимо отметить, что в задачах принятия решений выбор любого из этих способов будет скорее всего субъективным, поскольку изначально информация для поиска компромисса между критериями отсутствует. Все необходимые для применения способов данные (о коэффициентах значимости

критериев, упорядоченности по важности и т.п.) приобретаются при субъективном же анализе проблемы экспертами.

В задачах же принятия решений в уникальных ситуациях вообще невозможно определенно сказать как о полезности альтернатив, так и о возможных последствиях выбора. Эффективность решений в подобных условиях, эффективность оперативных решений определяются прежде всего грамотностью, опытом, знанием закономерностей развития процессов того человека, который эти решения принимает – ЛПР.

5.11. Оптимизация процессов управления воздушным движением в условиях неопределенности

Общий термин «неопределенность» подразумевает отсутствие полной достоверной информации о чем-либо. При оптимизации процессов УВД необходимо сказать о неопределенности информации, об условиях реализации и возможных последствиях принимаемого решения. Неопределенность возникает, например, по причине того, что не все факторы учитываются при оптимизации и принятии решений. Так, при долгосрочном планировании полетов в модель оптимизации плана трудно включить формализованные сведения о метеоусловиях и возможных отказах оборудования в процессе реализации разработанного плана, тем более что эти сведения вообще могут отсутствовать; при принятии решения о разведении ВС в потенциально-конфликтной ситуации не всегда можно с уверенностью прогнозировать, что это решение будет исполнено в точности и своевременно. В силу влияния факторов, которые не учитывались при составлении модели задачи оптимизации или при оценке альтернатив в задаче принятия решений эффективность результата на практике может быть значительно ниже, чем ожидалось.

В системе УВД принятие решений в условиях неопределенности основывается на принципе гарантийного результата. В соответствии с этим принципом принимаются те решения, эффективность которых гарантирована в любых, возможно даже наихудших ожидаемых условиях. Здесь уместно провести сравнение с упомянутым ранее критерием Вальда: если в качестве I_r рассматривать оценку альтернативы в тех или иных r -х условиях реализации, то

выбор по критерию Вальда даст альтернативу, которая в самых худших условиях будет более эффективна по сравнению с другими альтернативами.

В соответствии с принципом гарантийного результата, например, при пересечении встречного эшелона, устанавливаются нормы продольного и бокового эшелонирования (принятие организационного решения), производится задержка ВС на смежном эшелоне до разведения ВС по расстоянию (принятие оперативного решения); при расчете безопасных высот они округляются всегда в большую сторону до десятков или сотен метров (организационное решение) и т.д.

Для обоснования принимаемых в условиях неопределенности решений могут использоваться методы активно развиваемой теории игр.

6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

6.1. Необходимость автоматизации процесса управления воздушным движением

Цель автоматизации процесса УВД – увеличение общей эффективности ИВП, заключающейся в повышении безопасности полетов, пропускной способности зон управления, качества взаимодействия со смежными системами, а также в снижении экономических затрат на воздушные перевозки.

Системы ОВД работают на пределе своих возможностей в зонах с высокой интенсивностью воздушного движения, когда диспетчер УВД вынужден осуществлять управление большим числом ВС, выполняющих полет на больших скоростях. Диспетчер должен получать информацию обо всех ВС, которую он должен воспринять и обработать. Он также должен вести связь, выполнять навигационные расчеты, прогнозировать обстановку и решать задачи, которые ограничивают его возможности по выполнению основной функции – принятию тактических решений. Для решения этой проблемы неоднократно подчеркивалась необходимость сокращения размеров секторов управления, выделяемых каждому диспетчеру. Однако это вызывало постоянный рост числа секторов управления и соответственно числа диспетчеров, что, в свою очередь, приводило к повышению ча-

стоты передачи управления полетом и появлению дополнительных мероприятий по координации. Поэтому дальнейшее дробление секторов управления не дает больших преимуществ по увеличению пропускной способности зон управления. Таким образом, применение только экстенсивных форм УВД не обеспечивает выполнения требований по увеличению пропускной способности и обеспечению безопасности полетов.

