

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский авиационный институт»

На правах рукописи



Румакина Алена Владимировна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ И ПРОЦЕССА  
ОРГАНИЗАЦИИ ГРУППОВЫХ ДЕЙСТВИЙ  
БЕСПИЛОТНОЙ И МАЛОЙ АВИАЦИИ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.

Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

Козорез Дмитрий Александрович

доктор технических наук,

доцент

Москва 2024

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Научно-технической обзор и анализ задачи обеспечения качества организации групповых действий беспилотной и пилотируемой авиации в режиме воздушного такси и общая постановка задачи .....	13
1.1 Анализ известных методов формирования маршрутов группового полета и целераспределения .....	13
1.2 Анализ методов теории массового обслуживания .....	19
1.3 Методы оценки качества обслуживания заявок летательными аппаратами .....	20
1.4 Общая постановка задачи .....	22
1.6 Выводы по Главе 1 .....	24
Глава 2. Методика оценки качества групповых действий с помощью мультипликативной формы и выбор дисциплины приоритетного обслуживания заявок при их целераспределении между ЛА.....	26
2.1 Сущность мультипликативной формы оценки качества .....	26
2.2 Назначение динамических приоритетов для заявок и их группового целераспределения между ЛА при обслуживании .....	33
2.3 Выбор дисциплины приоритетного обслуживания заявок, обеспечивающей максимальное качество .....	40
2.4 Выводы по Главе 2.....	43
Глава 3. Сравнительная оценка качества обслуживания групповых действий и метод оценки оптимального числа ЛА в одном вылете.....	45
3.1 Сравнительная оценка эффективности мультипликативной формы критерия качества групповых действий беспилотной авиации .....	45
3.2 Сравнительная оценка эффективности мультипликативной формы критерия качества групповых действий малой пилотируемой авиации.....	48

3.3 Описание программы моделирования случайного потока заявок и их группового обслуживания.....	52
3.4 Сравнительные результаты компьютерного моделирования.....	66
3.5 Выводы по Главе 3.....	75
Глава 4. Примеры оценки качества обслуживания с учетом обеспечения безопасности группового полета беспилотной и малой авиации .....	77
4.1 Особенности и оценка качества логического управления многорежимным маршрутным полетом беспилотной авиации при наблюдении наземных объектов .....	77
4.1.1 Принятые допущения при оценке качества обслуживания беспилотной авиации.....	78
4.1.2 Программа логического управления беспилотной авиации при оценке времени выполнения полетного задания и эксплуатационных затрат маршрутного полета. ....	82
4.1.3 Оценка качества обслуживания беспилотной авиацией при наблюдении наземных объектов .....	84
4.2 Оценка качества обслуживания с учетом безопасности облета препятствий.....	85
4.2.1 Алгоритм работы логической системы управления при облете препятствий .....	86
4.2.2 Моделирование предложенного алгоритма и оценка его эффективности .....	89
4.2.3 Учет безопасности маршрутного полета в общей оценке качества обслуживания малой и беспилотной авиацией при встрече с препятствиями. ....	91
4.3 Оценка качества обслуживания малой авиацией при спасении людей в экстренных ситуациях. ....	95
4.3.1 Введение .....	95
4.3.2 Принятые допущения.....	97
4.3.3 Алгоритм предполетного планирования группового маршрутного полета ЛА.....	97

4.3.4 Предлагаемый подход к решению задачи и оценке его эффективности .....	101
4.3.5 Планирование кратковременных перелётов малой авиации при эвакуации вследствие чрезвычайной ситуации. ....	103
4.3.6. Результаты дополнительного компьютерного моделирования процесса обслуживания 6 пунктов в районе наводнения.....	105
4.4 Оценка возможности применения беспилотной авиации для почтовых перевозок с высоким качеством обслуживания .....	118
4.4.1 Постановка задачи .....	118
4.4.2 Решение задачи планирования перелётов.....	120
4.5 Результаты внедрения предложенного подхода.....	126
4.6 Выводы по Главе 4.....	128
Заключение .....	130
Литература .....	132
Приложение А .....	132

## Введение

**Актуальность темы.** В настоящее время гражданская авиация осуществляет воздушные движения по заранее составленному плану – либо согласно расписанию рейсов по неизменному графику, либо в соответствии с подготовленным полетным заданием перед очередным вылетом. Вместе с тем существует множество важных практических задач маршрутного группового полета, в том числе, при применении беспилотной авиации предполетное планирование проводится для начала группового полета, а новые заявки на обслуживание поступают уже в самом полете.

Перспективным направлением для пилотируемой малой авиации является режим «воздушного такси», когда отсутствует заданный спрос между аэропортами, реализуемый по расписанию, а поступают новые заявки на перелеты в пункты, состав которых заранее неизвестен и носит случайный характер. Для пилотируемой авиации под *обслуживанием одной заявки* понимается вылет из одного назначенного пункта в другой. Огромную потребность в организации режима воздушного такси будут иметь районы нашей страны, где крайне затруднено движение наземного транспорта, а локальное несистематическое воздушное движение на незначительные расстояния крайне необходимо. К этим районам относятся обширные территории Сибири, Дальнего Востока и за полярным кругом.

Аналогичное значение представляет выше описанный режим для беспилотной авиации, а именно, предназначенной для доставки грузов и наблюдения как неподвижных, так и мобильных объектов. В ближайшем будущем такой режим будет востребован в целях перевозки грузов банковской сферой, Почтой России и нефтегазовыми компаниями (особенно в труднодоступных районах страны). Для беспилотной авиации под *обслуживанием одной заявки* подразумевается достижение каждого пункта для его наблюдения при заданной скорости и высоте полета, доставки грузов и т.п. Таким образом, организация режима группового полета при

обслуживании заявок, поступающих не столько до вылета, сколько “по вызову” в самом полете, является актуальной и перспективной задачей управления воздушным движением. В известных работах по управлению ЛА названные выше особенности не учитываются.

В представленной работе выполняется задача организации воздушного движения, сложность которой состоит в обеспечении требуемой оперативности планирования в ходе полета авиационной группировки и получении результатов выбранных перелетов, гарантирующих их безопасность при непересечении маршрутов. Принципиальной особенностью является также либо возможное отсутствие заявок при наличии свободных летательных аппаратов (ЛА), либо недостаток этих ЛА при появлении этих заявок [1,6, 21,28, 42, 56]. Оптимизация решения задачи планирования группового полета ЛА в режиме воздушного такси является целью исследований в данной работе.

***Степень разработанности темы исследования.*** Исследования задачи усовершенствования методов и средств группового управления производственными процессами в гражданской авиации освещены в работах Нечаева Е.Е., Воробьёва В.Г., Малыгина В.Б. и др. Вопросы планирования в экономике, а также в групповых действиях пилотируемой и беспилотной авиации рассмотрены в работах Абалкина Л.И., Козореза Д.А., Лебедева Г.Н., Гончаренко В.И., Парамонова Ф.И. и др. Научные работы по управлению качеством и организации производства написаны Васиным С.А., Постниковой Е.С., Маликовым А.А., Плахотниковой Е.В. и др. Вопросы обеспечения безопасности групповых полётов, как одного из главных факторов в оценке их качества, рассмотрены в работах Сельвесюка Н.И., Кананадзе С.С. и др. Анализом и тенденциями развития беспилотной авиации занимаются Желтов С.Ю., Стефанов В.А., Ивенин И.Б., Кутахов В.П., Туркин И.К. и др.

Анализ указанных и других работ показал, что в них рассматриваются либо узкая область учёта эксплуатационных затрат, либо процессы

управления обслуживанием в пилотируемой и беспилотной авиации. Разработанный в диссертации научно-методический аппарат позволяет в целом комплексно учитывать все особенности решаемой задачи. Кроме того, задача управления качеством группового взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является новой и не разработанной.

**Целью исследования** является повышение результативности групповых действий беспилотной и малой авиации за счёт организации процесса, выбора оптимального числа летательных аппаратов и дисциплин обслуживания потока заявок в различных режимах нагрузки системы.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

Выполнен научно-технический обзор и анализ задачи обеспечения качества организации групповых действий беспилотной и пилотируемой авиации в режиме воздушного такси.

Разработана система организации работы групповых действий беспилотной и малой авиации, представленная в виде процессной модели.

Разработаны алгоритмы целераспределения заявок и дисциплин их обслуживания с учётом свободных и занятых летательных аппаратов, как корректирующие и предупреждающие процессы, с целью достижения максимального качества организации групповых действий.

Выполнена сравнительная оценка качества групповых действий и оценка оптимального числа летательных аппаратов в одном вылете.

Разработана информационная система компьютерного моделирования как инструмент оценки эффективности организации групповых и индивидуальных действий малой и беспилотной авиации, а также их совместного использования в одном вылете.

Осуществлена апробация предложенных научно-технических решений на авиационных предприятиях.

**Объект исследования** – процесс организации производства и управления действиями беспилотной и малой авиации, осуществляющих деятельность по перевозке грузов, пассажиров и наблюдению наземных объектов в режиме воздушного такси.

**Области исследования.** Основные положения диссертации соответствуют паспорту специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства и охватывает следующие области исследования, предусмотренные паспортом:

– п. 1. Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства;

– п. 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов;

– п. 23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

**Предмет исследования** – методы и подходы к организации производства и управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в разработке комплекса инструментов, направленных на улучшение процесса организации производства и управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации.

Разработанный комплекс инструментов включает в себя:

1. Концепцию организации и управления групповым действием беспилотной и малой авиации, обеспечивающую улучшение результативности процесса, отличающуюся комплексным учётом параметров и методик оценки качества для каждого типа летательного аппарата с возможностью корректировки действий.



2. Методику организации производства и управления качеством процесса групповых действий малой и беспилотной авиации, отличающуюся возможностью выбора рационального количества летательных аппаратов в одном вылете, а также реализацией выбора дисциплины обслуживания в зависимости от загрузки сети.

3. Методику оценки качества процесса групповых действий беспилотной и малой авиации, отличающуюся одновременным комплексным учётом различных показателей качества, учитывающих специфику беспилотной и малой авиации.

**Теоретическая значимость** работы заключается в том, что разработана концепция и инструментарий совершенствования качества процесса организации и управления групповыми действиями малой и беспилотной авиации за счёт выбора оптимального числа летательных аппаратов и дисциплин обслуживания потока заявок.

**Практическая значимость** результатов работы заключается в разработке комплекса научно-прикладных решений, обеспечивающих повышение качества процесса организации и управления групповыми действиями малой и беспилотной авиации, включающего информационную систему компьютерного моделирования групповых действий, которая позволяет получать количественные значения для оценки качества групповых действий (времени перелётов, простоя, ожидания заявок в очереди на обслуживание, эксплуатационные затраты), реализующую концепцию и инструментарий совершенствования качества процесса организации и управления групповыми действиями малой и беспилотной авиации за счёт выбора оптимального числа летательных аппаратов и дисциплин обслуживания потока заявок.

**Реализация работы.** Результаты проведённых исследований внедрены в виде:

– методики совершенствования качества процесса общей оценки эффективности бортового оборудования летательных аппаратов гражданской авиации на примере мультипликативной формы качества обслуживания малой авиацией при перелётах в режиме воздушного такси, и реализующей её системы информационной поддержки в ПАО «Яковлев»;

– методики определения оптимального количества летательных аппаратов в одном вылете для выполнения малыми летательными аппаратами авиакомпании ОА «АК «Баргузин» полетных заданий по мониторингу местности, доставки грузов и пассажиров, помощи при экстренных ситуациях. Также опробовано методика выбора дисциплины обслуживания в зависимости от количества летательных аппаратов и новых заявок.

Результаты диссертационных исследований использовались при участии автора в 4 грантах РФФИ: 15-08-00043 «Разработка принципов построения и алгоритмов интеллектуальной системы нейросетевого и логического управления и навигации беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающей при множественных отказах и помехах безопасность одиночного и группового полёта», 18-08-00463 «Разработка алгоритмического обеспечения для систем автоматического контроля безопасности, предупреждения и предотвращения опасных полётных ситуаций беспилотной и пилотируемой авиации», 19-08-00010 «Интеллектуальная система оперативного планирования маршрутов и графиков воздушного движения гражданской авиации при изменении метеоусловий, спроса пассажиров и потере навигационной точности воздушных судов в полёте», 20-08-00652 «Интеллектуальная система оперативного планирования групповых действий малой авиации при обслуживании потока заявок по вызову в режиме воздушного такси».

*Методология и методы исследования.* При выполнении работы использовались статистические методы, диаграмма Исикавы, методы теории массового обслуживания, теории оптимального управления и

параметрической оптимизации, методы штрафных функций в теории статистических решений.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Концепция организации и управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации.
2. Методика организации производства и управления качеством процесса групповых действий малой и беспилотной авиации.
3. Методика оценки качества процесса групповых действий беспилотной и малой авиации.

***Степень достоверности результатов.*** Достоверность полученных результатов подтверждена результатами, полученными с помощью программного моделирования, содержащего математические модели движения летательных аппаратов, появления новых заявок в случайный момент времени в случайной точке на местности, актами о внедрении, содержащими положительные результаты использования предложенных методик.

***Апробация результатов.*** По теме диссертации опубликовано 24 работы, из них 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК по научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства, 5 – в изданиях, индексируемых в информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus, 1 – в Web of Science.

Основные положения диссертационной работы представлены и обсуждены на XXVIII Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта, 2019 г.), на 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2021 г.), на XI Международной юбилейной научно-технической конференции в Journal of Physics: Conference Series, 2021 год, на XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ2022) (г. Алушта,

2022 г.), в сборнике трудов XXIV Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона 2023».

***Личный вклад соискателя.*** Все представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором или при его непосредственном участии. Опубликовано 3 статьи без соавторов. В статьях [3, 4] выполнено решение задач организации групповых действий при спасении людей при наводнении, количественные расчёты, разработана методика выбора числа летательных аппаратов, в статьях [5-7] выполнено решение задачи оценки эффективности планируемых маршрутов группы летательных аппаратов, в статьях [8-12] выполнено решение задачи создания инструментария для оценки работы группы летательных аппаратов, в остальных статьях выполнены постановка задач исследования и интерпретация полученных результатов.

***Структура и объём работы.*** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения, списка литературы из 115 наименований. Содержит 46 рисунков, 57 таблиц. Общий объём диссертации составляет 148 страниц.

## **Глава 1. Научно-технический обзор и анализ задачи обеспечения качества организации групповых действий беспилотной и пилотируемой авиации в режиме воздушного такси и общая постановка задачи**

### **1.1 Анализ известных методов формирования маршрутов группового полета и целераспределения**

В настоящее время существует множество методов поиска оптимального маршрута при одиночном полете БЛА, таких как полный перебор, жадные алгоритмы, динамическое программирование, генетические алгоритмы, метод восхождения и многие другие. Рассмотрим ряд из них для того, чтобы сделать оценку возможности применения их для решения задачи, поставленной в представленной диссертационной работе.

Рассмотрим вариант полного перебора маршрутизации.

Полный перебор для получения оптимального решения является самым простым [1]. С помощью этого метода решение ищется «в лоб». В основе представленного метода лежит составление и расчет всех существующих последовательностей облета заявок. Полный перебор всегда дает наилучший с точки зрения выбранного критерия качества результат, но требует для расчета большое количество памяти, времени и ресурсов вычислительной машины. С ростом количества объектов и заявок время на выполнение расчетов экспоненциально. Если число объектов  $n$ , то количество маршрутов будет равно  $n!$

Сильные стороны этого метода таковы:

- простота реализации;
- найденное решение всегда оптимально [48].

К числу недостатков относятся:

- колоссальное время решения задачи;
- необходимость использования больших объемов памяти.

Жадный алгоритм

Существует несколько вариантов работы жадного алгоритма, но, в целом, их принцип сводится к тому, что находится оптимальное решение для каждой локальной задачи, но решение глобальной задачи может в общем случае не являться оптимальным [68]. Для задачи маршрутизации это обозначает нахождение ближайшего пункта к свободному летательному

В предложенном случае путь, который получен в итоге, не всегда будет оптимальным [48].

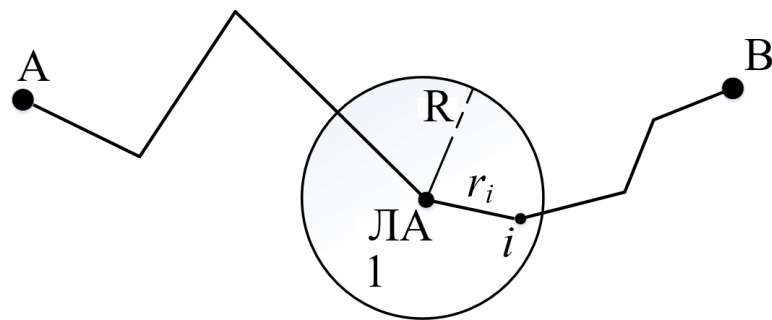


Рисунок 1.1 Пример области притяжения «жадного» алгоритма в виде круга.

В ряде случаев маршрут, который получается в результате, не всегда является оптимальным (рис. 1.2).

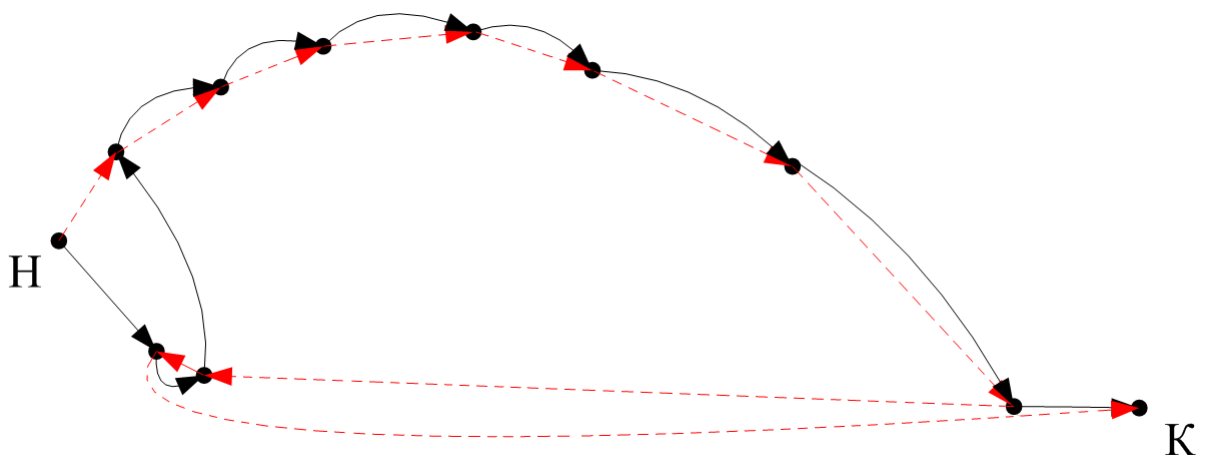


Рисунок 1.2 Сравнение оптимального пути (черные стрелки) и пути, полученного с помощью жадного алгоритма.

Как видно из рисунка, маршрут из начальной точки А в конечную точку В, полученный с помощью жадного алгоритма, отличается от оптимального.

Сильные стороны этого метода таковы:

- простота реализации;
- быстрота работы;
- известное заранее время поиска.

К числу недостатков относятся:

- неоптимальное решение глобальной задачи.

Генетические алгоритмы

Генетический алгоритм в маршрутизации – метод нахождения оптимального маршрута, который повторяет природные принципы. Работа данного метода имитирует естественный отбор и использует механизмы генетики [61-63, 74]. Этот метод использует понятия такие как хромосома, ген, мутация, отбор, скрещивание и другие. В начале алгоритма создает популяцию первых «родителей» – набор особей, характеризующихся хромосомами. Каждая хромосома представляет собой строку. В этой строке закодирована информация о маршруте полета БЛА. После создания начальной популяции (обычно она создается случайным образом) следует отобрать некоторое число особей в качестве родителей для «будущих поколений». Операция отбора двух родителей и скрещивания повторяется до тех пор, пока не наберется нужное количество особей для следующего поколения. Затем производится операция мутации, когда каждый бит особи может быть изменен на противоположный. Условием останова этих действий может быть, например, количество выполненных поколений или очень маленькая изменчивость наилучшего решения в нескольких популяциях [48].

К числу сильных сторон генетического алгоритма относятся:

- практически полная независимость от характеристик пространства поиска;
- малая зависимость от характера критерия оптимальности;





Этот метод относится к числу эвристических, но он относится к классу целочисленного программирования. В научной литературе её решение называется «задачей о коммивояжере» при следующих допущениях. Суть данного метода неявного перебора заключается в неполном переборе и отсеивании подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений. Его идея состоит в том, что множество допустимых решений разбивается на подмножества с включением в решение или без каждого из них. При этом каждое решение оценивается наименьшим возможным значением (оценка снизу) и наибольшим (оценка сверху). Поэтому последующие действия разветвляются, и выбирается то подмножество, у которого оценка в некотором смысле лучше. [58, 68, 83, 109, 113]

К числу недостатков этого метода:

- по мере спуска по дереву ветвлений растет число оценок, хранимых в памяти и затраты на их сравнение при выборе направления спуска;
- первый допустимый план не всегда является глобально оптимальным;
- всегда возможен шанс на неполный перебор вариантов.

Алгоритмы принятия решения при групповом целераспределении [21, 22, 24, 72, 102]

К этим алгоритмам относится многомерный «жадный» алгоритм [23, 100], венгерский алгоритм [47, 77, 112, 115, 116], минимаксный алгоритм [106].

В первую очередь проанализируем популярный в настоящее время подход к многомерной маршрутизации полета групп летательных аппаратов, в основе которого лежит жадный алгоритм, суть которого состоит в следующем. За первый летательный аппарат выбирается любой анализируемый объект, которому назначается пункт, ближайший по расположению. Далее с учетом первоначального выбора подбирается второй летательный аппарат, которому, аналогично первому, назначается ближайший пункт. В случае когда пункты в обоих выборах не совпадают, продолжается процесс целераспределения. Иначе возникает конфликт, и летательному

аппарату принадлежит ближайший выбранный пункт. В результате всем летательным аппаратам будут подобраны пункты, но стоит заметить, что их пути могут пересекаться, а при движении на одной высоте это приведет к снижению безопасности полета и увеличению длины маршрута.