Применение комплексной автоматизации процесса УВД позволяет более качественно решать эти важные для УВД проблемы. Необходимость внедрения автоматизации в УВД должна определяться, главным образом, исходя из существующих и предполагаемых эксплуатационных потребностей. При этом всегда следует иметь в виду основную цель – обеспечение безопасности и пропускной способности в условиях постоянно возрастающего объема воздушного движения. Автоматизация процесса УВД может быть оправданной в тех случаях, когда любые конкретные функции УВД или процессы становятся слишком громоздкими по объему и затрачиваемому времени для эффективного их выполнения человеком (оператором). Становится очевидным, что существенное увеличение интенсивности воздушного движения не может быть достигнуто без автоматизации процесса УВД при обеспечении необходимого уровня безопасности и экономичности полетов.

Решение об автоматизации процесса УВД не должно базироваться только на возможности предполагаемого сокращения расходов. Так как «ручные» средства управления позволяют решать задачи УВД только путем непрерывного увеличения персонала и оборудования, то очевидно, что хотя пропускная способность системы до определенного момента может быть достигнута совершенствованием существующих методов управления движением, в результате наступит момент, когда не может быть дальнейшего повышения эффективности без автоматизации процесса УВД, и поэтому рациональнее затратить средства на их автоматизацию. Целесообразно отметить особенности внедрения автоматизации процесса УВД.

Необходимость автоматизации процесса УВД должна исходить из требований прогнозируемого воздушного движения; на первых этапах внедрения автоматизации средства, выделяемые на нее, могут превысить средства на

улучшение существующей системы ОВД с «ручным» управлением, но в конечном итоге это приведет к более эффективному использованию воздушного пространства (увеличению числа обслуживаемых ВС, сокращению задержек и т. п.) и обеспечит в дальнейшем сокращение эксплуатационных расходов при росте объема воздушного движения и пропускной способности системы ОВД; эффективность системы ОВД будет увеличиваться при росте интенсивности воздушного движения.

Для ответа на вопрос, какие функциональные задачи УВД в первую очередь необходимо автоматизировать, мы должны рассмотреть затраты времени диспетчера на выполнение различных операций и действий (табл. 2, 3).

Таблица 2

Обобщенные данные о затратах времени диспетчера

Интенсивность воздушного движения, ВС/ч	Затраты времени, мин				Время, потребное для обслуживания ВС, мин	Превышение потребного времени над располагаемым, мин	Резерв времени, мин
	на получение информации	на анализ воздушной обстановки и выработку решений	на фиксацию информации (команд)	на передачу команд			
52	28,9	29	4,6	17,1	79,6	19,6	–
43	25,33	24	4,3	15,8	69,43	9,43	–
31	18,75	18	2,9	12,1	51,75	–	8,25

Таблица 3

Данные о долях времени в процентах

Интенсивность воздушного движения, ВС/ч	Процессы УВД			
	Получение информации	Фиксация времени	Передача команд	Анализ воздушной обстановки и выработка решений
52	36	5,7	23	36,5
43	36,5	6,3	23	35
31	36,5	5,6	23,4	34,8

Анализ данных таблиц показывает, что на одноименные процессы УВД приходится одна и та же доля общего потребного времени на УВД. Так, на получение информации приходится в среднем около 36 %, на фиксацию ин-

формации – 6 %, на передачу команд – 23 % и потребное время на анализ воздушной обстановки и выработку решений составляет 35 %. При существующих технических средствах УВД затраты на такие процессы, как получение информации и ее отображение, а также передачу команд не могут быть сокращены, поэтому с ростом интенсивности неизбежно, сокращение доли времени, выделяемого на анализ воздушной обстановки и выработку решений. Так, если при интенсивности в час 31-го ВС диспетчер еще располагает незначительным запасом времени в 8 мин, то при интенсивности в час 43-х ВС у него не хватает на анализ и выработку решений более 9 мин, а при интенсивности в час 52-х ВС не хватает около 20 мин. В случаях, когда диспетчер не располагает потребным временем на анализ и выработку решений, УВД осуществляется с нарушением технологии, при этом возникают задержки, скопление ВС в зонах ожидания и т.п. Очевидно, что предоставить диспетчеру необходимое время на все операции можно путем автоматизации процессов УВД. В первую очередь автоматизации должны подлежать процессы получения и отображения информации, что объясняется следующим.

Процессы являются исходными, так как на них базируются последующие процессы – анализ воздушной обстановки и выработка решений; в общем балансе времени эти процессы занимают значительное время, поэтому в результате их автоматизации получается существенный эффект; с ростом интенсивности движения доля времени, затрачиваемого диспетчером на получение информации и ее фиксацию, возрастает, а доля времени, остающегося на анализ воздушной обстановки и выработку решений, сокращается. Сохранение такой тенденции снижает эффективность УВД и действует в ущерб безопасности, так как при недостатке времени, остающегося на анализ и выработку решений, неизбежны ошибки в выполнении операции диспетчером. Таким образом, в первую очередь должны быть автоматизированы процессы сбора информации о воздушной обстановке, её обработки, группирования и отображения, а затем процессы УВД (анализ воздушной обстановки и выработка решений). Что касается очередности автоматизации УВД по зонам, то нужно исходить из следующего. Автоматизация должна осуществляться в наиболее сложных зонах УВД, где наибольшая плотность ВС в пространстве и наиболее часто изменяются параметры движения. Таким пространством являются зоны подхода и предпосадочного маневрирования. Зона трассовых полетов имеет меньшую

плотность ВС, а параметры движения в ней стабильны (полет на эшелоне с почти неизменной скоростью и с редким изменением направления движения). Исходя из изложенного, в первую очередь автоматизации подлежит процесс УВД в зонах подхода и предпосадочного маневрирования.

6.2. Преимущества автоматизации процесса управления воздушным движением

Внедрение автоматизации процесса УВД позволяет получить ряд преимуществ:

- повышение производительности системы ОВД и снижение нагрузки на диспетчерский персонал;
- сокращение количества задержек за счет внедрения средств обработки планов полетов и радиолокационных данных о выполнении полета и их индикации на пульте диспетчера в сроки, необходимые для решения конкретных задач УВД;
- увеличение времени на анализ воздушной обстановки;
- повышение безопасности полетов вследствие сокращения числа ошибок и предоставления в распоряжение диспетчера более точной информации о воздушной обстановке;
- уменьшение числа передач управления в связи с возможностью выделения больших районов воздушного пространства каждому диспетчеру;
- возможность быстрого и точного определения расчетной линии пути и лучшее использование воздушного пространства;
- обеспечение постоянного контроля работы системы и автоматическое предупреждение о любых отклонениях.

Проектирование автоматизированных систем УВД основывается на принципах разделения функциональных задач между аппаратными средствами и математическим обеспечением, с одной стороны, и человеком – с другой. И хотя принятие решения всегда будет оставаться прерогативой человека, существует возможность повышения его производительности путем частичной автоматизации задач анализа (оценки) планируемого и текущего движения ВС, при этом можно втрое увеличить производительность труда человека. Диспет-

чер в системах второго уровня автоматизации получает от ЭВМ либо бесконфликтные планы, либо оценку бесконфликтности по предложенным им планам. Более высокий уровень решения этой задачи – расчет на ЭВМ и отображение стандартных бесконфликтных планов для совокупности ВС. Снижение загрузки диспетчера на этом уровне автоматизации достигается также автоматическим контролем соответствия местоположения ВС их планам полетов. В случае отклонения ВС от временного графика плана полета автоматически осуществляется коррекция времени. При боковых отклонениях ВС от трассы полета и (или) отклонении по высоте срабатывает сигнализация, привлекающая внимание диспетчера. Автоматический анализ текущей воздушной обстановки для предсказания возможных конфликтов – еще одна задача, решаемая ЭВМ системы для стандартных ситуаций по заранее заложенным критериям.