К числу недостатков этого метода этого метода относится:

- не учёт при выборе ближайшего пункта конфигурации расположения оставшихся пунктов, подлежащих обслуживанию;
- существенное отличие получаемых результатов суммарной длины пути от оптимального значения.

**Венгерский алгоритм** обеспечивает более высокое качество распределения по сравнению с «жадным» алгоритмом. Путем нахождения минимальных элементов в каждой строке и в каждом столбце и затем – нетривиальной оценкой их значимости путем создания так называемых «дополнительных» нулей.

К числу сильных сторон венгерского алгоритма относится:

- более полный учет (при выборе очередного пункта последствий от этого выбора в будущем за счет оценки элементов минимальной длины во всей матрице) расстояний между пунктами;
- способность решать задачу при неодинаковом числе пунктов и числе ЛА.

К числу недостатков этого метода этого метода относится повышенная сложность выполняемых операций и соответственно высокая трудоемкость вычислений при расчетах для большого числа обслуживаемых пунктов.

К числу эффективных методов целераспределения относится минимаксный алгоритм.

В качестве первого действия этого алгоритма в нем используется условие предпочтения наиболее приоритетной заявки с важностью выбираемого наземного пункта, так и его удаленность от группы ЛА. Затем для первоочередной заявки назначается ближайший ЛА.

Преимущество этого варианта очевидно – минимизируется время обслуживания наиболее важных заявок. Однако имеется существенный недостаток – в числе избранных могут оказаться пункты со значительной удаленностью от группы ЛА, что в целом снижает экономичность группового полета.

Этот алгоритм является наиболее подходящим для управления групповыми действиями.

Однако, этот критерий имеет свои недостатки:

при значительной близости пункта к группе ЛА наиболее удаленные пункты будут обслуживаться в последнюю очередь.

поочередное назначение нескольких перелетов на одном шаге планирования не исключает их возможного пересечения, что снижает безопасность группового полета.

## **1.2 Анализ методов теории массового обслуживания**

Для управления перелетами ЛА при обслуживании случайного потока заявок, содержащих параметры обслуживаемых пунктов, наиболее подходящим методом оценки качества этого обслуживания является теория массового обслуживания. [15, 50, 87, 88, 111, 114] Согласно этой теории, группа летательных аппаратов представляет собой многоканальную систему обслуживания наземных пунктов как с помощью беспилотной, так и малой авиации. При этом наиболее характерными количественными оценками являются коэффициент загрузки  $\rho$  этой системы, а также вероятность  $P_0$  ее «простоя» и вероятность  $P_n$  полного отказа в обслуживании.

Применительно к решаемой задаче в теории массового обслуживания известна методика расчета вероятностных характеристик многоканальной системы массового обслуживания (СМО), которая позволяет вычислить вероятность  $P_0$  простоя СМО при заданном коэффициенте загрузки  $\rho$ , и

вероятность  $P_N$  отказа в обслуживании по формуле Эрланга, которая в случае ожидания заявок в очереди имеет вид:

$$P_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{l=0}^N \frac{\rho^l}{l!} + \sum_{S=N+1}^{\infty} P_S(N)}; k = 0, \dots, N \quad (1.1)$$

где  $P_k$  – вероятность того, что число  $N$  занятых обслуживанием ЛА равно  $k$ ,  $P_S$  – вероятность того, что в очереди, ожидающей назначения, имеется  $S$  заявок ( $S = N, \dots, \infty$ ),  $l$  – число свободных каналов,  $P_0$  – вероятность того, что на вход системы в режиме ее простоя заявок не поступило. При  $k=0$  эта формула позволяет определить  $P_0$ , а при  $k=N$  – вероятность  $P_N$  отказа в обслуживании. Эти вероятности позволяют соответственно определить штрафную функцию  $Ш_1$  пребывания малой авиации на летном поле, а также эксплуатационные затраты в полете, а  $Ш_2$  – штрафную функцию за счет задержки обслуживания в бесплотной и малой авиации с учетом  $P_0$ , что относится к оценке качества обслуживания.

### 1.3 Методы оценки качества обслуживания заявок летательными аппаратами

Помимо предыдущих методов необходимо иметь в распоряжении, критерии, оценивающие само качество обслуживания в математической форме, которое учитывает не только «доходную», но и «затратную» часть обслуживания с помощью штрафных функций, оценивающих эксплуатационные затраты и время обслуживания.

Задаче повышения качества посвящено множество работ [5, 10, 12, 13, 14, 17], среди которых основополагающими являются результаты, полученные В.В. Бойцова и Б.В. Бойцова, Кано, Исинавы, Саати и др., относящиеся к оценке качества проектирования, производства и эксплуатации различных видов техники. В частности, в области управления качеством авиационной продукции относятся работы, в которых оценивается

долговечность конструкций [9], а также значимость стандартизации технологических процессов с помощью нормативной документации [29-37, 99], что близко к идее нормирования самих оценок качества.

Последние работы, связанные с оценкой качества машиностроения в авиакосмической отрасли [11, 38, 45, 54, 78], показали, что не учет ряда важных факторов приводит к снижению качества, а это согласуется в теории принятия решений [87] с методом штрафных функций, используемым в данной работе.

Наиболее общий подход к оценке качества изложен в работе [8, 17], в которой оценки качества относятся к различным категориям учитываемых показателей (обязательную – необязательную, нравится-не нравится) статус которых количественно определяется в баллах экспертным путем. Затем один из них выбирается в качестве приоритетного, который надо улучшить. Однако общая оценка качества в целом в указанных работах не проводится.

С другой стороны, для получения основных показателей качества важное место в последнее время занимает компьютерное моделирование процессов обслуживания, также особое внимание необходимо обратить на моделирование процессов обслуживания, с помощью которого можно количественно оценить само качество обслуживания [62, 69, 103].

Предметом моделирования может быть основной процесс управления, либо его часть. Детализация и тип модели вытекает из требований проекта, в частности в данной работе – при одновременном учете эксплуатационных затрат и скорости обслуживания. При этом модель является средством анализа эффективности процесса. В свою очередь, при анализе эффективности должен осуществляться прогноз улучшения качества обслуживания при изменении условий группового полета (в данной работе при изменении интенсивности потока заявок и различий в требованиях по экономичности и скорости обслуживания для малой и беспилотной авиации).

Вместе с тем получению общей оценки качества в свертке не уделено достаточного внимания. Особый интерес эта задача вызывает в связи с появлением беспилотной авиации, когда управление качеством обслуживания актуально в случаях возникновения экстренной ситуации, обеспечение почтовых перевозок в труднодоступных районах, когда необходимо совместное использование беспилотной и пилотируемой авиации. В этих ситуациях не менее важна не только экономичность, но и скорость обслуживания появления новых заявок.

На основании проведенного анализа [93-98] можно сделать следующий вывод – ни один из рассмотренных методов не может обеспечить полностью учета всех факторов решаемой задачи. Необходимо разрабатывать новые алгоритмы и методы управления качеством обслуживания малой и беспилотной авиацией. Следовательно, тема представленной диссертационной работы является актуальной.

#### **1.4 Общая постановка задачи**

Сразу нужно подчеркнуть, что в известных публикациях группового управления авиации [41, 56, 59, 60, 77] ни один из перечисленных выше методов не учитывает занятые летательные аппараты, которые могут оказаться ближе к новой заявке и будут иметь меньшие штрафы на обслуживание, чем занятые. Также необходимо заметить, что вопрос оценки качества обслуживания случайного потока заявок, тем более в режиме воздушного такси является мало изученным. Поэтому очевидным является вывод, что необходимо новое решение при следующей постановке задачи [56]:

1. Процесс обслуживания наземных объектов с помощью группы летательных аппаратов рассмотрен при поступлении потока заявок, возникающих в самом полете. Источником заявок, являются заданные на указанной территории объекты с известным числом  $n$ , координатами их местоположения и априорными важностями  $B_j (j = 1, \dots, n)$  (рис. 1.5).

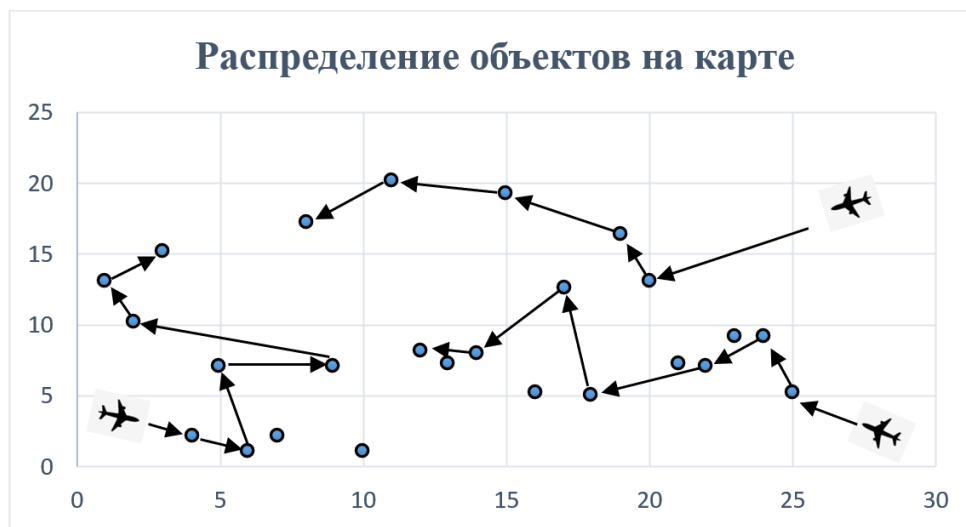


Рисунок 1.5 Распределение объектов на карте при их обслуживании несколькими ЛА.

2. Принято, что расстояние между пунктами и моменты появления заявок распределены по закону Пуассона и в частности – время  $t_j$  между возникающими заявками с известной плотностью вероятности.

$$f(t_j) = \lambda e^{-\lambda t_j} \quad (1.2)$$

где  $\lambda$  – величина обратная среднему времени между возникающими заявками, или интенсивность поступления заявок. Для пилотируемой авиации под обслуживанием одной заявки понимается вылет из одного назначенного пункта в другой. Для беспилотной авиации требуется по достижению очередного пункта обеспечить его наблюдение или доставку грузов при заданной скорости и высоте полета. Принято, что при отсутствии заявок полет продолжается в сторону конечного пункта.

3. Возможны три полетные ситуации, зависящие от случайного числа  $S$  вновь поступивших заявок, общего числа  $N$  ЛА и числа  $d$  летательных аппаратов (из общего числа ЛА), не занятых обслуживанием:

- при  $d > S$  — режим простоя в обслуживании, который характеризуется нерациональными эксплуатационными затратами;
- при  $d = S$  — штатный режим - все ЛА заняты обслуживанием;

- при  $d < S$  — пиковый режим (перегрузки в работе), при котором возникают задержки в обслуживании и увеличивается время пребывания заявок в очереди.

4. Требуется предложить эффективный подход к управлению качеством групповых действий беспилотной и малой авиации в режиме «авиатакси», сравнить его с известными подходами и выбрать оптимальное число  $N$  ЛА в одном вылете [28, 56].

### **1.6 Выводы по Главе 1**

1. Сформулирована постановка задачи управления качеством обслуживания заявок на перелеты малой и беспилотной авиации в режиме воздушного такси.

2. Установлено, что процесс диспетчеризации групповых действий ЛА должен использовать различные дисциплины обслуживания в штатном режиме, режиме простоя ЛА и пиковом режиме с учетом наименьших затрат топлива и времени ожидания заявок в очереди.

3. При выборе алгоритма диспетчеризации для повышения качества обслуживания необходимо обеспечить наименьшие эксплуатационные затраты в наихудших условиях по времени обслуживания случайного потока заявок.

4. Также ставится задача выбора оптимального числа ЛА, обеспечивающего приемлемые расходы топлива и требуемую скорость обслуживания потока заявок. Таким образом, инструментами повышения качества обслуживания являются число ЛА и варианты алгоритмов диспетчеризации групповых действий ЛА в различных режимах.

5. Предлагаемый подход решения задачи в отличие от известных состоит в том, что, во-первых, при диспетчеризации групповых действий ЛА в ранжировании и целераспределении участвуют не только свободные, но и



занятые ЛА в полете, и во-вторых – при оценке общего качества обслуживания вместо аддитивной свертки используется мультипликативная форма свертки.

## **Глава 2. Методика оценки качества групповых действий с помощью мультипликативной формы и выбор дисциплины приоритетного обслуживания заявок при их целераспределении между ЛА.**

В данной главе предложен один из вариантов мультипликативной формы критерия качества специального типа, который включает в себя как аддитивные, так и мультипликативные слагаемые. Показано, что это обеспечивает удачный компромисс в оценках в отличие от чисто аддитивной формы, и также от чисто мультипликативной в виде произведения отдельных показателей качества. Сформулированы и решены подзадачи назначения динамических приоритетов [64] для заявок, а также ЛА при их избытке. Сформирована дисциплина обслуживания заявок с помощью минимаксного алгоритма, их целераспределение при обязательном учете не только свободных, но и занятых ЛА.

### **2.1 Сущность мультипликативной формы оценки качества**

При обслуживании различных заявок на перелеты гражданской авиации, как пилотируемой, так и беспилотной одной из главных проблем является учет в общей оценке качества обслуживания множества различных факторов, возникающих в полете. Эти факторы можно разбить на две основные группы [51, 104, 105, 110]:

- благоприятные факторы, такие как экономичность, комфортность пассажиров пилотируемой авиации, низкая стоимость беспилотной авиации т.д.;

- неблагоприятные факторы, к которым относится значительное время ожидания в обслуживании, пониженная безопасность полетов, значительные расходы топлива, время простоя авиации в аэропортах – все они относятся к штрафным функциям.

В данной работе главное внимание уделено штрафным функциям, которые в свою очередь зависят от таких технических параметров как число летательных аппаратов, скорость перелетов, стоимость расхода топлива в единицу времени, отказа в обслуживании в случае повышенного спроса на перелёты и т.д.

При этом оказывается, что изменение технических параметров, например, в сторону увеличения приводит к росту одной штрафной функции, и к уменьшению другой. Например, при увеличении числа используемых ЛА растут эксплуатационные расходы, но снижается время ожидания в обслуживании заявок. Поэтому существует некий оптимум в управлении качеством. Если для общей оценки этого качества использовать подходящую свертку.

Ниже будет показано, что наиболее эффективным вариантом оценки является мультипликативная, а не аддитивная свертка для управления этим качеством. При этом каждый частный показатель максимизируемого качества есть величина  $M_k$ , обратная «своей» штрафной функции  $\Pi_k$ .

Рассмотрим специальную форму критерия в виде мультипликативной свертки при учете двух штрафных функций  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , определяющих содержание следующих двух сомножителей:

$$J_0 = \left( \frac{1}{1 + \Pi_1} + m_1 \right) \left( \frac{1}{1 + \Pi_2} + m_2 \right) = (X_1 + m_1)(X_2 + m_2) \quad (2.1)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  – нормированные параметры, обратные значениям самих штрафных функций, которые будут описаны ниже для различных случаев,  $m_1$  и  $m_2$  - масштабные коэффициенты, меняющие значимость этих параметров при условии

$$m_1 + m_2 = 1 \quad (2.2)$$

Примечание. Формула 2.1 используется при нормировании штрафов  $\Pi_k$  в каждом сомножителе свертки отношение  $\frac{\Pi_k^*}{\min \Pi_k^*}$ , где  $\Pi_k^*$  есть фактический штраф со своей физической размерностью, а  $\min \Pi_k^* > 0$  (например, это минимальное значение экономических затрат, время обслуживания, которые не равны нулю, а больше его).

Однако, в других случаях, значение  $\min \Pi_k^* = 0$  (например, несвоевременность наблюдения, опасность), и тогда возможно представление  $k$ -го сомножителя с использованием для нормирования максимального значения штрафа  $\max \Pi_k^*$ . При этом значение фактора  $X_k = 0,5(1 - \frac{\Pi_k^*}{\max \Pi_k^*})$ , или в общем виде мультипликативная свертка равна:

$$\Delta \Xi_{ij} = \prod_{h=1}^H \left[ \frac{H-1}{H} X_h(i, j) + m_h \right] \quad (2.3)$$

где  $X_h(i, j)$  – нормированное значение  $h$ -того показателя,  $m_h$  – специальные масштабные коэффициенты каждого  $h$ -того сомножителя, уменьшение которого растёт при повышении важности  $M_h$  при условии:

$$\sum_{h=1}^H M_h = 1 \quad (2.4)$$

В частности, при одинаковой значимости  $M_h = \frac{1}{H}$  максимум каждого сомножителя не превышает единицы.

Эта форма имеет следующие преимущества:

- сама эффективность нормирована (безразмерна), что удобно, а ее максимум  $J_0 = 1$ ;

- эта свертка также, как и аддитивная, способна выделить или назначить “главный фактор”, который надо учесть, но только другим специальным образом:

- уменьшение  $m_1$  — это снижение значимости всех сомножителей, кроме первого, а с другой стороны - чем меньше  $m_1$ , тем больше остальные масштабные коэффициенты -  $m_2 \dots m_k$ , и это увеличивает значимость фактора  $X_1$ ;

- вся особенность состоит в том, что осуществляется не простая оптимизация безусловного экстремума, а решается задача Лагранжа с учетом ограничения типа равенства.

- мультипликативный критерий более чувствителен к существенным недостаткам (значительным штрафным функциям разных показателей качества), чем аддитивный.

Для подтверждения этих свойств рассмотрим следующие примеры в двух вариантах при следующих допущениях. Считается, что загрузка система заявками на обслуживание, определяющая «спрос», оценивается с помощью коэффициента загрузки  $\rho > 1$ . Соответственно, «предложение» оценивается с помощью числа  $N$  летательных аппаратов, способных успешно решить задачу обслуживания, но при этом  $N > \rho$ . Во-вторых, эксплуатационные затраты для каждого БЛА из группы неизменны и постоянны, и величина этих затрат пропорциональна общему числу  $N$ .

С другой стороны, дополнительные эксплуатационные затраты  $\mathcal{E}$  в режиме частичного простоя ЛА в среднем можно оценить по формуле

$$\mathcal{E} = C_0 \sum_{k=0}^{N-1} P_k (N - k) + C_1 \sum_{k=1}^N k P_k \quad (2.5)$$

где  $C_0$  – коэффициент эксплуатационных затрат при ожидании одним ЛА новой задачи на земле;  $C_1$  – коэффициент, характеризующий повышенные затраты топлива в полете ( $C_1 > C_0$ ).

Если посадки при перелетах нет (в частности, для беспилотной авиации), то  $C_1 = C_0$  и тогда

$$\mathcal{E} = C_1 \cdot N \sum_{k=0}^N P_k(N) \quad (2.6)$$

Очевидно, что с увеличением числа  $N$  затраты  $\mathcal{E}$  и связанное с ним время «простоя» ЛА увеличиваются, т.е.  $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial N} > 0$ . Тогда первую штрафную функцию  $\mathcal{W}_1$  при оценке качества можно представить в следующем виде, осуществив соответствующее нормирование:

$$\mathcal{W}_1 = \kappa_1 \frac{N}{\rho} = x \quad (2.7)$$

Решение задачи оценки второй штрафной функции, учитывающей время  $\tau$  обслуживания очередной заявки, возможно с помощью теории массового обслуживания, согласно которой:

$$\mu = \frac{v}{r_{\text{cp}}}, \quad \rho = \frac{\lambda r_{\text{cp}}}{v} \quad (2.8)$$

$$P_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{l=0}^N \frac{\rho^l}{l!} + \sum_{s=N+1}^{\infty} P_s(N)}; \quad k = 0, \dots, N \quad (2.9)$$

Это позволяет сначала определить итоговое значение средней длины очереди  $S_{\text{cp}}$  по формуле:

$$S_{\text{cp}} = \sum_{s=N+1}^{\infty} s P_s(N) \quad (2.10)$$

а затем рассчитать среднее время  $T_{\text{cp}}$  пребывания заявок в очереди

$$T_{\text{cp}} = \frac{S_{\text{cp}}(N)}{\lambda} \quad (2.11)$$

Значение  $T_{\text{cp}}$  частично определяет вторую штрафную функцию несовершенства системы.

Также можно показать, что общее среднее время  $\tau$  обслуживания каждой заявки можно оценить по формуле

$$\tau = \frac{r_{\text{ср}}}{V} + \frac{S_{\text{ср}}}{VN} = \frac{1}{\mu} + \frac{S_{\text{ср}}}{VN} \quad (2.12)$$

Здесь первое слагаемое определяет среднее время перелета, второе – среднее время ожидания в очереди. С увеличением числа  $N$ , при обслуживании на ограниченной территории, расстояния самих перелетов и, соответственно, число находящихся в очереди заявок сокращаются. Поэтому общее среднее время  $\tau$  обслуживания и связанное с ним время  $\tau_j$  пребывания в очереди уменьшается, т.е.  $\frac{\partial \tau}{\partial N} < 0$ .

Соответственно вторая штрафная функция, оценивающая несовершенство обслуживания заявок через время  $\tau$  этого обслуживания, включая и время ожидания в очереди, в первом приближении обратно пропорциональна числу  $N$  или значению  $x$ :

$$\text{Ш}_2 = \frac{K_2}{N} = \frac{C}{x} \quad (2.13)$$

где  $c$  - коэффициент относительной значимости обслуживания по сравнению с эксплуатационными затратами, при его увеличении эта значимость растет. В работе принято, что для малой авиации эта значимость невелика, т.е.  $c < 1$ , а для беспилотной авиации с учетом малых затрат топлива эта значимость существенна, и значение  $c$  лежит в интервале  $0,5 \leq c \leq 2$ . При этом надо помнить, что согласно теории массового обслуживания обязательным является условие  $N > \rho$ , или  $x > 1$ , в противном случае формула (2.12) несправедлива.