Таким образом, за диспетчером в системах второго уровня автоматизации остаются задачи общей оценки воздушной обстановки и принятие решений по стандартным ситуациям (планы полета и текущая воздушная обстановка). Следовательно, на этом уровне автоматизации область использования человека в АС УВД еще более сужается, что приводит к уменьшению дефицита времени диспетчера и в целом позволяет работать системе с большей точностью и меньшей инерционностью, т. е. с более высокой эффективностью. Следует отметить, что и в этом режиме работы на втором уровне автоматизации диспетчер остается главным звеном системы. ЭВМ и связанное с ней оборудование лишь помогает диспетчеру, предоставляя ему большее время для обдумывания ситуации и принятия решений.

В настоящее время автоматизация получила широкое развитие, что позволяет решать многие проблемы по ОВД.

Проблемы, связанные с управлением потоками, возникают в случае концентрации движения в районах аэродромов и на трассах в определенные периоды времени; при этом превышаются возможности обслуживания и пропускная способность системы УВД. Факторами, влияющими на создание неожиданной концентрации движения, являются неблагоприятные метеоявления, несовершенная структура трасс, где в точках схождения потоков мала пропускная способность, запреты по различным причинам. Специальные меры по управлению потоком предназначены для ликвидации или уменьшения

скопления ВС и перераспределения потоков движения. Если функциональные задачи процессов оперативного УВД для трассовых и аэродромных центров можно считать тактическими, то управление потоком – задача стратегическая. Для ее решения необходимо иметь данные о пропускной способности аэродромных и трассовых систем, метеоусловиях, реальной загрузке воздушного пространства с учетом прогноза движения и т. д. Автоматизация при централизованном управлении потоками движения должна облегчить проблему принятия решения для минимизации задержек ВС и перераспределения движения. С внедрением автоматизированных систем планирования и управления обнаружились или стали более существенными проблемы, связанные с ограничениями в работе технических средств, появились новые требования к методам и процедурам планирования и управления воздушным движением. Помимо усовершенствований существующих и создаваемых традиционных средств и систем УВД, в последние годы наметились пути создания принципиально новой аппаратуры, не имеющей недостатков, присущих существующим средствам, определились новые технические направления. Прежде всего, это касается создания спутниковой системы управления воздушным движением (CNS / ATM).

Основное отличие усовершенствованной системы вторичной радиолокации от существующей заключается в том, что каждый запрос новой системы адресуется определенному ВС. Поэтому система называется дискретно-адресной. Одновременно с созданием этой системы разрабатывается цифровая линия связи «земля–борт–земля». С помощью системы дискретно-адресного запроса предполагается осуществлять обмен большими объемами информации между центрами управления и ВС. Система позволяет передать на борт планы полётов поправки к ним (разовые сообщения), метеоданные, диспетчерские разрешения. От ВС можно получить данные о местоположении, навигационные параметры движения ит.д. Программа создания такой системы предусматривает, что в переходном периоде будет работать как существующая, так и усовершенствованная система. Система позволяет исключить наложение сигналов от ВС, имеющих близкие значения наклонной дальности и азимута, ложные ответы по запросам боковых лепестков диа-

граммы запросчика, перегрузку ответчиков из-за отсутствия в радиолокационных системах (РЛС) подавления по запросу и т. д.

Искусственные спутники Земли предполагается использовать в системе ОВД в первую очередь для обеспечения связи «земля– борт–земля». Расчеты показывают, что применение спутников для решения задач управления позволяет получить высокоточные данные о координатах ВС и их отображение с необходимым темпом обновления. Спутниковая система в будущем может решать функциональные задачи системы вторичной радиолокации с дискретно-адресным запросом, системы предупреждения столкновений, цифровой системы передачи данных и т. д. Структурно она может включать в себя космический комплекс (несколько спутников с необходимым оборудованием), наземные комплексы со средствами запроса и сбора информации, бортовой комплекс, обменивающийся данными с центрами управления через спутники.

Эффективное решение проблемы повышения пропускной способности системы ОВД при одновременном сохранении (увеличении) уровня безопасности полетов в будущем будет достигаться путем внедрения автоматизированных систем УВД в сочетании с вводом перспективных правил и процедур УВД для планирования и управления потоками ВС. Создание будущих высокоавтоматизированных систем планирования и управления воздушным движением должно основываться на разумном компромиссе между технически возможными решениями и предполагаемыми на их реализацию расходами. При решении вопроса об установке автоматизированной системы в том или ином конкретном районе должны быть предварительно изучены технические, экономические, эксплуатационные факторы, на основе которых делается заключение о необходимости той или иной системы. Мировой опыт создания автоматизированных систем показывает, что внедрение автоматизации в планирование и УВД должно осуществляться эволюционным путем. Те системы УВД, где были автоматизированы лишь некоторые функциональные задачи и в основе сохранилась существующая технология планирования и управления, оказались наиболее жизнеспособными и были лучше всего приняты диспетчерским персоналом. Создание сложных автоматизированных систем УВД требует анализа проблем, относящихся к системе в целом, а не только к отдельным ее элементам. Дальнейшая автоматизация функциональных задач анализа и принятия решений требует проведения предварительных

детальных исследований, основанных на моделировании процессов планирования и управления, создания системных моделей. Эффективность системы ОВД, являющаяся функцией пропускной способности воздушного пространства и вероятности возникновения конфликтных ситуаций в движении, может быть определена с помощью моделирования для систем различного уровня автоматизации. Отработка структуры систем УВД, принципов их функционирования, оценка влияния различных факторов на пропускную способность воздушного пространства, переход от существующего уровня АС УВД к новому этапу – это задачи, которые решаются при проведении научно-экспериментальных исследований. Огромное внимание уделяется во всем мире решению задач ОВД, что приводит к созданию высокоавтоматизированных эффективных систем поддержки принятия решения (СППР), планирования полетов и управления воздушным движением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулич, И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах : учеб. пособие / И. Л. Акулич. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высшая школа, 1993. – 336 с.
2. Глухих, И. Н. Основы теории УВД : учеб.-метод. пособие. В 2 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УВАУ ГА, 1999. – 26 с.
3. Крыжановский, Г. А. Введение в прикладную теорию УВД : учеб. для вузов ГА / Г. А. Крыжановский. – М. : Машиностроение, 1984. – 368 с.
4. Крыжановский, Г. А. Теоретические основы УВД : учеб. пособие / Г. А. Крыжановский. – Л. : ОЛАГА, 1976. – 86 с.
5. Методы и модели анализа процессов УВД : межвузовский сборник научных трудов / под ред. Г. А. Крыжановского. – Л. : ОЛАГА, 1981. – 118 с.
6. Крыжановский, Г. А. Методы оптимизации процессов УВД / Г. А. Крыжановский, В. А. Солодухин. – М. : Транспорт, 1978. – 152 с.
7. Новиков, П. П. Принятие решений человеком в авиационных системах управления. – М. : Воздушный транспорт, 1980. – 341 с.
8. Организация УВД / В. И. Алешин, Ю. П. Дарымов, Г. А. Крыжановский и др. ; под ред. Г. А. Крыжановского. – М. : Транспорт, 1988 – 264 с.
9. Управление воздушным движением : инструктивно-методический материал : Ч. 1 / Н. И. Ильин, И. Г. Морозов, В. А. Казаков. – Ульяновск, 1990. – 98 с.
10. Управление воздушным движением / Т. Г. Адонис, С. В. Володин, В. П. Куранов, В. И. Мокшанов. – М. : Транспорт, 1988. – 229 с.
11. Управление воздушным движением : сб. / Т. Г. Адонина, П. М. Анищенко, Г. А. Крыжановский и др. ; отв. ред. П. П. Новиков. – Вып. 2. – М. : Воздушный транспорт, 1983. – 330 с.

Учебное пособие

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ
УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Составитель

**КАРНАУХОВ
ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ**

*Редактор Т. В. Горшкова
Компьютерная верстка И. А. Ерёмкина*

Подписано в печать 2011. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 4,44.

Тираж Заказ

РИО и типография УВАУ ГА(И). 432071, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8