Теперь с учетом (2.7) и (2.13) можно сформировать аддитивную свертку качества  $J_1$  и мультипликативную свертку  $J_0$  для их последующего сравнения в случае  $m_1 = m_2 = 0,5$

Рассмотрим аддитивную свертку:

$$J_1 = \left( \frac{1}{1+\text{Ш}_1} m_2 \right) + \left( \frac{1}{1+\text{Ш}_2} m_1 \right), \text{ при этом } m_1+m_2=1 \quad (2.14)$$

Сделаем первую попытку сравнить аддитивную и мультипликативную свертки в двух следующих вариантах:

Вариант 1. Коэффициенты  $c$  и  $\rho$  одинаковы, т.е. одна штрафная функция строго обратна другой.

$$\text{Ш}_1 = \frac{1}{1+\frac{N}{\rho}}; \text{Ш}_2 = \frac{1}{1+\frac{\rho}{N}}, \text{ где } \rho > 1$$

Тогда свертка  $J_1$  равна при  $m_1 = m_2 = 0.5$

$$J_1 = \frac{0,5}{1+x} + \frac{0,5}{1+\frac{1}{x}}, \text{ где } x = \frac{N}{\rho}; \text{ при этом } J_1 \rightarrow \max_x$$

Но в этом варианте  $J_1 = 0,5 \left( \frac{1}{1+x} + \frac{x}{1+x} \right) = 0,5 = \text{const}$ , то есть аддитивный критерий нечувствителен к выбору оптимума вообще.

Для сравнения рассмотрим мультипликативную свертку

$$J_0 = \left( \frac{1}{1+x} + 0,5 \right) \left( \frac{x}{1+x} + 0,5 \right), \text{ где реально } 0 < x \leq 2$$

В частности, при  $x=0$  имеем  $J_0=0,5$ . При  $\rho = 7$  и  $x=2$  имеем  $J_0 = \frac{5}{6} * \frac{7}{6} \approx \frac{35}{36} < 1$ . Однако при  $x=1$  имеем  $\max J_0=1$ , который больше, чем при  $x=0$  и  $x=2$ . Оптимум найден, т.е. для мультипликативной свертки существует единственное оптимальное решение.

Вариант 2. Коэффициент  $c \neq \rho$

$$\text{Пусть } \text{Ш}_1 = \frac{1}{1+\frac{N}{\rho}} = \frac{1}{1+x}; \text{Ш}_2 = \frac{1}{1+\frac{c}{x}}, \text{ где } c=0,5 \div 2$$

Тогда получается, что из условия экстремума  $\frac{\partial J_1}{\partial x} = 0$  для мультипликативной свертки имеется ответ  $x \approx \sqrt{c}$

$$J_1 = \left( \frac{1}{1+x} + 0,5 \right) \left( \frac{x}{x+c} + 0,5 \right),$$

при этом  $\min J_1$ , обеспечивается при  $x \approx \sqrt{c}$



Заранее отметим, что полученный результат соответствует принятому допущению, соответствующему условию – при увеличении числа ЛА эксплуатационные затраты растут, а время задержки в обслуживании заявок уменьшается, но при этом отношение  $\Pi_1 \Pi_2 \approx 1$ .

Такой подход является первым приближением, поэтому полученный вывод требует последующего уточнения в более общем случае с учетом различного характера для беспилотной и малой авиации.

## **2.2 Назначение динамических приоритетов для заявок и их группового целераспределения между ЛА при обслуживании**

Рассмотрим существующие алгоритмы организации групповых действий и их недостатки. В случае простейшего однокритериального выбора очередной заявки используется условие предпочтения наиболее приоритетной заявки, которая дольше всех ожидает в очереди, т.е. работает принцип «запрос пришел первым – первым и обслуживается». Недостаток данного метода в том, что наиболее приоритетная заявка может оказаться наиболее удаленной от группы ЛА, что в целом снизит экономичность полета.

$$\Pi_1 = \max_{j=1, \dots, n} \tau_j \quad (2.15)$$

где  $n$  – общее число заявок перед вылетом.

Также существует критерий, учитывающий не только длительность ожидания  $j$ -заявки в очереди, но и ее удаленность  $r_{ij}$  от свободного летательного аппарата.

$$\Pi_2 = \min_{j=1, \dots, n} \sum_i^N r_{ij} \quad (2.16)$$

Для объединения двух простых критериев (2.15) и (2.16) рекомендуется двухпараметрический критерий, учитывающий одновременно как время

ожидания заявки  $\tau_j$  для выбираемого наземного пункта, так и его среднюю удаленность  $R_j$  от группы БЛА

$$\Pi_3 = \max_{j=1, \dots, n} \frac{\tau_j}{R_j} \quad (2.17)$$

где  $R_j$  – средняя удаленность  $j$ -го пункта от летящей группы БЛА.

$$R_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{ij} \quad (2.18)$$

Формула (2.17) используется в случае избытка числа заявок  $n > N$  для последующего ранжирования и сокращения оставшегося числа  $n^*$  для последующего целераспределения. Недостаток этого метода состоит в том, что наиболее удаленные заявки будут долго простаивать в очереди, что негативно скажется на качестве обслуживания. Тем не менее, именно двухпараметрический критерий был взят за основу назначения динамических приоритетов.

В случае избытка свободных ЛА, когда  $d > S$ , обычно вычисляется другой динамический приоритет  $\Pi_1(i)$  для всех ЛА, как занятых, так и свободных:

$$\Delta \Pi_1(i) = \max_{j=1, \dots, S} \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j}{r_{ij}} \quad (2.19)$$

Формулы (2.17) и (2.19) относятся к известному подходу назначения приоритетов, когда занятые ЛА не учитываются. Казалось бы, свободных ЛА и так больше, чем заявок, и поэтому занятые ЛА можно не учитывать. Однако и в этой ситуации один занятый ЛА может оказаться гораздо ближе, чем множество свободных, но удаленных ЛА. Поэтому также после ранжирования всех ЛА в списке первоочередных могут оказаться как те, так и другие, после чего остается  $S$  претендентов на участие в задаче целераспределения.

Предварительные результаты моделирования при прямом использовании формул (2.17 и 2.19) для оценки возможности занятых ЛА показали, что наряду с выгодой их использования возникает негативный эффект — время "простоя" оставшихся свободных ЛА увеличивается. Поэтому для компенсации этого эффекта в оценку ожидаемых расстояний  $R_{vj}$  для занятых ЛА вводится дополнительный порог  $\Delta(\delta)$ , чтобы оценить их предпочтение перед свободными ЛА исходя из следующего условия:

если

$$R_{vj} + \Delta(\delta) = r_{ve} + r_{ej} + \Delta_0 \delta < r_{ij}, \quad (2.20)$$

то выбирается лучшим занятый ЛА, где конкретно было взято значение  $\Delta_0 = 0,3r_{cp}$ , гарантирующее очевидное преимущество для беспилотной авиации при  $\delta = 1$ , уменьшенное при  $\delta < 1$  для малой авиации.

С учетом разницы в оценке близости занятости свободных и занятых ЛА средняя удаленность  $i$ -го ЛА от необслуженных заявок  $j=1, \dots, d$  равна:

$$R_{i\delta} = \delta r_{cp} + \frac{(1 + \delta)}{d} \sum_{j=1}^d r_{ij} \quad (2.21)$$

где  $r_{cp}$  - известное среднее расстояние между обслуживаемыми пунктами;  $\delta$  - коэффициент, равный  $\delta = 0$  для свободных ЛА,  $\delta = 0,5$  для занятого ЛА в беспилотной авиации и  $\delta = 1$  для занятого ЛА в малой авиации. В целом формула (2.18) учитывает в свертке зависимость времени обслуживания от степени занятости анализируемого  $i$ -того ЛА. (рис. 2.1)

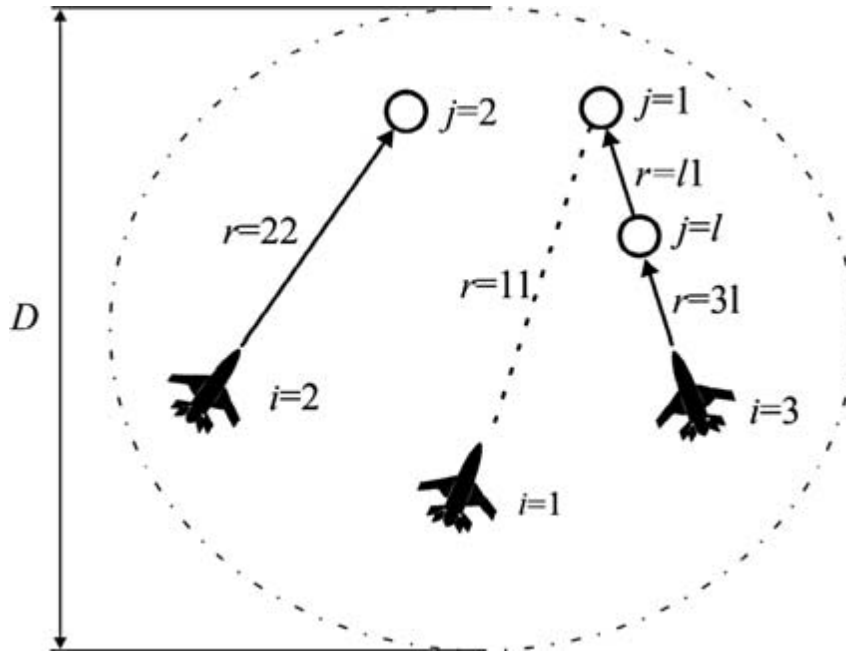


Рисунок 2.1 Схема расположения трех ЛА и трех пунктов на одном шаге планирования.

Поэтому с учетом сделанного замечания в данной работе предлагается другая группа формул. В частности, при условии, что число заявок  $S < n$ , а число свободных ЛА  $d < N$ , динамический приоритет заявок  $\Pi_{1j}$  равен

$$\Pi_{1j} = \max_{j=1, \dots, S} \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j}{R_{ij}} = \max_{j=1, \dots, S} \left[ \sum_{i=1}^d \frac{\tau_j}{r_{ij}} + \sum_{i=d+1}^N \frac{\tau_j}{r_{ij} + \Delta 0 \delta} \right] \quad (2.22)$$

Соответственно динамический приоритет для ЛА имеет вид

$$\Delta \Pi_1 = \begin{cases} \max_{j=1, \dots, d} \sum_{j=1}^S \frac{\tau_j}{r_{ij}}, \text{ для свободных ЛА} \\ \max_{j=d+1, \dots, N} \sum_{j=1}^S \frac{\tau_j}{r_{ij} + \Delta 0 \delta}, \text{ для занятых ЛА} \end{cases} \quad (2.23)$$

Главной последующей операцией в диспетчеризации обслуживания заявок является целераспределение. Как было отмечено выше, известные методы диспетчеризации обладают рядом недостатков. К ним относятся, во-первых, неодновременный учет всех частных показателей качества при обслуживании очередной заявки – времени ее ожидания в очереди, времени

обслуживания этой заявки, различную скорость обслуживания. Во-вторых, сами летательные аппараты характеризуются различной удаленностью от места возникновения заявки, временем простоя летательных аппаратов.

Рассмотрим подробнее известный минимаксный алгоритм целераспределения, использующий четыре следующие операции [25, 26, 27]. Установлено, что этот алгоритм диспетчеризации содержит следующие четыре операции.

В первой операции осуществляется выбор первоочередных необслуженных целей (число  $n$  которых соизмеримо с числом  $N$  беспилотников) по мультипликативному критерию (2.7). Первая операция позволяет проранжировать все свободные заявки по критерию:

$$\Pi_1 = \max_{j=1, \dots, N} \frac{\tau_j}{R_j} \quad (2.24)$$

Затем из проранжированного общего списка для последующих действий формируется сокращенный список  $N$  первоочередных заявок, число которых равно общему количеству ЛА.

Во второй операции из сформированного списка выбирается наиболее удаленная первоочередная заявка по другому критерию, учитывающему важность и суммарную удаленность каждого наземного объекта от группировки БЛА:

$$\Pi_2 = \max_{j=1, \dots, N} \left( \tau_j \sum_{k=1}^N r_{kj} \right) \quad (2.25)$$

Необходимость выполнения этой процедуры ранжирования вызвана последующим стремлением уменьшить, в первую очередь, время обслуживания наиболее удаленных объектов, расположенных в начале проранжированного списка.

В третьей операции после выбора наиболее удаленного пункта с максимальным рангом  $J_2$  для него решается задача назначения «своего» ближайшего ЛА по третьему критерию:

$$\Pi_3 = \min_{k=1, \dots, N} r_{kj} \quad (2.26)$$

Следовательно, вторая и третья операции являются основными. Они реализуют модифицированный минимаксный критерий назначения ближайшего БЛА для цели с максимальным временем обслуживания и минимизирующее время выполнения всего полетного задания на одном шаге оперативного планирования. Наряду с этим, как показано ниже, этот критерий попутно минимизирует суммарную длину пути группы БЛА и делает невозможным пересечение их маршрутов.

В четвертой операции для этого производится проверка условий непересекаемости маршрутов группового полета, показанных на рис. 2.2 непрерывными линиями длиной  $l_1$  и  $d_2$  для двух БЛА ( $i=1, i=2$ ).

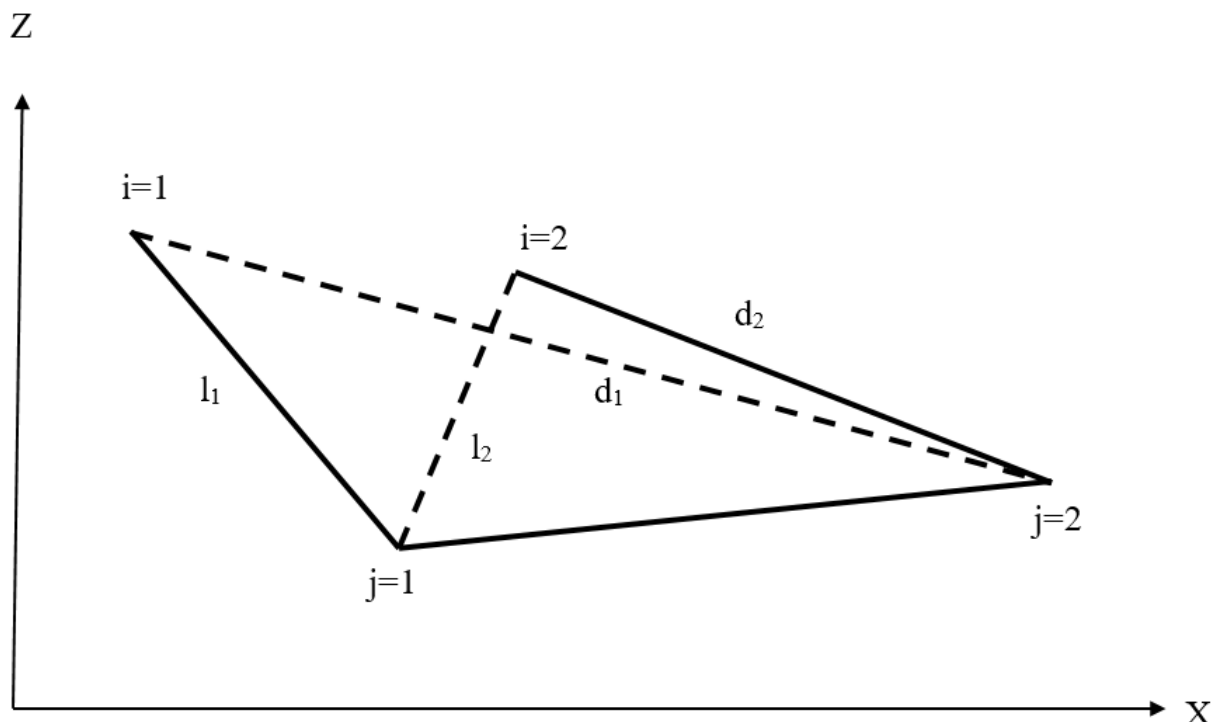


Рисунок 2.2 Схема расположения БЛА относительно обслуживаемых целей в декартовой системе координат  $(x, z)$  при  $N=2$

Пусть дано условие максимальной удаленности по критерию  $J_1$  в виде неравенства

$$d_1 + d_2 > l_1 + l_2 \quad (2.27)$$

Пусть также по критерию  $J_2$  для наиболее удаленной цели с номером  $j=2$  выбран ближайший незанятый БЛА с номером  $i=2$ , так как

$$d_2 < d_1 \quad (2.28)$$

Но для выпуклого четырехгранника условию (2.28) практически соответствует соблюдение другого неравенства

$$l_1 < l_2 \quad (2.29)$$

Тогда складывая неравенства (2.28) и (2.29) друг с другом, получим ответ

$$l_1 + d_2 < l_2 + d_1 \quad (2.30)$$

т.е. сумма двух сторон четырехгранника меньше суммы его диагоналей, что требовалось доказать – необходимое условие непересекаемости этих сторон соблюдается, и общая длина пути минимизируется. В противном случае необходимо поменять объекты наблюдения местами.

На рис. 2.2 видно, что объект с  $j=2$  наиболее удален от двух БЛА с  $i=1$  и  $i=2$ , так как  $l_1 + l_2 > d_1 + d_2$ . Это соответствует критерию  $\Pi_{2j}$  по формуле (2.11), если важности обоих объектов одинаковы, т.е.  $\tau_1 = \tau_2$ . Тогда  $r_1 = 0,5(l_1 + l_2)$ , а  $r_2 = 0,5(d_1 + d_2)$ .

Также видно, что для объекта с  $j=2$  ближайшим будет БЛА  $i=2$ , что соответствует другому критерию  $\Pi_3$  и обеспечивает удачное целераспределение – участки перелета не пересекаются и имеют минимальную длину суммарного пути.

Можно привести другой пример при  $N=3$ , показанный ниже на рис. 2.3, из которого видно, что наиболее удаленным от группы БЛА является объект с номером  $j=1$  [22].

Перечисленные операции минимаксного алгоритма обеспечивают минимум длительности полного поражения всех целей, как показано на рис.2.3.

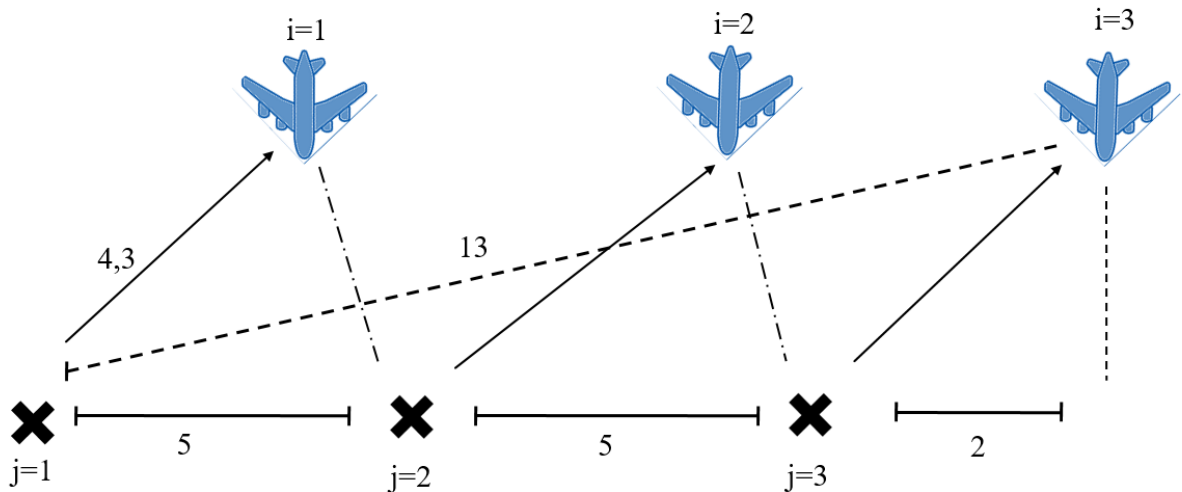


Рисунок 2.3 Пример сравнения действий «жадного» и минимаксного алгоритмов при  $N=3$ .

Из рисунка видно, что показанные пунктиром траектории полета снарядов ЗРК, полученные «жадным» алгоритмом, при своей максимальной длине пути 13 км в три раза больше, чем показанные непрерывными линиями траектории длиной пути 4,3 км, полученные «венгерским» или минимаксным алгоритмом (последний гораздо проще «венгерского»).

Вместе с тем перечисленная процедура целераспределения также пока не учитывает возможности использования занятых ЛА. Если они заняты и обладают разницей в их возможности обслуживания, то это обстоятельство меняет состав формул в назначении приоритетов.

### **2.3 Выбор дисциплины приоритетного обслуживания заявок, обеспечивающей максимальное качество**

Теперь, учитывая указанный недостаток использования только свободных ЛА, в данной работе предложен более совершенный метод диспетчеризации, который использует при целераспределении занятые ЛА, но также основан на минимаксном критерии, содержащем три операции:



первая операция позволяет проранжировать все свободные заявки по критерию, в котором среднее расстояние  $R_j$  вычисляется по-новому:

$$P1j = \max_{j=1, \dots, S} \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j}{R_{ij}} = \max_{j=1, \dots, S} \left[ \sum_{i=1}^d \frac{\tau_j}{r_{ij}} + \sum_{i=d+1}^N \frac{\tau_j}{r_{ij} + \Delta 0\delta} \right] \quad (2.31)$$

Затем из проранжированного общего списка для последующих действий формируется сокращенный список  $N$  первоочередных заявок, число которых равно общему количеству ЛА.

Во второй операции из этого списка на очередном шаге выбирается первоочередная заявка  $j^*$  по критерию, учитывающему ее важность и максимальную суммарную удаленность от группировки ЛА:

$$P_2 = \max_{j=1 \dots N} \tau_j (\sum_{i=1}^d r_{ij} + \sum_{i=d+1}^N r_{ij} + \Delta 0\delta) \quad (2.32)$$

В третьей операции после выбора наиболее удаленного пункта с максимальным рангом  $J_2$  когда по третьему критерию для него решается задача назначения «своего» ближайшего ЛА, который может оказаться как свободным, так и занятым:

$$P_3 = \min_i \begin{cases} r_{ij^*}, \text{ при } i = 1 \dots d \\ r_{ij^*} + \Delta 0\delta, \text{ при } i = d + 1 \dots N, \end{cases} \quad (2.34)$$

Преимущество этого подхода состоит в том, что его применение обеспечивает сбалансированность системы, и в отличие от аддитивной формы позволяет избежать «узких мест» (когда один из сомножителей мал либо из-за повышенных затрат в режиме простоя, либо при неоправданной продолжительности пребывания заявок в очереди в пиковом режиме). Кроме того, если исходить из концепции баланса спроса и предложения и принять равными друг другу значения  $m_1=m_2=0.5$ , то, согласно формуле (2.1), максимизируемое качество  $J_0=1$  при условии, что значения  $\Theta=\Theta_0$  и  $T=T_0$  в идеальном случае. На рис. 2.4 эта позиция соответствует окончательному

варианту алгоритма оперативного планирования групповыми действиями свободных и занятых ЛА.

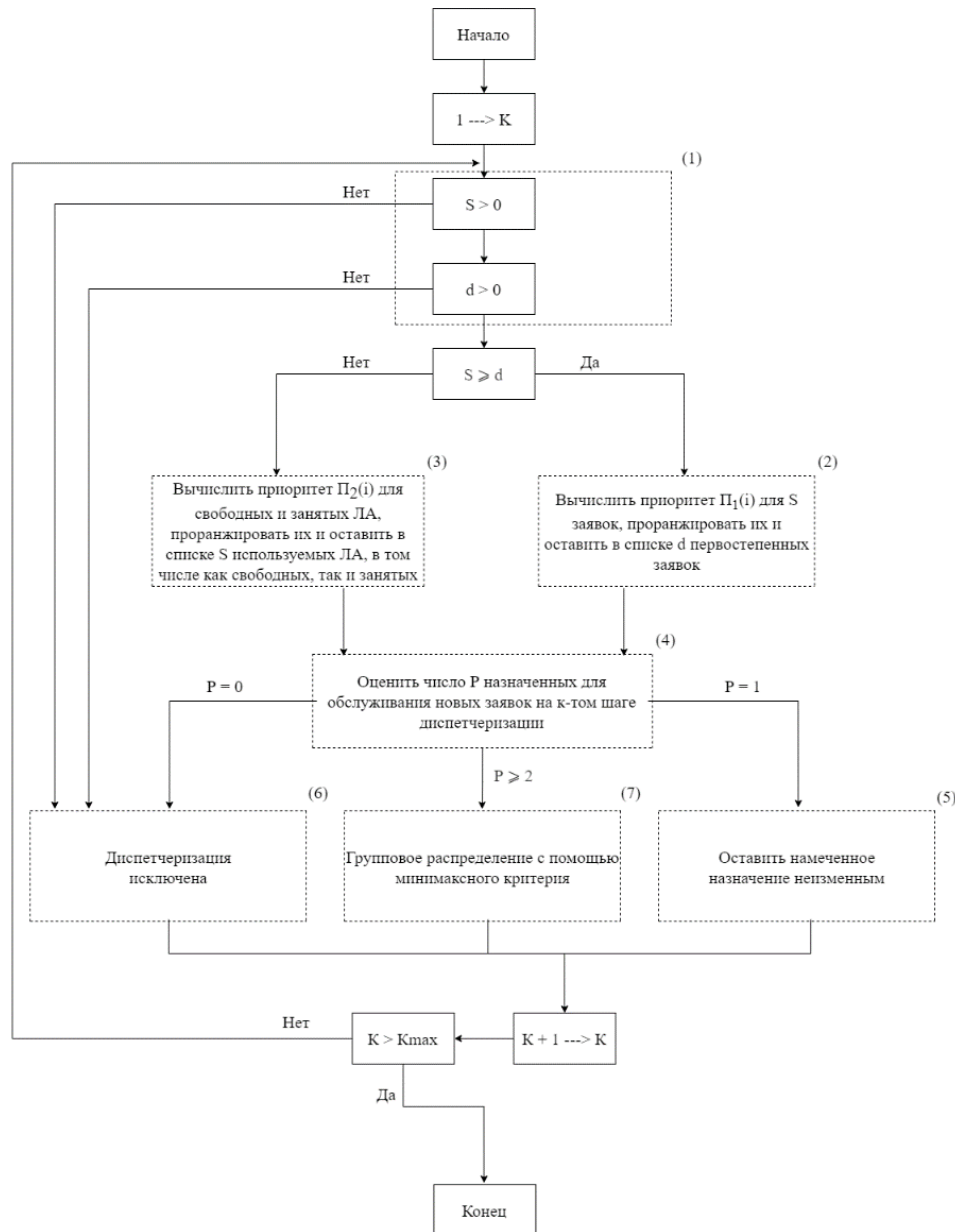


Рисунок 2.4 Блок-схема алгоритма оперативного планирования групповыми действиями свободных и занятых ЛА.

В целом, алгоритм содержит 7 блоков. Блок 1 выявляет необходимые ситуации, когда в принципе есть как заявки, так и свободные ЛА при  $S > 0$ ,  $d > 0$ . Блоки 2 и 3 вычисления динамических приоритетов заявок и используемых ЛА отличаются тем, что учитывают возможности всех ЛА, а

затем после ранжирования в списке остаются претенденты, число которых равно  $\min(S, d)$ . Действие блока 4 указывает, что необходимо различать ситуации при  $P = 1$  (когда происходит фактическое целераспределение) от случаев  $d = 1$  или  $S = 1$  (когда обнаруживается лишь факт существования единственного претендента из пары «заявка – ЛА»). В блоке 5 фиксируется уже намеченное назначение свободного ЛА для одной заявки в то время, как в блоке 6 устанавливается факт исключения действий на очередном шаге планирования. При этом лучший занятый ЛА оценивался при значении  $\Delta 0 = 0,3\text{гср}$ , гарантирующем очевидное преимущество для беспилотной авиации при  $\delta = 1$ , и уменьшенном при  $\delta < 1$  для малой авиации.

Наибольший интерес представляет блок 7 группового целераспределения при одинаковом числе участников, его действия рассмотрены ниже. Единство предложенного подхода подтверждается тем, что он включает в себя следующие частные случаи:

При  $N = 1$  первое действие осуществляется только с помощью блока 2, и при  $P = 1$ , процедура группового целераспределения отсутствует, что соответствует известной задаче о коммивояжёре при одномерной маршрутизации.

При  $N = d = S$ , когда нет занятых ЛА, решается только одна задача целераспределения, а первое действие отсутствует, что соответствует классической задаче распределения ресурсов, а в решаемой задаче в первую очередь соответствует предложенному планированию.

## 2.4 Выводы по Главе 2

При выборе алгоритма диспетчеризации для управления групповыми действиями ЛА предложен подход, основанный на ранжировании заявок согласно минимаксному критерию для обеспечения наименьших эксплуатационных затрат в наихудших по времени обслуживания условиях. При этом в процессе целераспределения учитывается не только время

появления заявки, но и удаленность соответствующего этой заявке пункта от группы ЛА.

Главное отличие использования минимаксного критерия в данной работе – учет не только свободных, но и занятых ЛА.

Оценки эксплуатационных затрат и среднего времени обслуживания заявок, включая время их ожидания в очереди, получены с помощью формул для вычисления интегральной штрафной функции и, как следствие – для нормированной оценки качества обслуживания в мультипликативной форме.

В качестве примечания следует подчеркнуть, что используемые в мультипликативной форме функции нормированы, в том числе путем деления соответствующих параметров в «своих» физических единицах на их максимальные значения.

Сравнительная оценка качества в форме мультипликативной свертки показало, что предложенный алгоритм целераспределения групповыми действиями ЛА является более предпочтительны по сравнению с существующими не менее, чем на 10÷12%.

### Глава 3. Сравнительная оценка качества обслуживания групповых действий и метод оценки оптимального числа ЛА в одном вылете

#### 3.1 Сравнительная оценка эффективности мультипликативной формы критерия качества групповых действий беспилотной авиации

Главной отличительной особенностью обслуживания потока заявок с помощью беспилотной авиации состоит в том, что с учетом относительно малых затрат топлива очередной освободившийся от работы беспилотник продолжает беспосадочный полет. Поэтому эксплуатационные затраты для каждого БЛА из группы неизменны и постоянны, и величина этих затрат пропорциональна общему числу  $N$ .

В отличие от малой пилотируемой авиации для беспилотной авиации наиболее критичной вторая штрафная функция  $\Pi_2$ , оценивающая своевременность обслуживания заявок (из-за незначительности расхода топлива, определяющего первую штрафную функцию). В свою очередь общее время обслуживания включает время ожидания заявок в очереди. Поэтому рассмотрим более детально работу системы в этих условиях, и более точно оценим зависимость времени ожидания заявок в очереди с помощью формул Эрланга и Литтла [50].

Согласно формулам Эрланга [88] для многоканальных систем с очередью можно сначала определить:

- вероятность простоя при неограниченной максимальной длине очереди:

$$P_0 = \left[ 1 + \rho + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^N}{N!} + \frac{\rho^{N+1}}{N!(N-\rho)} \right]^{-1} \quad (3.1)$$

- вероятность образования очереди:

$$P_{оч} = \frac{\rho^{N+1}}{n!(N-\rho)} P_0 \quad (3.2)$$

Это позволяет с помощью формул Литтла определить среднюю длину очереди (среднее число ЛА, находящихся на летном поле)

$$L_{\text{оч}} = \frac{N}{N - \rho} P_{\text{оч}} \quad (3.3)$$

и если необходимо, время “простоя” в очереди на земле

$$T_{\text{оч}} = \frac{L_{\text{оч}}}{\lambda} \quad (3.4)$$

Пусть в конкретном случае исходные данные для расчета таковы

$$\rho = 3; N = 5; 6; 7, \text{ то есть значения } x = 1,67; 2; 2,33$$

Тогда вероятности простоя  $P_0$  всех БЛА, вычисленная по формуле (3.1), равно  $P_0=0,047; 0,05; 0,055$

Соответственно, длина очереди  $L$  заявок при ожидании, однозначно определяющая время ожидания  $\tau=L\lambda$ , для равных значений  $x$  такова

$$x_1 = 1,67; L_1 = 7,5 P_0; x_2 = 2; L_2 = 2P_0; x_3 = 2,33; L_3 = 0,03$$

Аппроксимируя зависимость  $L$  от  $x$  простейшей дробно-рациональной функции, получим

$$\text{Ш}_2 = \frac{1}{1 + \frac{c}{x^2}}, \text{ при этом } c \cong 1 \quad (3.5)$$

Это позволяет в целом для беспилотной авиации записать значения сравниваемых аддитивной и мультипликативной сверток в виде:

$$\begin{aligned} J_1 = m_1 \Delta_1 + m_2 \Delta_2 &= \frac{m_1}{1+x} + \frac{m_2 x^2}{x^2+c}; J_0 \\ &= \left( \frac{1}{1+x} + m_2 \right) \left( \frac{x^2}{x^2+c} + m_1 \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Условиями экстремума этих сверток, определяющих оптимальные значения  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  для  $J_1$  и  $J_0$  при  $\frac{\partial J_1}{\partial x} = 0$  и  $\frac{\partial J_0}{\partial x} = 0$ , чему соответствуют следующие алгебраические уравнения:

$$\text{для } J_1 \rightarrow \hat{x}_1^3 - 2c(\hat{x}_1^2 + \hat{x}_1 + 1) = 0; \text{ для } J_0 \rightarrow \hat{x}_2^3 - \frac{2c}{3}(\hat{x}_2^2 + 2\hat{x}_2 + 3) = 0$$

Оказывается, что обнаруживается разница между значениями  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  и, соответственно, некоторый выигрыш в сокращении времени обслуживания заявок при использовании мультипликативной формы. Чтобы показать этот выигрыш, представим сравнительные результаты прямого расчета двух штрафных функций и показателей качества в виде следующей таблицы при  $c=1$ .

Таблица 3.1 Сравнительной оценки качества беспилотной авиации с

помощью двух сверток, если  $\Delta_1 = \frac{1}{1+\Pi_1}$ , а  $\Delta_2 = \frac{1}{1+\Pi_2}$

X	1	1,5	2	2,5	3	4	9
$\Delta_1$	0,5	0,4	0,33	0,28	0,25	0,2	0,1
$\Delta_2$	0,5	0,7	0,8	0,855	0,9	0,96	0,99
$J_1$ $m_1 = 0,5$	0,5	0,55	0,56	0,57	0,57	0,58	0,54
$J_0$ $m_1 = 0,5$	1	1,08	1,08	1,09	1,05	1,02	0,89
$J_1$ $m_1 = 0,3$	0,5	0,61	0,66	0,68	0,71	0,73	0,72
$J_{01}$ $m_1 = 0,3$	0,96	1,1	1,13	1,137	1,14	1,12	1,03

Из таблицы видно, выигрыш в качестве обслуживания с помощью мультипликативной формы проявляется как при одинаковых, так и разных масштабных коэффициентах, а число N летательных аппаратов сокращается в 1.3÷1.6 раза.

ПРИМЕЧАНИЕ. 1. Приведенные в мультипликативной форме штрафные функции эксплуатационных затрат и времени обслуживания – это

нормированные функции в безразмерной форме, путем деления параметров деления своих физических единиц на их минимальные значения. Так должно быть, и тогда общая оценка качества должна лежать в пределах от  $0.5 \div 1$ .

2. Приведенные в табл. 3.1 результаты сравнения оценок качества, получены в результате аналитического уточнения особенностей обслуживания малой и беспилотной авиации. Однако, и эти оценки являются не до конца объективными. Окончательный ответ может быть найден в результате компьютерного моделирования, способного определить различные показатели качества обслуживания, в том числе эксплуатационные затраты, временные характеристики при разном числе ЛА и т.д.

### **3.2 Сравнительная оценка эффективности мультипликативной формы критерия качества групповых действий малой пилотируемой авиации.**

В отличие от беспилотной в малой авиации существуют две главные особенности. Во-первых, из-за больших расходов топлива наиболее существенны эксплуатационные затраты, а качество обслуживания - на втором месте. Поэтому во второй штрафной функции  $\Pi_2$  необходимо учитывать малые значения  $0 < c < 1$ , помня, конечно, что коэффициент загрузки системы  $\rho$  должен быть меньше числа  $N$ .

Во-вторых, сами возникающие эксплуатационные затраты относятся к двум типам – для первого типа в полете они максимальны и определяются расходом топлива (как и в беспилотной авиации), но зато “свободные” ЛА осуществляют посадку в течение нежелательного времени “простоя” на летном поле. Однако, расходы пребывания на земле явно меньше, чем в полете, с коэффициентом  $\alpha < 1$ , и эти расходы относятся ко второму типу

Поэтому при увеличении числа  $N$  вначале при  $N < \rho$  все ЛА будут заняты полетом, и “простоя” никакого нет. Зато при  $N > \rho$  с увеличением  $N$  время простоя растет, а время пребывания в полете группы ЛА останется



практически неизменным. Эти соображения позволяют получить следующую оценку  $\Pi_2$  в следующем виде.

$$\Pi_2 = K_1 \frac{N}{\rho} \text{ при } N \leq \rho$$

Однако, с учетом пониженных затрат при ожидании обслуживания на летном поле штрафная функция может быть представлена в виде:

$$\Pi_2 = \frac{K_1 \rho + (N - \rho) K_1 \alpha}{\rho} = 1 + 1 - \alpha + y = 2 - \alpha + y \quad (3.7)$$

Тогда аддитивная и мультипликативная свертки  $J_1$  и  $J_0$  для малой авиации имеют следующий новый вид

$$J_1 = \frac{0,5}{2 - \alpha + y} + \frac{0,5}{1 + c/y} \quad (3.8)$$

$$J_0 = (0,5 + \Delta\Pi_1)(0,5 + \Delta\Pi_2) = (0,5 + \frac{1}{2 - \alpha + y})(0,5 + \frac{y}{c + y}), \quad (3.9)$$

где  $y = \frac{N\alpha}{\rho}$ ,  $\alpha$  - коэффициент отношения эксплуатационных затрат “простоя” на земле к затратам в полете, то есть  $\alpha < 1$ .

В свою очередь коэффициент  $\alpha$  сам по себе согласно теории массового обслуживания зависит от значений  $\rho$  и числа  $N$  летательных аппаратов.

Рассмотрим следующий пример. Пусть  $\rho=3$ ;  $N=5$ . Тогда с помощью формул (3.7-3.9) получим

$$P_0 = 0,04; L_{оч} = 0,1 = \Pi_2.$$

Применив гипотезу о том, что  $\Pi_2 = \frac{c}{N}$ , приближенно найдем параметр  $c$

$$c = \Pi_2 * n = 0,5.$$

С другой стороны, среднее число свободных ЛА, находящихся в режиме “простоя”, можно определить на основе (3.1) по формуле:

$$\Pi_1 = \sum_{i=0}^{n-1} (n - i) P_i,$$

где  $P_1 = P_0\rho, P_2 = P_0\frac{\rho^2}{2}, \dots, P_i = P_0\frac{\rho^i}{i!}$

Для данного примера оказывается, что величина  $\text{Ш}_1=1,7$ . Поэтому можно оценить другой параметр  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = \frac{\text{Ш}_1}{n - \rho} = \frac{1,7}{2} = 0,85$$

Пример расчёта указывает, что аналогично можно идентифицировать параметры  $\alpha$  и  $c$  для других числовых данных, при этом конкретные значения для малой авиации соответствует условиям:  $\alpha < 1$  и  $c < 1$ .

Теперь можно провести поочередный анализ сверток (3.7) и (3.8). Условие экстремума для  $J_1$  имеет вид

$$\frac{\partial J_1}{\partial y} = -\frac{1}{(2 - \alpha + y)^2} + \frac{c}{(y + c)^2} = 0$$

Тогда оптимальное значение  $\widehat{y}_1$  при заданных параметрах  $c < 1, \alpha < 1$  и  $\frac{N}{\rho} > 1$  равно

$$\widehat{y}_1 = \frac{(1 - \alpha)c + \sqrt{c^2(1 - \alpha)^2 + c(1 - c)(4 - 4\alpha + \alpha^2 - c)}}{1 - c} \quad (3.10)$$

Формула (3.8) имеет нетривиальный вид. Для ее упрощения и большей наглядности примем значения  $c=0,5, \alpha=0,7$ . Тогда получим  $\widehat{y}_1=1,55, N = \rho\frac{y_1}{\alpha} = 2,2\rho$ .

Рассмотрим теперь мультипликативную свертку  $J_0$ , для которой условие экстремума таково:

$$\frac{\partial J_0}{\partial y} = \frac{0,5c}{(y + c)^2} - \frac{0,5}{(2 - \alpha + y)^2} + \frac{c(2 - \alpha) - x^2}{(y + c)(2 - \alpha + y)} = 0$$

После чего оптимальное значение  $\widehat{y}_2$  для достижения максимума качества  $J_0$  становится равным:

$$\widehat{y}_2 = \frac{1}{3} \left[ (2 - \alpha - c) + \sqrt{c^2 + 8c\alpha + 4\alpha^2 + 16(1 - \alpha - c)} \right] \quad (3.11)$$

Тогда получим  $y_2 = 1,4\rho$ ,  $N=2\rho$

Формулы (3.10) и (3.11) указывает на явно нелинейный характер зависимости оценки качества двумя способами от параметров  $c$  и  $\alpha$  и, главное, на разницу в получении ответов на то, какое оптимальное значение  $\hat{y}$  должно быть выбрано. Чтобы продемонстрировать это, рассмотрим следующий пример, помня о том, что должны соблюдаться условия:  $N > \rho$ ;  $c < 1$ ;  $\alpha < 1$  (при этом ясно, что при уменьшении этих параметров оптимальное число  $N$  растёт).

Пусть даны значения  $\rho = 7$ ,  $\alpha = 0,7$ ,  $c = 0,5$ . Необходимо определить по формулам (3.10) и (3.11) значения  $\hat{y}_1$  и  $\hat{y}_2$  и сравнить их друг с другом. Тогда оказывается:

$$\hat{y}_1 = 1,45; \frac{\hat{y}_1}{\alpha} \approx 2; N_1 = \frac{\hat{y}_1}{\alpha} \rho = 2\rho = 14 > \rho$$

$$\hat{y}_2 = 0,73; \frac{\hat{y}_2}{\alpha} \approx 1,1; N_2 = \frac{\hat{y}_2}{\alpha} \rho = 1,1\rho \approx 8 > \rho$$

Сравнение теоретически полученных результатов указывает на очевидное сокращение требуемого числа летательных аппаратов малой авиации при использовании мультипликативного критерия оценки качества.

В заключение данной главы с помощью сформированной группы штрафных функций  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  в работе представлены примеры оценки самого качества  $J_1$  и  $J_0$  при осуществлении оптимизации, представленные в виде табл. 3.2.

Таблица 3.2 Результаты оценки качества групповых действий малой авиации с помощью двух критериев ( $\rho = 7$ ;  $c = 0,5$ ;  $\alpha = 0,7$ )

N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	100
J	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	10
$\Delta_1$	0,53	0,5	0,48	0,46	0,44	0,42	0,4	0,38	0,36	0,09

$\Delta_2$	0	0,58	0,61	0,64	0,66	0,68	0,7	0,72	0,75	0,99
$J_1$	0,53	0,54	0,54 5	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55 5	0,5
$J_0$	0,5	1,08	1,08 8	1,09 4	1,09	1,08 5	1,08	1,07 3	1,07 5	0,8

Результаты компьютерного моделирования подтвердили факт существенного сокращения рекомендуемого числа летательных аппаратов малой авиации при использовании мультипликативного критерия оценки качества.

### **3.3 Описание программы моделирования случайного потока заявок и их группового обслуживания**

В целях сравнения различных вариантов управления качеством разработана программа компьютерного моделирования обслуживания в режиме воздушного такси, которая позволяет [75, 76, 92, 100, 107, 108]:

- имитировать случайные появления запросов в различных местах заданной территории в разные моменты времени;
- вводить в систему различные алгоритмы диспетчеризации и число летательных аппаратов;
- определять число свободных и занятых ЛА на каждом шаге группового полета;
- количественно оценить среднее время ожидания заявок в очереди, время простоя ЛА и время перелетов как для малой, так и для беспилотной авиации.

В работе с помощью компьютерного моделирования проводилась сравнительная оценка качества [4, 7, 47, 79, 82], предложенного и известных

подходов с учетом одного фактора - дисциплины обслуживания (или целераспределения). Анализировались четыре варианта:

- предпочтение в обслуживании отдается заявке, которая раньше появилась и дольше находится в очереди;
- при целераспределении учитывается не только время появления заявки, но и удаленность этого пункта от ЛА;
- используется минимаксный критерий с учетом всех ЛА, в том числе занятых и выполняющих обслуживание.

Для сравнительного анализа компьютерное моделирование использовалось следующим образом: программа для моделирования написана на высокоуровневом языке программирования Python. Данный язык является одним из самых популярных на сегодняшний день, а также он относится к интерпретируемым языкам т.е. не требует дополнительной компиляции, что позволяет пользоваться программой на различных платформах.

В программе была смоделирована работа «диспетчера» беспилотной авиации для 5 летальных аппаратов. Для примера взяты 50 заявок на обслуживание в 25 различных пунктах. Программа подсчитывает среднее время простоя  $T$  летательных аппаратов (эксплуатационные затраты) и среднее время ожидания заявок  $\Theta$  (комфортность алгоритмов). Блок – схема компьютерного моделирования показана на рис. 3.1.

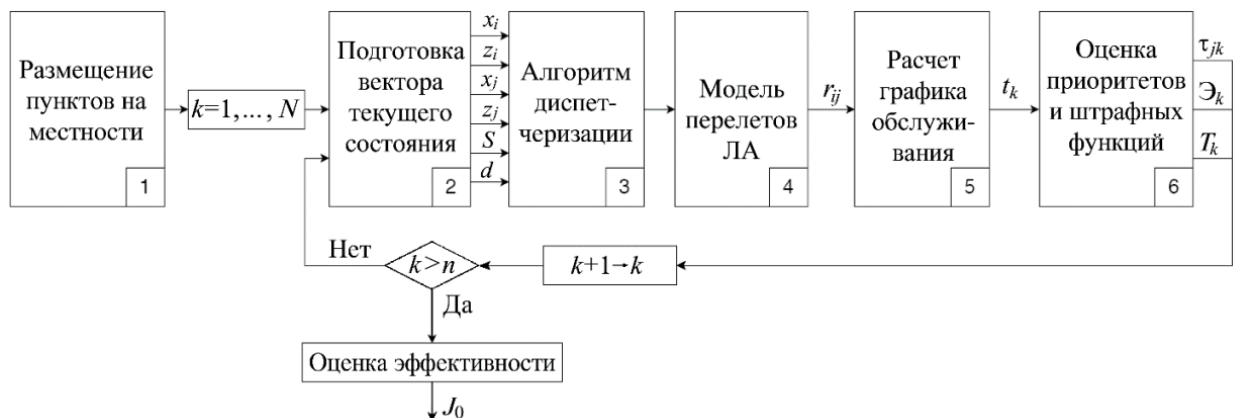


Рисунок 3.1 Блок – схема компьютерного моделирования.

Для решения поставленной задачи необходимо разбить ее на несколько подзадач:

На первом шаге необходимо распределить пункты на местности. За это отвечает блок 1, моделирующий размещение потенциальных пунктов наблюдения или нахождения клиентов на прямоугольной территории. Пункты размещены так, что расстояние между ними подчинены закону Пуассона, а их число намного меньше, чем число летательных аппаратов [2, 3, 16, 18, 20, 39, 43, 44].

Далее на каждом шаге моделируется появление новой заявки. Заявка появляется в любой момент времени в любом пункте, смоделированном ранее в пункте 1. Момент появления заявки также соответствует распределению Пуассона.

Блок 3 анализирует все входные данные, а именно параметры появившейся заявки, количество свободных ЛА на данный момент, количество заявок в очереди и определяет дисциплину обслуживания. Далее, согласно выбранной дисциплине, назначается ЛА для обслуживания.

Блок 4 отвечает за моделирование перелета летательного аппарата в пункт назначения. Здесь учитываются координаты пункта, в котором находится ЛА, пункта, в который необходимо перелететь и средняя скорость.

Блок 5 рассчитывает время перелета из пункта в пункт.

Следующий блок проводит оценку выполненных действий. Подсчитывается простой каждого летательного аппарата, сколько времени ожидает заявка, находясь в очереди, сколько топлива необходимо на перелет из пункта в пункт для ЛА.

В итоге, после обслуживания всех заявок, оценивается итоговое значение эффективности при выбранном количестве летательных аппаратов.

Программа на Python.

Программа для моделирования написана на высокоуровневом языке программирования Python [40]. Данный язык является одним из самых

популярных на сегодняшний день, а также он относится к интерпретируемым языкам т.е. не требует дополнительной компиляции, что позволяет пользоваться программой на различных платформах.

Рассмотрим подробнее работу программы. Размещение пунктов на местности. После работы данного блока моделируется файл с пунктами. Для примера было решено смоделировать 25 пунктов.

Таблица 3.3 Координаты смоделированных пунктов назначения

$n$	$x$	$z$
1	13	1
2	10	12
3	15	18
4	2	12
5	7	17
6	1	1
7	2	11
8	17	13
9	7	15
10	1	16
11	20	14
12	8	12
13	7	2
14	7	9
15	19	3
16	5	17
17	12	5
18	5	0
19	16	3
20	13	12
21	7	20
22	7	1
23	9	2
24	9	17
25	5	16

Далее моделируются случайные во времени заявки, появляющиеся в одном из 25 смоделированных пунктах. Для примера смоделировано 50 заявок. Любая заявка содержит следующую информацию: номер  $n$ , время появления  $t_n$ , номер пункта  $j$  и координаты данного пункта.

Таблица 3.4 Пример вывода информации о заявках

n (номер заявки)	j (номер пункта)	$X_j$	$Y_j$	$t_n$ (время появления заявки)

Пример хранения информации:

1,21,7,20,2739  
 2,20,13,12,3026  
 3,3,15,18,819  
 4,20,13,12,2944  
 5,19,16,3,1383  
 6,16,5,17,1018  
 7,13,7,2,2103  
 8,3,15,18,2661  
 9,9,7,15,166  
 10,4,2,12,2883  
 11,11,20,14,1065  
 12,25,5,16,789  
 13,12,8,12,420  
 14,3,15,18,1735  
 15,21,7,20,825  
 16,15,19,3,2072  
 17,8,17,13,1133  
 18,6,1,1,3295  
 19,9,7,15,1143  
 20,7,2,11,2484  
 21,16,5,17,2879  
 22,1,13,1,1321



23,8,17,13,2079

24,10,1,16,2497

25,9,7,15,2388

Для моделирования диспетчера беспилотной и легкой пилотируемой авиации необходимо запросить переменные данные (рис. 3.2):

- количество летательных аппаратов, которые будут участвовать в обслуживании заявок ( $i$ )

- среднюю скорость  $V_{cp}$  ЛА для моделирования перелетов ЛА из пункта в пункт

$K_0$  – коэффициент для расчета затрат на простой ЛА

$K_1$  – коэффициент для расчета затрат на перелет ЛА

Рисунок 3.2 Окно ввода данных.

$K_0$ ,  $K_1$  будут отличаться для беспилотной и пилотируемой авиации. Для беспилотной авиации  $K_0 = K_1$ .

Для моделирования предположим, что все ЛА вначале находятся на аэродроме в пункте 13. Все они свободны и ожидают появления заявок. При появлении новых заявок анализируется информация о свободных ЛА и заявках, ожидающих в очереди. На каждом шаге подсчитываются затраты на перелет, время простоя ЛА и время ожидания в очереди заявок.

При моделировании информация хранится в следующих таблицах:

Таблица 3.5 Появления и обслуживания заявок

$n$	$t_n$	$j$	$X_j$	$Y_j$	$\Sigma T_j$	$i$	$\Delta t$	$\Sigma T_j$
-----	-------	-----	-------	-------	--------------	-----	------------	--------------

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

где:

$n$  - номер заявки;

$t_n$  – время появления заявки;

$j$  – номер пункта;

$X_j, Y_j$  - координаты пункта;

$T_j$  – время ожидания начала обслуживания заявки;

$i$  – номер ЛА, обслуживающего заявку;

$\Delta t$  – время обслуживания заявки (перелета ЛА из своего местоположения в пункт обслуживания);

$\Sigma T_j = T_j + \Delta t$  – время ожидания обслуживания плюс время обслуживания заявки.

Таблица 3.6 Лог диспетчера

$k$	$t_k$	$L$	$v$	$d$	$s$	$P_1$	$j/n$	$\Delta\Phi_1$	$\Delta\varepsilon_1$	$P_2$	$j/n$	$\Delta\Phi_2$	$\Delta\varepsilon_2$	$P_i$	$j/n$	$\Delta\Phi_i$	$\Delta\varepsilon_i$
1	1	1	1	1	0	0	1/3	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0
2	2	1	2	2	0	0	1/3	$K_0$ * 1	0	0	1/3	0	0	0	-	0	0
3	3	1	3	3	0	0	1/3	$K_0$ * 1	0	0	1/3	$K_0$ * 1	0	0	1/3	0	0
4	7	0	1	3	1	1	1	занят	занят	0	1/3	$K_0$ * 4	0	0	1/3	$K_0$ * 4	0
5	30 0	0	2	2	1	1	1	занят	занят	1	2	занят	занят	0	1/3	$K_0$ * 293	0
6	50 7	1	1	3	0	0	1/5	0	$K_1$ * 500	1	2	занят	занят	0	1/3	$K_0$ * 207	0

где:

$k$  – номер события (появление заявки или освободившегося ЛА);

$t_k$  – время появления события (в секундах);

$L$  – признак события (новая заявка - 0/ освободившейся ЛА - 1);

$v$  – номер либо освободившегося ЛА, либо номер новой заявки;

$d$  – количеству свободных в данный момент ЛА;

$s$  – количество свободных заявок в данный момент времени;

$P_1, P_2, \dots, P_i$  – признак свободен/занят для конкретного ЛА;

$j/n$  - местоположение ЛА (т.е. номер пункта в котором он находится),  
если он свободен или  $n$  – номер заявки, в который летит ЛА;

$\Delta\Phi_i$  – затраты на простой =  $K_0 (t_k - t_{k-1})$ , подсчет идет при появлении  
каждого события;

$\Delta\varepsilon_i$  – затраты на перелет из пункта в пункт =  $K_1 (t_{\text{перелета}})$ , подсчет идет  
как только ЛА освободился.

Таблица 3.7 Свободных ЛА

$d$	$i$	$j$

где:

$d$  – номер строки ( $d$  = количеству свободных в данный момент ЛА);

$i$  – номер ЛА;

$j$  - местоположение ЛА (т.е. номер пункта в котором он находится).

Табл. 3.7 меняется при следующих действиях:

- освободился ЛА

- ЛА полетел обслуживать пункт

Таблица 3.8 Свободных заявок

$s$	$n$	$j$

где:

$s$  – номер строки ( $s$  = количество свободных заявок в данный момент времени);

$n$  – номер заявки (из таблицы заявок);

$j$  – номер пункта.

При работе программы необходимо моделировать перелет ЛА из пункта в пункт, назначать новым заявкам летательные аппараты, учитывая режим работы диспетчера, а также заполнять представленные выше таблицы.

Перелет из пункта в пункт происходит с постоянной скоростью, без учета погрешностей. Т.е. необходимо высчитать время перелета из пункта в пункт по формуле

$$t_{\text{перелета}} = S \backslash V_{\text{ср}} \quad (3.12)$$

где  $S$  – расстояние между пунктами и находится по формуле

$$S = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2} \quad (3.13)$$

Целераспределение происходит в момент, когда случается одно из событий:

- освободился летательный аппарат;
- появилась новая заявка.

Далее выбирается дисциплина обслуживания, исходя из данных таблицы 5 и 6. Рассмотрим их подробнее:

1) Освободился ЛА, но нет необслуженных заявок и не появились новые. Следовательно, освободившийся ЛА простаивает, программа записывает данные в таблицу 5. Подсчитываются затраты на простой летательного аппарата.

2) Появилась новая заявка, но нет свободных ЛА т.к. все они уже обслуживают предыдущие заявки. Таки образом заявка встает в очередь. Подсчитывается время ожидания заявки в очереди на обслуживание.

3) Освободился ЛА и есть заявка в очереди. Этот ЛА летит обслуживать заявку и из таблицы 5 убирается номер этого летательного аппарата.

4) Освободился ЛА и есть несколько заявок в очереди. В приоритете заявки, которые давно ожидают, но также учитывается расстояние от летательного аппарата до пункта заявки. Т.е. ЛА будет обслуживать ту заявку, для которой наименьшее значение отношения  $T_j/R$ , где:  $T_j$  – ожидание обслуживания конкретной заявки, а  $R$  – это расстояние до пункта заявки.

5) Последний вариант, когда появляется новая заявка и есть свободный (свободные) ЛА. При первом моделировании считалось расстояние от пункта заявки до каждого свободного ЛА. И обслуживал заявку тот летательный аппарат, для которого это расстояние было минимальным. Но, таким образом при моделировании не учитывались

занятые ЛА, которые могли находится совсем рядом с новой заявкой и заканчивать обслуживание. В этом случае занятые ЛА в итоге будут более приоритетными.

Поэтому в данном варианте моделирования учитываются не только свободные ЛА, но и занятые (рис. 3.3). При появлении новой заявки для свободных ЛА считается расстояние от его местоположения до пункта заявки. А для занятых ЛА считается сумма расстояния до пункта назначения заявки, которую он сейчас обслуживает, и расстояния от пункта назначения, и новой заявки. Если полученная сумма окажется минимальной, то занятый ЛА быстрее обслужит новую заявку.

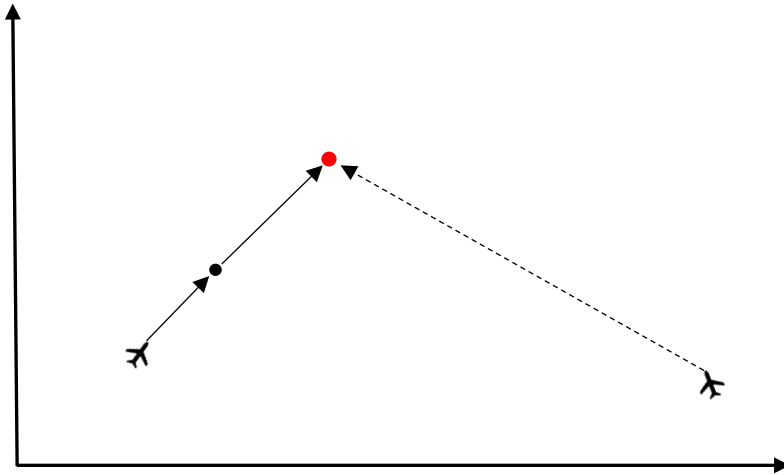


Рисунок 3.3 Сравнительная картина обслуживания пункта свободным или занятым ЛА при одной активной заявке.

В этом случае заявка остается в очереди на обслуживание. Далее может произойти два события:

- освобождается один из летательных аппаратов. Анализируем все расстояния для занятых и свободных ЛА. Если для освободившегося ЛА это расстояние будет минимальным, он полетит обслуживать эту заявку. Если же повторно анализ выявит, что занятый ЛА более оптимальный для этой задачи, заявка так и останется в очереди;

- появляется новая заявка. Т.е. теперь в очереди их две (рис. 3.4). Теперь необходимо анализировать расстояния до каждой из заявок. Для свободных ЛА считается сумма от пункта, где находится ЛА до каждой из заявок. Для занятых - сумма расстояния до окончания полета по текущей заявке и расстояний до двух новых заявок;

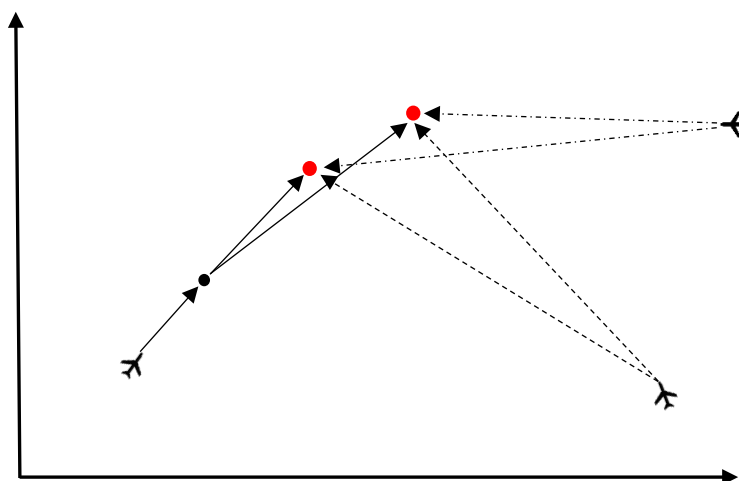


Рисунок 3.4 Процесс обслуживания при двух активных заявках.

Вычисляются два минимальных значения.

- если оба этих значения относятся к занятым ЛА, то обе заявки так и остаются в очереди и ждут дальнейших событий;

- если одно расстояние для свободного ЛА, а второе для занятого, то свободный ЛА начинает обслуживание ближайшей к нему заявки, а вторая заявка так и остается в очереди;

- если оба этих значения относятся к свободным ЛА, то находится наиболее удаленная заявка от обоих летательных аппаратов и ее обслуживает ближайший к ней ЛА. Такая схема позволит избежать пересечения маршрутов двух ЛА.

На рис. 3.5 представлена блок-схема моделирования перелетов и назначения летательных аппаратов заявкам на обслуживание.

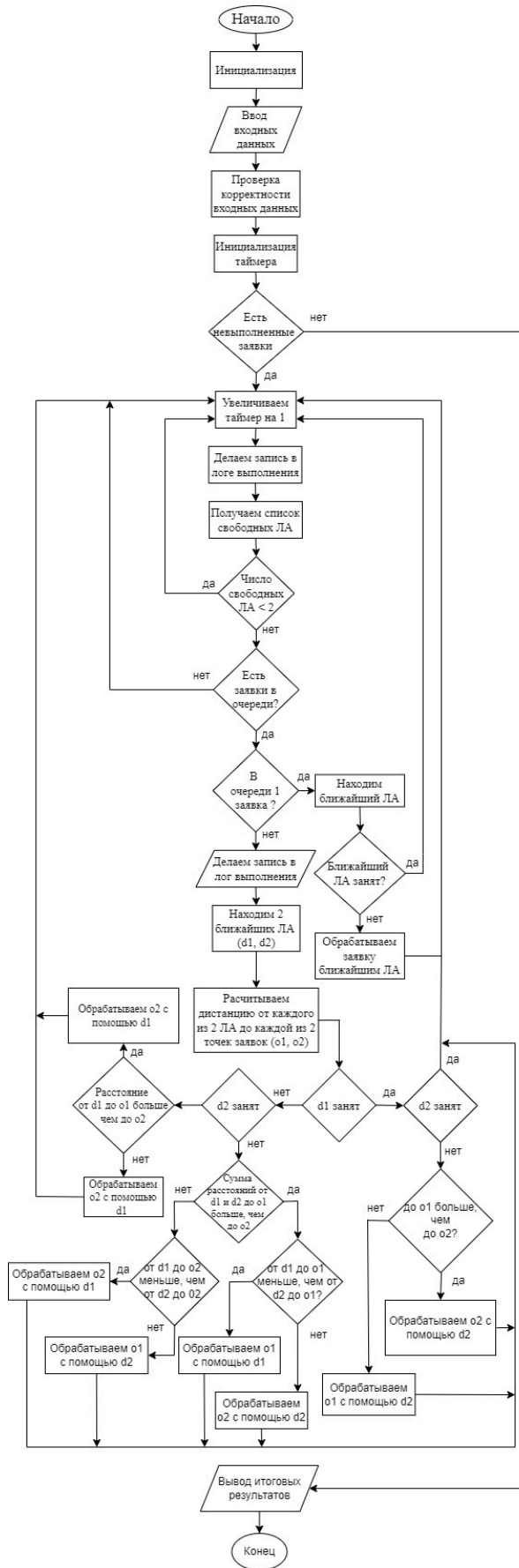




Рисунок 3.5 Блок схема моделирования перелетов ЛА при обслуживании заявок.

После моделирования в конце лога выводятся суммарно подсчитанные потери на перелет, простой и время ожидания в очереди на обслуживание (табл. 3.9).

Таблица 3.9 Расчет потерь на перелет и времени простоя и ожидания в очереди.

Количество		ЛА	=	7
Общее	время	полета	ЛА	= 12530.0
Общее	время	простоя	ЛА	= 20742.0
Общее	время	ожидания	заявок	= 0
Общее	время	выполнения	заявок	= 12530.0
ЛА 1	Общее время полета	= 1987.0	Общее время ожидания	= 2880.0
ЛА 2	Общее время полета	= 2076.0	Общее время ожидания	= 2845.0
ЛА 3	Общее время полета	= 2062.0	Общее время ожидания	= 2684.0
ЛА 4	Общее время полета	= 1255.0	Общее время ожидания	= 3303.0
ЛА 5	Общее время полета	= 2142.0	Общее время ожидания	= 2784.0
ЛА 6	Общее время полета	= 1066.0	Общее время ожидания	= 3294.0
ЛА 7	Общее время полета	= 1942.0	Общее время ожидания	= 2952.0

Если рассматривать программу с точки зрения функциональных блоков, то она состоит из следующих блоков:

1. Импорт и подключение необходимых стандартных внешних модулей.
2. Описание собственных классов, используемых в программе.
  - 2.1 Заявка. Описывается заявку на обслуживание.
  - 2.2 Точка. Описывается точка обслуживания.
  - 2.3 ЛА. Описывается ЛА.
3. Инициализируются переменные.
4. Описываются используемые процедуры и функции.

4.1 Поиск ближайшего ЛА.

4.2 Обработка заявки.

5. Расчет дистанции. Получаем координаты точек, возвращаем расстояние по теореме Пифагора.

6. Проверка невыполненных заявок. Получается список заявок, проверяется, все ли выполнены и возвращается Булево "Истина", если есть хоть одна невыполненная.

7. Получается список невыполненных заявок. Получается список заявок, проверяется, возвращается список невыполненных на текущий момент.

8. Выбор заявки (по критерию T/R) Получаются ЛА и список заявок, ожидающих обработки. Выбирается заявку по критерию время ожидание/расстояние до точки от ЛА

9. Получается список свободных ЛА.

10. Запись строки в лог.

11. Процедура импорта списка точек из CSV-файла.

12. Процедура импорта списка заявок из CSV-файла.

13. Процедура расчета.

14. Формируется визуальный интерфейс.

Перечисленные 14 блоки обеспечивают работу самой программы при моделировании самих перелетов и получении необходимых оценок для сравниваемых вариантов обслуживания.

### **3.4 Сравнительные результаты компьютерного моделирования**

Сравнение рассматриваемых вариантов проводилось путём расчетов и компьютерного анализа при следующих исходных данных: среднее время между заявками равно 60 с., т.е.  $\lambda = 0,016$  1/с, скорость полета ЛА равна  $V = 50$  м/с, среднее расстояние между пунктами равно  $r_{ij} = 10000$  м, т.е.  $\mu = 0,005$ . Этим данным соответствует коэффициент загрузки системы  $\rho = 3,2$ , и согласно теории массового обслуживания общее число используемых ЛА должно быть



Рисунок 3.6 Картина расположения пунктов на заданной территории, обслуживаемых двумя ЛА.

В первых трех строках таблицы представлены следующие значения при использовании разного числа  $N$  от 3 до 10:

$x_1$  – среднее время одного перелета из одного пункта в другой, которое снижается из-за постепенного уменьшения расстояния между ними при увеличении  $N$  (приблизительно обратно пропорциональны  $N^{1/2}$ );

$x_2$  – среднее время  $T$  «простоя» одного свободного ЛА перед вылетом, которое растёт из-за снижения спроса (числа новых заявок) по сравнению с растущим предложением – числом  $N$ ;

$x_3$  – среднее время  $t_{ср}$  ожидания одной заявки в очереди.

В соответствии с формулой (3.8) интегральная штрафная функция  $Y_0$  имеет вид

$$Y_0 = \Pi_1 \Pi_2(\delta) = (x_3 + m)(x_1 + \delta x_2 + m) \quad (3.14)$$

где  $\delta$  – коэффициент относительных затрат во время «простоя», взятый равным для малой авиации  $\delta = 0,5$ , для беспилотной авиации  $\delta = 1$ . Кроме того, было принято значение  $m = 100$  с.

Соответственно, полученные значения  $\Pi_1$  и  $\Pi_2(\delta)$  позволяют рассчитать минимизируемые штрафные функции  $Y_0(1)$  и  $Y_0(2)$ , представленные в других строках таблицы. В результате оказалось, что оптимальное число  $N$  в варианте 1 с лучшим качеством обслуживания равно  $N = 8$  для беспилотной авиации и  $N = 10$  для малой авиации, что как минимум вдвое больше допустимого значения  $N = 4_{тр}$ . Кроме того, установлено, что оптимальное число  $N = 10$  для малой авиации больше, чем для беспилотной, что оправдано сниженными затратами «простоя» на земле.

При анализе варианта 2 получены результаты, приведенные в табл. 3.11.

Таблица 3.11 Таблица результатов оптимизации для варианта 2.

N	4	5	6	7
---	---	---	---	---

X <sub>1</sub>	342	258	204	164
X <sub>2</sub>	18	132	234	316
X <sub>3</sub>	350	36	2	1
П <sub>1</sub>	450	136	102	101
П <sub>2</sub> (1)	460	490	538	580
I <sub>0</sub> (1)	207000	61740	55080	58500
П <sub>2</sub> (0,5)	450	425	420	423
I <sub>0</sub> (2)		53550	42840	42720

Сравнение первого и второго варианта обслуживания установило, что в последнем варианте все показатели улучшились – время ожидания заявок, время «простоя» и интегральная штрафная функция уменьшились и, главное, оптимальное число  $N$  сократилось на 10-15%. Однако и этот вариант не учитывает факта, что близость к очередному пункту назначения свободного ЛА менее вероятна, чем одного из нескольких занятых ЛА, завершающих своё обслуживание. В частности, на рис. 1 видно, что если  $r_{31} + r_{11} < r_{i1}$ , то свободный ЛА1 не будет участвовать в обслуживании. Поэтому ниже предлагается другой подход к решению поставленной задачи, учитывающий степень завершенности обслуживания заявок занятыми ЛА и использующий специальный алгоритм целераспределения на основе минимаксного критерия (см. рис. 3.6 и 3.8).

Таблица 3.12 Таблица результатов

	кол-во ЛА	3	4	5	6	7	8	9	10
1 дисциплина обслуживания	Общее время полета ЛА, сек				10043	8197	8767	6973	6710
	Общее время простоя ЛА, сек				11857	15769	18661	22328	24927
	Общее время ожидания заявок, сек				108	1	0	0	0
	Jo для легкой авиации				65542	58428	49541	46274	48347
	Jo для беспилотной авиации				71582	67012	64856	68602	73274
2 дисциплина обслуживания	кол-во ЛА	3	4	5	6	7	8		
	Общее время полета ЛА, сек		17440	12917	10191	8197	6212		
	Общее время простоя ЛА, сек		918	6574	11709	15769	19853		
	Общее время ожидания заявок, сек		17613	1286	108	1	0		
	Jo для легкой авиации		207126	53315	43000	42171	42277		
Jo для беспилотной авиации		211278	61580	54962	57944	62130			
3 дисциплина обслуживания	кол-во ЛА	3	4	5	6	7	8		
	Общее время полета ЛА, сек	13361	11804	9760	7873	6506			
	Общее время простоя ЛА, сек	584	2974	8648	13639	16683			
	Общее время ожидания заявок, сек	24479	2011	450	0	0			
	Jo для легкой авиации	219949	51295	41603	39385	39695			
Jo для беспилотной авиации	223392	55465	51029	53024	56378				

Общее время ожидания заявок, сек

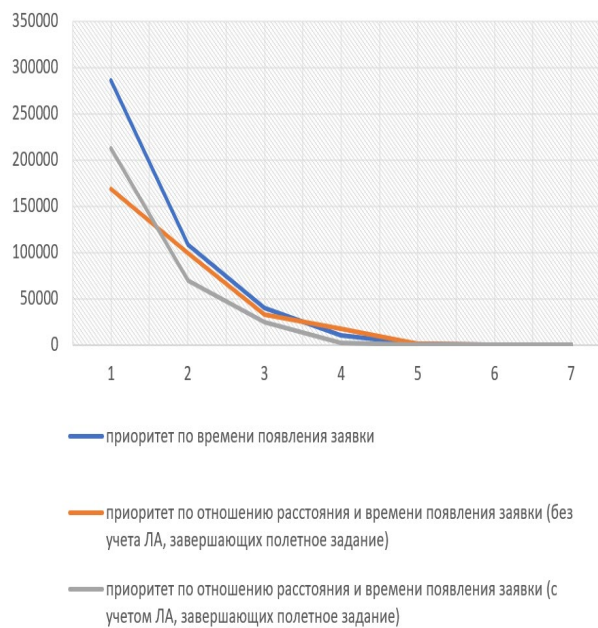


Рисунок 3.7 График изменения общего времени ожидания.

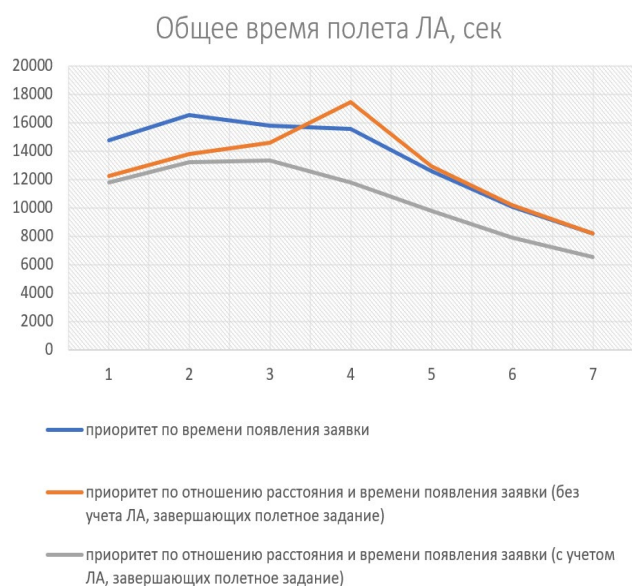


Рисунок 3.8 График изменения общего времени полета.

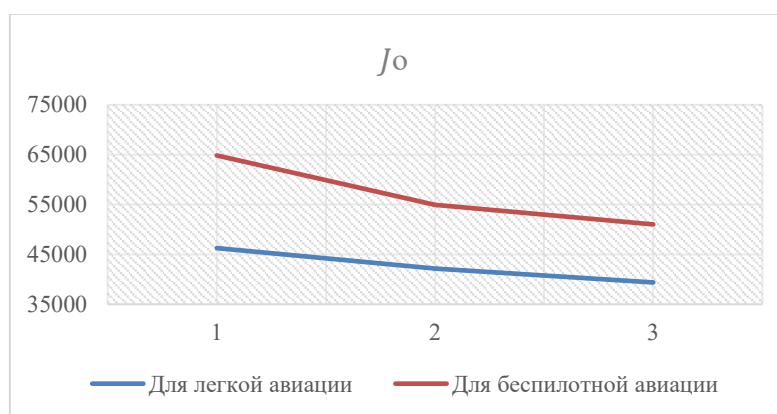


Рисунок 3.9 График изменения интегральной оценки качества обслуживания.

Ниже представлены окончательные результаты сравнения трех вариантов оценки качества

Таблица 3.13 Основные показатели качества для алгоритмов диспетчеризации.

Алгоритм диспетчеризации	$T_{\text{простоя}}$	$T_{\text{min}}$	$\tau_{\text{ожид}}$	$\tau_{\text{min}}$	$J_0$
$j=1 \max \tau$ (приоритет по времени появления заявки)	264	30	18	2	0.69
$j=2 \max \frac{\tau}{R}$ (приоритет по отношению расстояния и времени появления)	276	30	15	2	0.76

заявки (без учета ЛА, завершающих полетное задание)					
$j=3$ min max (Минимаксный критерий (с учетом ЛА, завершающих полетное задание))	285	30	4	2	0.79

Для более формального сравнения вариантов с помощью аналитических оценок можно воспользоваться формулой:

$$J = \left( \frac{1}{1 + \frac{N}{\rho_j}} + 0,5 \right) \left( \frac{0,5}{1 + \frac{c_j \rho_j}{N}} + 0,5 \right) \quad (3.15)$$

где  $\rho_1 = 8$ ;  $\rho_2 = 6$ ;  $\rho_3 = 4$ ,

$$а c_j = \frac{\tau_{ожид}(j)}{\tau_{min}} \frac{T_{min}}{T_{простоя}(j)} = \frac{30 \tau_j}{2 T_j}$$

Тогда получим

$$C_1 = 15 \frac{18}{264} \approx 1,05$$

$$C_2 = 15 \frac{15}{276} = 0,8$$

$$C_3 = 15 \frac{4}{285} = 0,21$$

Отсюда имеем цифры

а) для  $j=1$ ; максимум  $J_1$  примерно будет при  $N = \rho_j + 1 \approx \rho_j$

$$\max J_i = \left( \frac{1}{1+1} + 0,5 \right) \left( \frac{0,5}{1+C_1} + 0,5 \right) = 1 \left( \frac{1}{1+1,05} + 0,5 \right) = 0,74$$

$N=8$

При  $N < 8 - j_1$  резко уменьшается

При  $N > 8$  (например, для  $N=10$ ) имеем



$$\begin{aligned} \max J_3 &= \left( \frac{1}{l+1} + 0,5 \right) \left( \frac{0,5}{1 + 1,05 * 0,8} + 0,5 \right) = 0,94 \left( \frac{1}{3,7} + 0,5 \right) = 0,94 * 0,78 \\ &= 0,72 \end{aligned}$$

б) для  $j=1$ ; максимум  $J_3$  примерно будет при  $N \approx 4$

$$\max J_3 = \left( \frac{1}{l+1} + 0,5 \right) \left( \frac{0,5}{1 + 0,2} + 0,5 \right) = l \left( \frac{1}{2,4} + 0,5 \right) = 0,9$$

При  $N=8$  значение  $J_3$  чуть больше  $\max J_1$

Поэтому показанные на рис 3.9 графики  $J_0$  выглядят следующим образом:

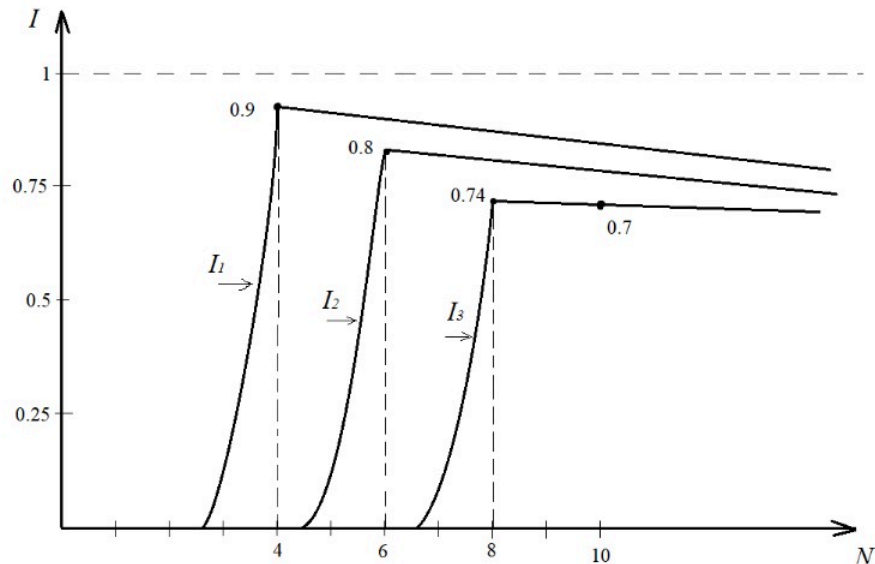


Рисунок 3.10 Итоговые графики зависимости качества обслуживания от числа ЛА для трех вариантов диспетчеризации их групповых действий. Результаты сравнения качества обслуживания: наихудший  $I_3$  – жадный алгоритм, средний  $I_2$  – критерий удалённости и времени ожидания в очереди, лучший  $I_1$  – минимаксный критерий с учётом занятых ЛА.

На рис .3.10 пунктиром показано какое количество ЛА  $N$  нужно взять, что при выбранной оптимальной дисциплине обслуживания достигнуть максимального качества. В частности, если задаться значением  $J_0=0.5$ , тогда число  $N=4$ . Это позволяет перейти от рассмотренной зависимости к

зависимости числа ЛА к более общей зависимости числа ЛА в одном вылете от интенсивности  $\lambda$  и относительной значимости эксплуатационных затрат и скорости обслуживания. Если воспользоваться полученным при компьютерном моделировании графиком зависимости числа  $N$  от коэффициента загрузки системы  $\rho$ , показанном на рис. 3.11, то эта зависимость примерно такова:  $N_{\text{опт}} \approx \rho + 2$ .

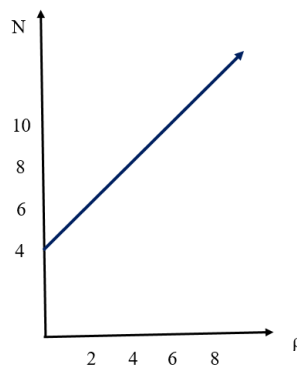


Рисунок 3.11 График зависимости оптимального числа ЛА в зависимости от интенсивности заявок при управлении качеством обслуживания.

Сравнив полученные результаты, можно сказать, что предложенный алгоритм является более качественным по сравнению с существующими. Из таблицы видно, что уменьшалось не только время ожидания в обслуживании, но и общая интегральная оценка качества обслуживания в целом. Кроме того, можно построить график зависимости выбранного оптимального числа  $N$  летательных аппаратов (характеризующего «предложение») в зависимости от коэффициента загрузки  $\rho$  заявок (характеризующего «спрос»), как показано на рис. 3.11

Окончательно общую зависимость можно представить в аналитической форме, уточнив ряд параметров с помощью компьютерного моделирования, в следующем виде [19,27]:

$$N_{\text{опт}} \approx 2\sqrt{\frac{m_1}{m_2}} + \frac{\lambda r_{\text{ср}}}{V} \quad (3.16)$$

В частности, при  $m_1 = m_2 = 0.5$ ,  $\lambda=8$  (1/час);  $r_{cp} = 10$  (км),  $V=40$  (км/час), получим  $\rho=2$  и  $N_{opt}=4$ .

### 3.5 Выводы по Главе 3.

1. При сравнении мультипликативного и аддитивного критериев качества обслуживания установлено, что в первом приближении аддитивный критерий, к сожалению, малочувствителен к изменениям двух штрафных функций, учитывающих время ожидания заявок в очереди и эксплуатационные затраты.

2. Для беспилотной авиации с помощью формул Эрланга показано, что при уточненной оценке среднего времени ожидания заявок в очереди существует некоторый выигрыш в скорости обслуживания, если максимальное качество оценивается на основе мультипликативной формы. При этом основной вклад в повышение качества вносит учет занятых ЛА наряду со свободными и выбор оптимального числа из всех ЛА, используемых в одном вылете. Это позволило сократить на 15÷20% число ЛА при сохранении требуемого качества обслуживания.

3. Для малой авиации удалось выявить более существенный выигрыш за счет использования третьего варианта диспетчеризации и сокращения на 15-20% времени ожидания заявок в очереди при незначительном увеличении времени простоя ЛА. Это особенно важно для обслуживания заявок в локальных зонах чрезвычайных ситуаций.

4. С помощью формул Литтла сформулирована задача выбора оптимального числа летательных аппаратов в одном вылете, влияющего как на время ожидания в обслуживании заявок, так и на время «простоя» ЛА, что также важно для малой авиации в период ее пребывания на летном поле. При этом за счет оптимизации числа ЛА интегральная оценка качества дополнительно возросла на 10÷15%.

5. В результате моделирования установлено, что при учете занятых БЛА в процессе самого полета общие группы перелетов каждого БЛА гораздо более компактны, т.е. средняя общая длина пути полета минимизируется, как показано на рис. 3.13.

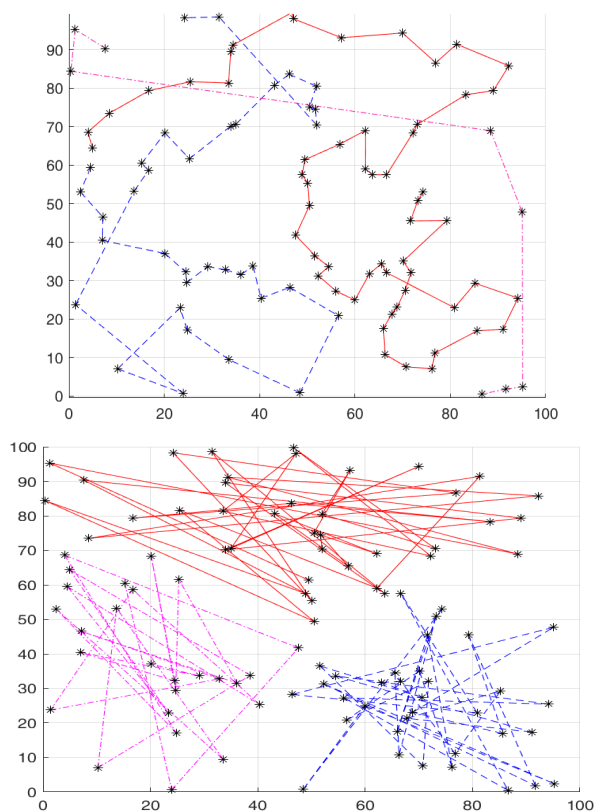


Рисунок 3.13 Картина перелетов трех БЛА с учетом занятых в перелете

В целом, за счет перечисленных мер управления качеством удастся повысить его общую оценку не менее чем на 20÷25%.

## **Глава 4. Примеры оценки качества обслуживания с учетом обеспечения безопасности группового полета беспилотной и малой авиации**

Полученные выше результаты учитывают при оценке качества обслуживания только два показателя – это эксплуатационные затраты (в первую очередь – расход топлива) и время обслуживания каждой заявки (в первую очередь – время ожидания в обслуживании после появления заявки). Кроме того, одним из **системообразующих показателей качества авиационных систем является безопасность полетов**. Этот показатель вступает в противоречие двум рассмотренным – для большей безопасности нужна повышенная «осторожность» при увеличении времени обслуживания. Кроме того, при встрече с препятствиями возникает необходимость их облета на значительном расстоянии, что приводит к увеличению общей длины пути. Также для общего баланса противоречивых интересов необходимо увеличивать число ЛА, чтобы успешно справиться с потоком заявок при безотказном обслуживании.

В данной главе рассмотрены четыре частных задачи контроля безопасности как самих ЛА в процессе их полета, так и людей при обслуживании наземных пунктов в экстренной ситуации (наряду с оценкой времени ожидания в обслуживании и возникающих эксплуатационных затрат).

### **4.1 Особенности и оценка качества логического управления многорежимным маршрутным полетом беспилотной авиации при наблюдении наземных объектов**

Существующие в настоящее время подходы к решению задачи планирования маршрута полета беспилотной авиации в первую очередь относятся к процессу поочередного облета и наблюдения неподвижных объектов [65, 66, 70, 71, 73]. Однако в этих методах недостаточное внимание

уделено ограниченными динамическими возможностями летательного аппарата (ЛА), а их учет приводит к сильным изменениям плана облета объектов, когда нужно иметь в виду направление и значение скорости самого ЛА.

Особые сложности возникают при составлении полетного маршрута при облете движущихся объектов. Также необходимо учитывать изменения в графике связанных с задержками из-за погодных условий, что подразумевает повторное определение мобильных объектов. Перечисленные особенности существенно влияют на качество обслуживания наземных объектов с помощью беспилотной авиации.

#### **4.1.1 Принятые допущения при оценке качества обслуживания беспилотной авиации**

**Процесс назначения состава и очередности простых полетных операций при перелетах БЛА назовем логическим управлением полетом, при следующих определениях:**

Логическое управление полетом предназначено для перестроения работы регуляторов управлением горизонтальным и вертикальным движением с помощью назначения специальных уставок, которые соответствуют нужному режиму полета.

Модуль логического управления – это устройство, автоматически определяющее очередной выполняемый режим полета, реализующее способ разбиения этого режима на нужное число простых полетных операций и осуществляющее назначение уставок в регуляторы управления рулевыми органами и тягой БЛА.

Под режимами полета понимаются процессы, порядок выполнения которых неизменный – разбег, взлет, маршрутный полет, возвращение к месту посадки, заход на посадку, снижение по глиссаде и сход с неё, приземление и пробег.

Под простыми полетными операциями понимается – разворот только по курсу, снижение и набор высоты, стабилизация по заданной линии пути – т.е. отдельные задачи стабилизации углового и траекторного движения.

Под уставками понимается ряд назначаемых постоянных чисел, автоматически в нужное время пересылаемых в регуляторы для их адаптивной перестройки и состоящих из 4 групп – входные задающие воздействия, балансирующие значения углов тангажа, крена и курса, передаточные числа регуляторов и параметры ограничений по перегрузке, крену, углу атаки т.д. Строка назначаемых установок представлена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 Строка назначения уставок.

Модуль логического управления расшифровывает очередную задачу навигации на ряд простых подзадач для последующего управления. Это транслятор, стоящий между информационно-измерительной системой (ИИС) и системой автоматического управления САУ для детализовки навигационных задач, как показано на рис. 4.2.

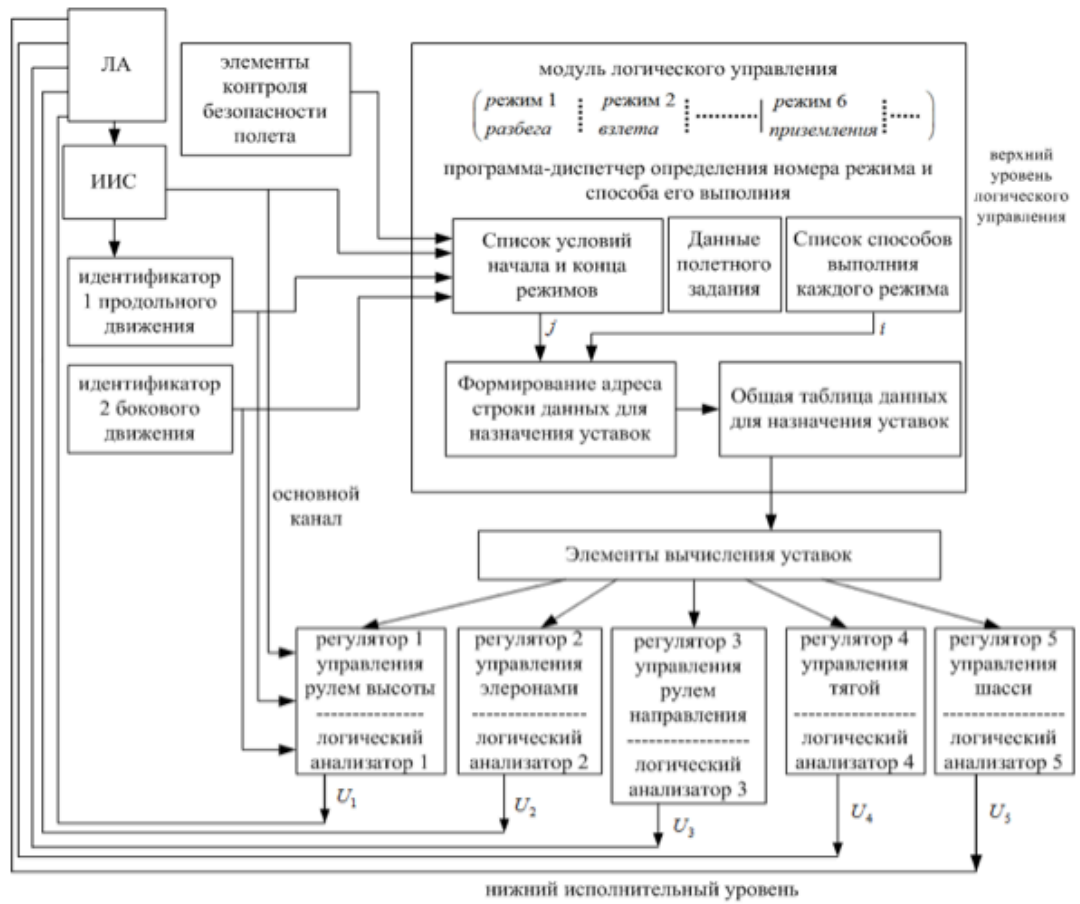


Рисунок 4.2 Блок-схема бортовой системы управления БЛА, содержащая модуль логического управления.

На рис. 4.2 есть элементы вычисления уставок. Это означает, что должен быть свой вычислительный элемент для назначения уставок в регуляторы в режиме маршрутного полета. На этой блок-схеме также представлены два цикла рекуррентных операций. Первый – внешний цикл, который предусматривает многократное использование одних и тех же уставок в разные моменты  $i$  времени полета, где  $i$  – текущий шаг принятия решения. Внутри этого цикла имеется второй цикл перестроения уставок при переходе на новую простую полетную ситуацию. Во внутреннем цикле используются данные из таблицы, каждой строке которой соответствуют условия перелета из пункта  $j-1$  в пункт  $j$ . В общей программе имеются следующие блоки пересчета координат летательного аппарата, определения логики управления



разбегом и взлетом, назначение уставок по высоте и блок возвращения к месту посадки. [49, 53, 57]

**Для обеспечения требуемого качества обслуживания** нужно заранее определить и утвердить первоочерёдность выполнения ряда противоречивых требований, предложив, в частности, следующую последовательность при движении к очередному ППМ:

- сначала осуществить разворот по курсу в сторону ППМ, если это необходимо;
- затем выйти на нужную высоту;
- совершить необходимые маневры, состоящие из назначаемого ряда простых полетных операции, при горизонтальном полете;
- при движении на постоянной высоте и близкой к прямолинейной траектории отрегулировать скорость необходимую для соблюдения графика, либо для достижения нужной конечной скорости, либо для обоих случаев;
- попадание в заданную терминальную точку (область) ППМ;
- соблюдение графика;
- соблюдение конечной скорости;
- соблюдение того приоритета, который будет назначен во входном слове.

**Возможными терминальными областями у каждого ППМ принято считать**

- попадание в точку без заданного путевого угла;
- попадание на заданную линию пути без назначенной точки;
- попадание в точку с заданным путевым углом;
- разворот по курсу и его стабилизация без указания терминальной области;
- попадание на круг ППМ при заданном направлении облета и заданном финальном путевом угле, а также с заданным временем пребывания;

- попадание в зону ожидания, имеющего форму круга либо прямоугольника;
- попадание в нужное время и с нужной скоростью в ППМ.

Для каждого из всех случаев во входном слове должны быть четко указаны признаки их различия, а в выходных данных нужно указать часть параметров, которые необходимо назначать в виде уставок.

Одной из задач успешного качества обслуживания наземных пунктов является **альтернативный выбор высоты наблюдения** на первом уровне принятия решения

В данной работе основополагающими факторами, определяющими на уровне I нужный выбор высоты полета, приняты три пары параметров:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  – текущие расстояния в трехмерном пространстве между БЛА и ближайшим для каждой альтернативной высоты пунктом, вычисляемые по формуле:

$$R_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (z - z_j)^2 + (y - H_j)^2}, \quad (4.1)$$

где  $x_j$  и  $z_j$  – координаты ближайшего пункта с высотой наблюдений  $H_j$ , а также  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – число подлежащих контролю пунктов для каждой высоты, попавших в «окно» наблюдения в виде прямоугольного параллелепипеда заданных размеров.

#### **4.1.2 Программа логического управления беспилотной авиации при оценке времени выполнения полетного задания и эксплуатационных затрат маршрутного полета.**

Блок-схема программы блока 4 для логического управления боковым движением показана на рис. 4.3.

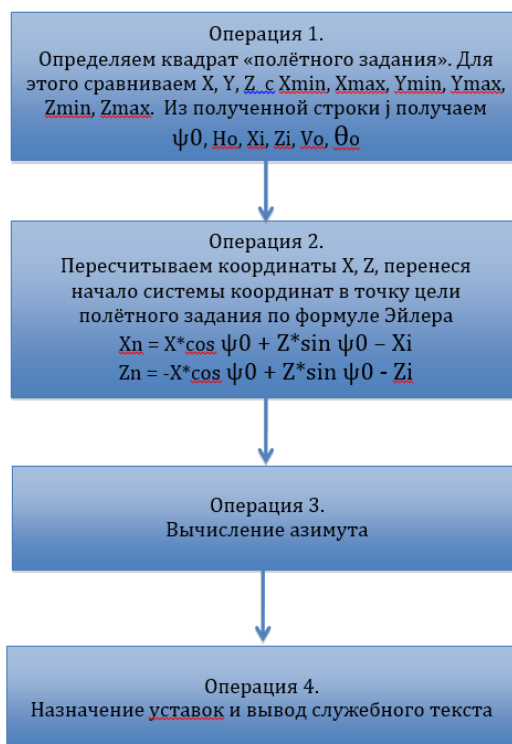


Рисунок 4.3 Блок-схема программы логического управления горизонтальным полетом.

Данный метод определяет четыре главные операции. В первой операции устанавливается квадрат полетного задания, во второй пересчитываются координаты относительно локации цели, в третьей вычисляется азимут, а в четвертой назначаются уставки в разных полетных режимах и формируется служебный текст для комментирования логики действий в различных ситуациях. Третья операция в свою очередь включает в себя четыре различных случая сближения беспилотного летательного аппарата с выбранным пунктом:

- 1) подлет слева к задней полусфере
- 2) подлет справа к задней полусфере
- 3) подлет слева к передней полусфере
- 4) подлет справа к передней полусфере

Каждый случай подразумевает различные способы расчета и определения азимута, который сравнивается в результате с путевым углом. В случае малой разницы между этими углами выравнивается линия пути, в

случае большой разницы производится изменение курса влево или вправо. Ниже представлены случаи служебного текста, передаваемого в наземные комплексы, контролирующие полетное задание. Всего 6 вариантов. Сформированная блок-схема алгоритма позволила составить и отладить программу на ЭВМ блока 4 и вместе с остальными блоками промоделировать ее работу.

#### **4.1.3 Оценка качества обслуживания беспилотной авиацией при наблюдении наземных объектов**

Приведенные выше рассуждения позволяют сделать следующий вывод – использование динамических приоритетов при выборе первоочередных поступающих заявок снижает требуемое число ЛА и, соответственно, эксплуатационные затраты, а учет при целераспределении заявок не только между свободными, но и занятыми ЛА, находящимися поблизости приводит к сокращению времени обслуживания. Это чисто качественная оценка преимуществ предлагаемого подхода.

Для количественной оценки повышение эффективности групповых действий авиации предлагается двух альтернативных вариантов – предложенного подхода и известного, использующего при выборе заявок «жадный» алгоритм, а при их целераспределении – только свободные ЛА. При этом известными являются степень улучшения каждого из показателей качества для сравниваемых вариантов.

В случае сравнения жадного алгоритма приоритетного ранжирования с минимаксным алгоритмом, длина суммарного пути группового полета (а значит и эксплуатационные затраты) в среднем сокращается на 10-15%. С другой стороны, полученные в данной работе результаты компьютерного моделирования показали существенное снижение времени ожидания заявок в очереди при учете занятых ЛА (особенно в малой авиации) примерно на 15-

25%. Тогда используя приведенную выше формулу (2.1) для мультипликативной формы оценки качества получим следующий результат:

- для известного подхода:

$$J_0^I = \left( \frac{1}{1 + \mathcal{E}_ж} + m_1 \right) \left( \frac{1}{1 + \tau_ж} + m_2 \right) \quad (4.2)$$

где  $\mathcal{E}_ж$  и  $\tau_ж$  - соответственно эксплуатационные затраты и время ожидания заявок при известном подходе с помощью «жадного» алгоритма;

- для предложенного подхода:

$$J_0^{II} = \left( \frac{1}{1 + 0,87\mathcal{E}_ж} + m_1 \right) \left( \frac{1}{1 + 0,8\tau_ж} + m_2 \right) \quad (4.3)$$

Оценим теперь общий выигрыш  $B$  в качестве обслуживания отношением  $J_0^{II}$  к  $J_0^I$  введя следующие обозначения:  $\Delta B_1 = 0,1$ ,  $\Delta B_2 = 0,05$  (что характеризует каждый показатель в отдельности при  $m_1 = 0,2$ ,  $m_2 = 0,8$ ) в случае, **когда эксплуатационные затраты гораздо важнее, чем скорость обслуживания при наблюдении объектов:**

$$B = J_0^{II} / J_0^I \approx \left( \frac{1+m_1}{\frac{1}{1+\mathcal{E}_ж}+m_1} \right)^{\Delta B_1} \left( \frac{1+m_2}{\frac{1}{1+\tau_ж}+m_2} \right)^{\Delta B_2} \approx e^{\Delta B_1 + \Delta B_2} \approx 1,16 \quad (4.4)$$

Таким образом, при управлении качеством обслуживания заявок с помощью предложенного подхода выигрыш в эффективности в среднем составляет 16%.

## 4.2 Оценка качества обслуживания с учетом безопасности облета препятствий

Один из важных показателей качества – безопасность полета, а именно облет препятствий, встречающихся на пути в виде ландшафта, городов, опасных объектов и природных явлений и отсутствие пересечений маршрутов летательных аппаратов [90]. В работе представлен алгоритм облета препятствий для безопасного полета ЛА [85].

#### **4.2.1 Алгоритм работы логической системы управления при облете препятствий**

Алгоритм представляет собой два цикла – внешний и вложенный. Во внешнем цикле происходит перебор всех известных ППЗ по очереди. При рассмотрении очередного ППЗ происходит обращение во внутренний цикл, где просматриваются все известные препятствия на предмет попадания их на линию пути ЛА. Условием выхода из внутреннего цикла является перебор всех препятствий, условием выхода из внешнего – просмотр всех ППЗ. По окончании работы алгоритма формируется обновленный план полетного задания, в который входят как пункты исходного полетного задания, так и назначенные промежуточные пункты облета препятствий. Алгоритм вызывается всякий раз при поступлении информации о новых ППЗ или препятствиях (см. рис.4.4).

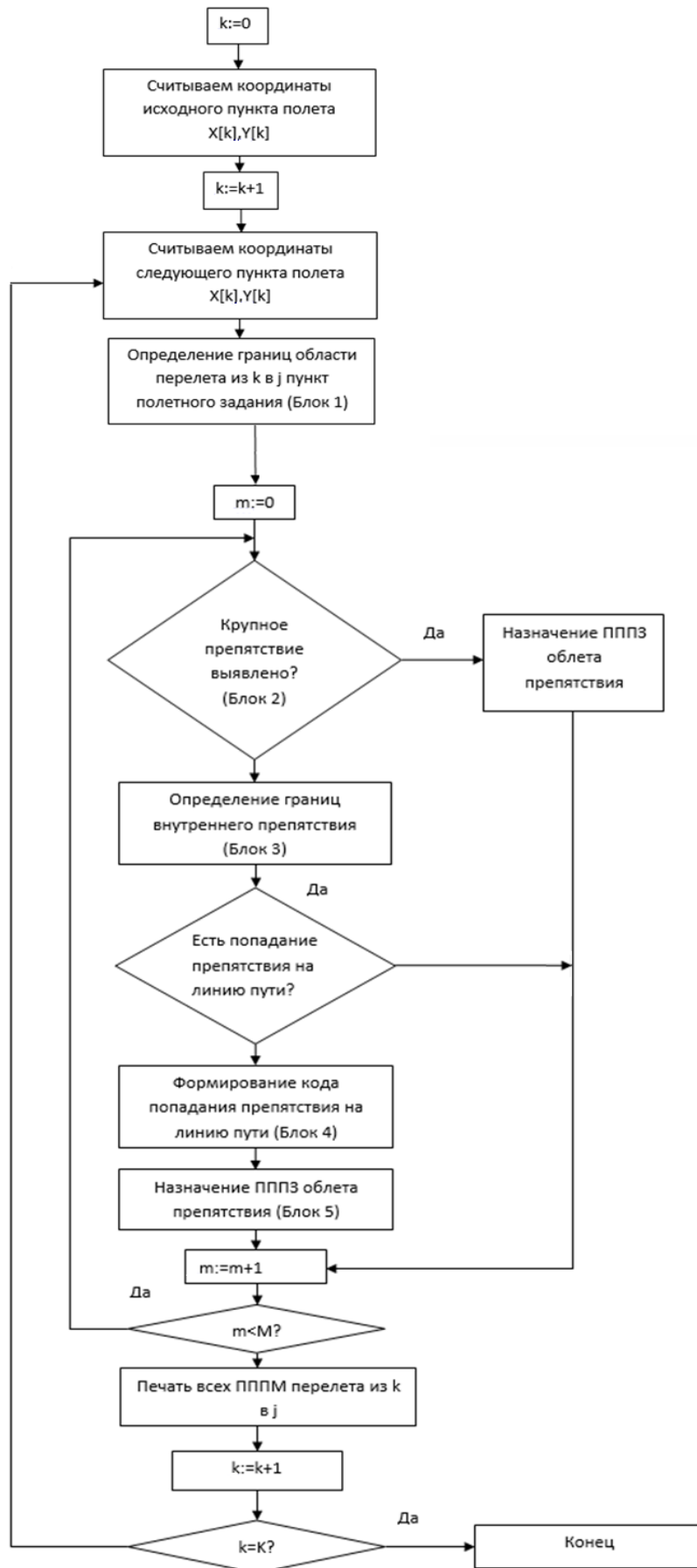


Рисунок 4.4 Алгоритм Системы логического управления маршрутным полетом БЛА

Работа алгоритма начинается со считывания информации о текущем местоположении ЛА, а также координат следующего ППЗ. Согласно заданию на разработку алгоритма, препятствия представляют собой прямоугольники с известными координатами. Ситуация, когда маршрутный пункт попадает внутрь препятствия не рассматривается, задача правильного формирования маршрута возлагается на стратегический уровень планирования. Перелет из текущей точки маршрута в очередную должен происходить внутри прямоугольной области, ограниченной текущим пунктом с одной стороны и очередным с другой.

Вначале производится сравнение между собой одноименных координат текущего и очередного ППЗ, выявляя левую, правую, нижнюю и верхнюю границы, определяя переменные  $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$  соответственно. После этого происходит обращение во вложенный цикл, обнуление счетчика цикла при выявлении крупного препятствия.

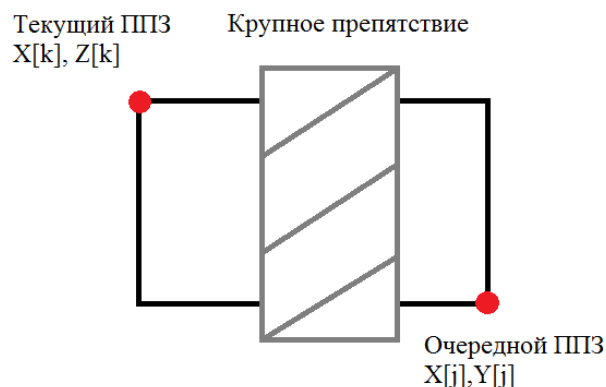


Рисунок 4.5 Пример крупного препятствия.

Далее определяется взаимное расположение препятствия и области перелета, что необходимо для выбора направления облета, а также для



совместного учета как экономичности этого облета, так и безопасности самого полета.

#### 4.2.2 Моделирование предложенного алгоритма и оценка его эффективности

На рис. 4.6 показан фрагмент маршрутного полета при облете девяти пунктов **без учета препятствий**. Из рисунка видно, что каждому пункту соответствует свой «квадрат», в котором этот пункт находится и по которому должен лететь беспилотный летательный аппарат, чтобы достигнуть этот пункт.

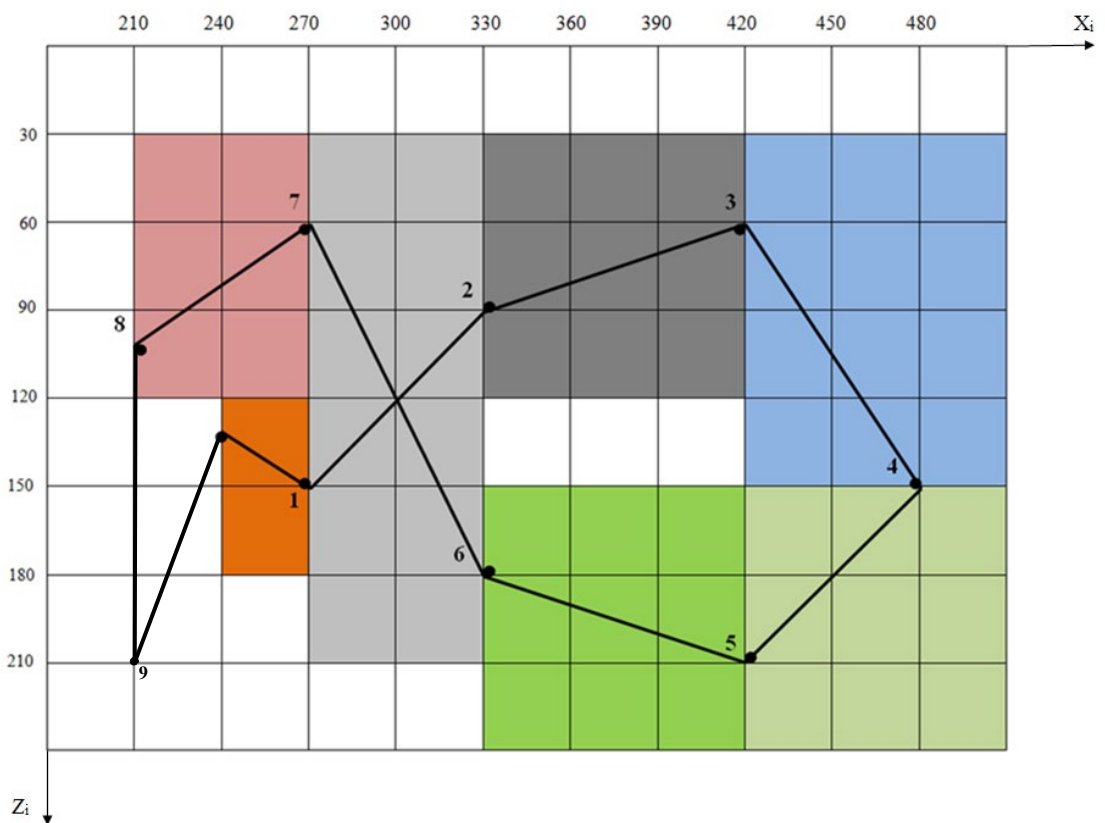


Рисунок 4.6 Фрагмент полетного задания при обслуживании 9 пунктов

Данные полетного задания в этом случае представлены в табл. 4.1

Таблица 4.1 Данных полетного задания по указанному маршруту.

Пк	Hmin	Hmax	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax	$\psi_0$	H0	$\Theta_0$	$X_i$	$Z_i$	$V_0$	$N_{BЭ}$
0	180	520	240	270	120	180	330	500	0	270	150	40	2
0	480	520	270	330	60	180	45	500	0	330	90	40	2
0	480	520	330	420	30	120	20	500	0	420	60	40	2
0	480	520	420	510	30	150	305	500	0	480	150	40	2
0	480	520	420	510	150	240	225	500	0	420	210	40	2
0	480	520	330	420	150	240	160	500	0	330	180	40	2
0	480	520	270	330	30	210	120	500	0	270	60	40	2
0	180	520	210	270	30	120	230	500	0	210	110	40	2
0	180	520	180	210	180	240	230	500	0	210	210	40	2

Теперь на маршруте введены препятствия, представленные на рис. 4.7.

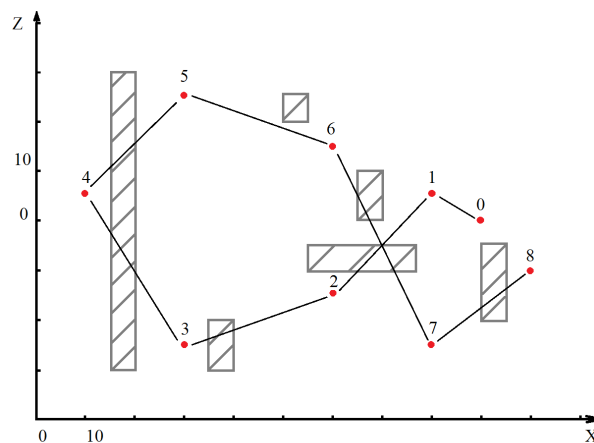


Рисунок 4.7 Препятствия на маршруте пути.

Программа облета препятствий запускалась с введенными в нее тестовыми данными. Первым сообщением программа выводила координаты известных маршрутных пунктов и препятствий, что позволяло контролировать правильность записи данных в память. Затем после вывода

каждой строки на экран делалась пауза, позволявшая проконтролировать правильность выбора действия алгоритмом и назначения переменных.

Результат работы программы по облету препятствий представлен на рис. 4.8.

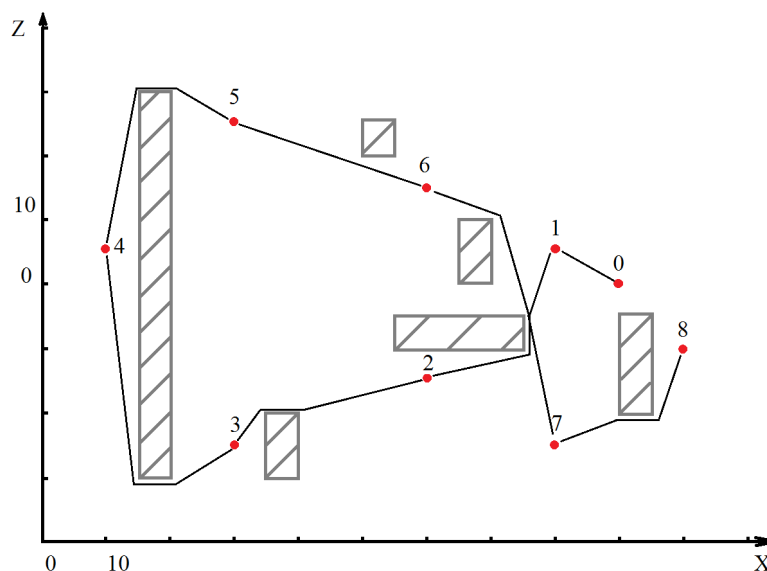


Рисунок 4.8 Результат моделирования.

В результате работы программа формирует список новых пунктов полетного задания, полет по которым позволит облететь препятствия с требуемой безопасностью и с учетом затрат топлива (что особенно важно для малой авиации)

#### **4.2.3 Учет безопасности маршрутного полета в общей оценке качества обслуживания малой и беспилотной авиацией при встрече с препятствиями.**

В данной главе анализируется возможность учета безопасности маршрутного полета в общей оценке качества обслуживания, выступающего в роли третьего важного фактора. Дело в том, что анализируемое время перелетов из одного пункта в другой предполагает прямолинейное беспрепятственное движение ЛА, и в соответствии с этим в расчетах используется средняя скорость  $\mu$  обслуживания одной заявки.

Однако при встрече с препятствиями, как воздушными (грозовой фронт облачности), так и наземными (имеются запретные зоны, включающие жилые районы), необходимо облететь их на допустимом расстоянии, например, радиусом  $R$ , не меньше указанного значения  $R_{\text{доп}}$ . При этом, хотя вероятность  $P$  встречи невысока ( $P < 0,1$ ), тем не менее, с увеличением выбранного радиуса  $R$  безопасность полета будет расти, зато средняя скорость обслуживания в обслуживании других заявок в очереди и снизится экономичность полета из-за возрастания общей длины пути в полете.

При возрастании числа препятствий проблема достижения компромисса с учетом всех трех факторов усугубляется. Также для малой авиации вопрос безопасности полета дополняется учетом комфортности пассажиров – с увеличением радиусов  $R$  облета препятствий она возрастает. Другим важным обстоятельством является случай, когда необходимо не просто обойти препятствия, но и облететь его в задаче наблюдения наземных объектов с помощью беспилотной авиации это встречается часто. В любом случае выбору подвергается радиус  $R$  маневрирования, при котором общая оценка качества должна достигнуть максимума.

Как было сказано во введении главы 5, движение из одного пункта в другой не по прямой, а по окружности вносит поправки в общей оценке качества, которые надо определить с помощью штрафных функций.

Вначале рассмотрим штрафную функцию  $\Pi_3$  и вид  $\Pi_3$  третьего сомножителя, оценивающего безопасность полета при встрече с препятствием. Ясно, что чем больше радиус  $R$  окружности бокового маневра, тем меньше риск. Поэтому штрафную функцию  $\Pi_3$  можно в первом приближении принять в виде

$$\Pi_3(R) = \frac{R_{\min}}{R} \quad (4.5)$$

где  $R_{\min}$  - минимально допустимый радиус, гарантирующий нижнюю степень безопасности ( $R_{\min} \approx 100 \div 1000\text{м}$ )

С другой стороны, считая встречу с препятствием маловероятным, а в случае его отсутствия, очевидно, третий сомножитель должен быть равен единице, примем теперь формулу для него в виде

$$П_3 = m_3 + \frac{1 - m_3}{1 + Ш_3(1 - m_3)} \quad (4.6)$$

Из формулы (4.6) видно, что в случае отсутствия препятствия при  $Ш_3 = 0$  получим значение  $П_3 = 1$  при любом масштабном коэффициенте  $m_3$ . Реально же считается фактор безопасности первостепенным, будем, считать, что  $m_3 \leq 0,1$ .

В частности, для малой авиации общий критерий качества  $J_0$  можно представить следующим образом, если сослаться на

$$П_0 = \left[ m_1 + \frac{y}{y + 2 - \alpha(R)} \right] \left[ m_2 + \frac{y}{y + c(R)} \right] \left[ m_3 + \frac{1 - m_3}{1 + (1 - m_3) \frac{R_{min}}{R}} \right] \quad (4.7)$$

где  $\alpha(R)$  и  $c(R)$  - параметры, характеризующие соответственно экономичность и быстроту обслуживания и меняющиеся незначительно в зависимости от  $R$ . Аппроксимируем эту зависимость линейной следующим образом

$$\alpha(R) = \alpha_0 - \alpha_1 RP; c(R) = c_0 - c_1 RP \quad (4.8)$$

Формула (4.8) указывает, что при увеличении  $R$  первые два сомножителя, характеризующие экономичность полета и быстроту обслуживания, уменьшаются. Наоборот, третий сомножитель растет, и при  $R \rightarrow \infty$  стремится к единице.

Рассмотрим следующий пример расчета качества обслуживания малой авиацией при контроле и спасении туристических групп в чрезвычайных ситуациях, возникающих в горной местности, когда в полете на малой высоте необходимо неоднократно облетать препятствия.

Пусть задача решается при следующих исходных данных:

- вероятность встречи с препятствиями  $P=0,25$ ;
- минимаксный радиус облета препятствий  $R_{min} = 150\text{м}$ ;
- формула оценки качества обслуживания  $\Pi$  имеет вид:

$$\Pi_0 = \left( m_1 + \frac{y}{y + 2 - \alpha_0 + \alpha_1 Z P} \right) \left( m_2 + \frac{y}{y + 2 - c_0 + c_1 Z P} \right) \left[ m_3 + \frac{(1 - m_3)Z}{1 - m_3 + Z} \right] \quad (4.9)$$

где  $Z = \frac{R_{min}}{R}$  - выбираемое оптимальное значение, максимизирующее общий показатель качества обслуживания ( $Z \geq 1$ );  $m_1 = m_2 = 0,45$ ;  $m_3 = 0,1$ ;  $\alpha_0 = 0,7$ ;  $c_0 = 0,5$ ;  $\alpha_1 = c_1 = 0,2$ ;  $y = \frac{N}{\rho} \alpha_0 = 1$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 4.2

Таблица 4.2 Результаты расчетов при выборе оптимального радиуса облета препятствий

$Z$	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_0$
2	1,08	0,87	0,72	0,68
4	1,05	0,85	0,84	0,75
6	1,01	0,83	0,88	0,67
8	0,98	0,82	0,85	0,66
10	0,95	0,81	0,83	0,65

В таблице значения  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  соответствуют трем сомножителям формулы (5), а наибольшее значение общего качества  $\Pi_0=0,75$  получено при  $Z=4$ . Значит искомый радиус облета препятствия  $R_{opt}=600\text{м}$ . Если сравнить полученный ответ с неоптимальным радиусом обхода препятствий (большим или меньшим, чем  $R=600\text{м}$ ), то тогда общее качество при облете препятствий снизится до значений  $\Pi_{min}=0.65$ . Поэтому выигрыш от выбора оптимального режима облета препятствий составляет 13%

### **4.3 Оценка качества обслуживания малой авиацией при спасении людей в экстренных ситуациях.**

#### **4.3.1 Введение**

Планирование оптимальных маршрутов групповых полетов беспилотной авиации является актуальной многокритериальной задачей. Преимущественно при планировании реализации заявок на обслуживания рассматриваются только свободные каналы, роль которых в данной задаче выполняют летательные аппараты (ЛА). Используя алгоритм целераспределения заявок в сочетании с генетическим алгоритмом можно заметно повысить эффективность маршрутизации. Данное сочетание позволяет рассматривать каналы обслуживания как возможные для реализации заявок не только в свободном, но и в занятом состоянии [52, 67].

Принципиально канал обслуживания представляет собой систему ряда характеристик, включая длительность обслуживания текущей заявки [28]. Процесс реализации заявки в данной работе представляет собой выполнение полета по перевозке людей, почты и груза летательными аппаратами, с распределением поступающих заявок между свободными и занятыми ЛА, состояние которых на каждом шаге планирования известно. В частности, рассмотрим пример ликвидации угрозы населенным пунктам при наводнении и своевременного спасения людей при использовании не только свободных, но и занятых в полете вертолетов при решении задачи эвакуации.

Рассматривается случай, при котором местоположение заявок на обслуживание сосредоточено не по всей территории обслуживания, а в её локальных местах. В частности, рассматривается случай эвакуации с помощью вертолетов при наводнении (рис. 4.5). При этом процесс затопления местности распространяется с юга на север, а процесс эвакуации будет рассмотрен в трех вариантах расположения пунктов (рис. 4.9-4.11).

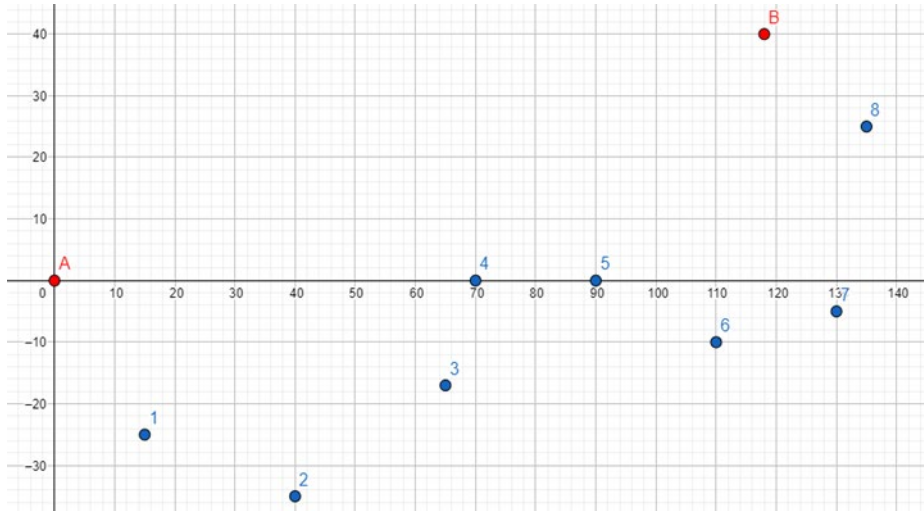


Рисунок 4.9 Начальные координаты ЛА в точках А и В и 8 объектов.

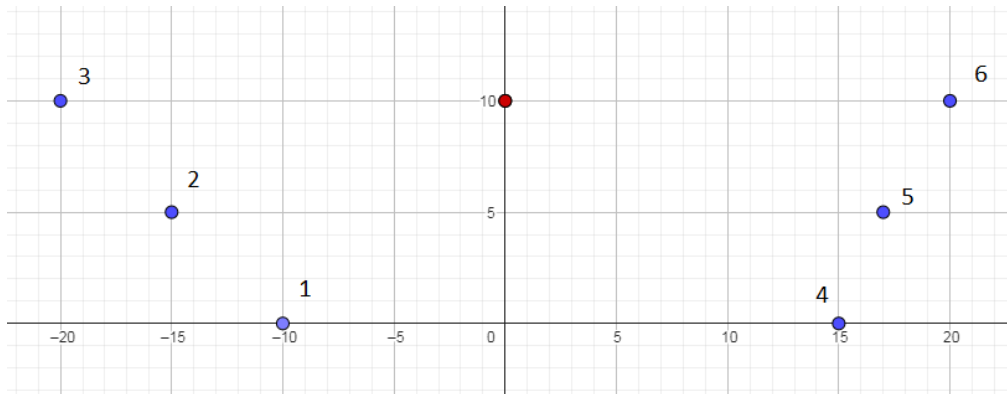


Рисунок 4.10 Второй вариант расположения 6 пунктов.

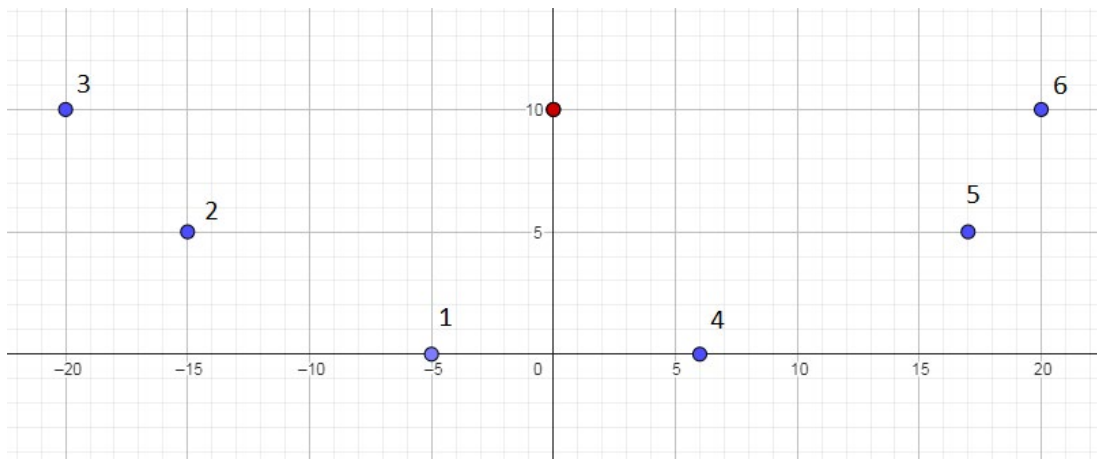


Рисунок 4.11 Третий вариант расположения 6 пунктов



### 4.3.2 Принятые допущения

1. Считается, что заявки на эвакуацию населения возникают случайным образом и представляет собой пуассоновское распределение случайной величины. Число  $n$  этих заявок превышает число  $N$  летательных аппаратов.

2. Пункты назначения в соответствии с заявками располагаются случайным образом согласно Закону Пуассона, либо располагаются в отдельных районах с большой плотностью.

3. Каждая заявка характеризуется известными параметрами: номер заявки  $m$ , координатами  $X_i, Z_i$  начального  $i$ -го пункта вылета и координатами  $X_j, Z_j$  конечного  $j$ -го пункта прилёта, а также возникшем временем  $\tau_m$  ожидания их обслуживания в общей очереди для обеспечения приоритета.

4. Задано число  $N$  летательных аппаратов и текущие значения их координат  $X_i, Z_i$  либо на стоянке, либо в полете в любой текущий момент времени.

5. Требуется оценить качество обслуживания при спасении людей при распределении пунктов эвакуации на каждом шаге выполнения перелетов свободных и занятых БЛА, а также оценить эффективность предложенного подхода в сравнении с известными алгоритмами маршрутизации.

### 4.3.3 Алгоритм предполетного планирования группового маршрутного полета ЛА

Исходной концепцией предлагаемого подхода является обязательный учет при  $d > 0, S > 0$  не только свободных, но и занятых ЛА – на каждом шаге планирования участвуют все  $N$  рассматриваемых ЛА. Это приведет к тому, что из-за отказа от обязательного назначения для новой заявки свободного отказа на будущих шагах возникнет ситуация, когда при  $d > 1$  и  $S > 1$  одновременно возникнут очереди, причём, как правило, значения  $d$  и  $S$  не будут равны друг другу.

Вследствие этого сначала возникнет подзадача назначения приоритетного множества заявок и выбранных ЛА, как свободных, так и занятых, при равенстве их числа друг другу. После этого в качестве второго действия должна решаться задача целераспределения выбранных заявок между назначенными ЛА.

Таким образом, предлагается следующий единый подход к оперативному планированию, основанный на выполнении двух главных действий – назначения при  $S > d$  на каждом шаге приоритетного множества заявок при их избытке с целью их ранжирования и выбора их части с числом, равным  $d$ , либо назначение при  $S < d$  приоритетного множества ЛА, как из свободных, так и занятых, и целью ранжирования их избыточного числа и выбор их части с числом, равным  $p$ . После этого выполняется второе действие – целераспределение выбранных заявок между назначенными ЛА с помощью известного алгоритма, либо специального, описанного ниже. Рассмотрим перечисленные действия подробнее с обязательным учетом возможности использования занятых ЛА.

При выполнении первого действия в случае избытка новых заявок, когда  $S > d$ , предлагается вычисления для каждой из них динамического приоритета  $\Pi_1(j)$ :

$$\Pi_2(i) = \min_{i=1, \dots, d} \sum_{j=1}^S \frac{r_{ij}}{\tau_j} \quad (4.9)$$

$$\Pi_2(v) = \min_{v=d+1, \dots, N} \sum_{j=1}^S \frac{R_{vj}}{\tau_j}, \quad (4.10)$$

где  $R_{vj} = r_{vi} + r_{ej}$  – сумма расстояний между  $v$ -тым занятым ЛА и обслуживаемым пунктом  $i$  и от него – до анализируемого пункта  $j$ . В результате из  $N$  полученных оценок выбирается  $d$  первоочередных новых заявок, имеющих максимальный приоритет – столько же, сколько имеется

свободных ЛА. Однако, части этих заявок может предписываться использование занятых ЛА.

В случае избытка свободных ЛА, когда  $d > S$ , вычисляется другой динамический приоритет  $P_2(i)$  для всех ЛА, как занятых, так и свободных по формулам

$$P_1(j) = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_j}{\min_{i=1, \dots, d} r_{ij}} \\ \frac{\tau_j}{\min_{v=d+1, \dots, N} R_{vj}} \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Казалось бы, свободных ЛА и так больше, чем заявок, и поэтому занятые ЛА можно не учитывать. Однако, и в этой ситуации один занятый ЛА может оказаться гораздо ближе, чем множество свободных, но удаленных ЛА. Поэтому также после ранжирования всех ЛА в списке первоочередных могут оказаться как те, так и другие, после чего остается  $S$  претендентов на участие в задаче целераспределения.

При выполнении второго действия при целераспределении заявок между ЛА возможны 3 случая:

- в список первоочередных ЛА не попал ни один свободный ЛА. Обозначим число попаданий через  $P$ . Тогда при  $P = 0$  любое целераспределение отсутствует, и значения  $S$  и  $d$  остаются неизменными, т. е.

$$d_{k+1} = d_k; S_{k+1} = S_k;$$

- в список попал один свободный ЛА, для которого в первом действии уже выбрана нужная заявка ( $P=1$ ). Это и есть нужный ответ на  $k$ -том шаге целераспределения, после чего новое состояние на следующий шаг равно  $d_{k+1} = d_k - 1; S_{k+1} = S_k - 1;$

- в список попали два и более свободных ЛА ( $P>1$ ), которые нуждаются в *групповом целераспределении*, после чего состояние системы станет равным  $d_{k+1} = d_k - P; S_{k+1} = S_k - P$ . При этом значение  $P$  в общем случае группового распределения лежит в пределах  $P = 2, \dots, \min(S, d)$ .



Алгоритм содержит 7 блоков. Блок 1 выявляет необходимые ситуации, когда в принципе есть как заявки, так и свободные ЛА при  $S > 0$ ,  $d > 0$ . Блоки 2 и 3 вычисления динамических приоритетов заявок и используемых ЛА отличаются тем, что учитывают возможности всех ЛА, а затем после ранжирования в списке остаются претенденты, число которых равно  $\min(S, d)$ . Действие блока 4 указывает, что необходимо различать ситуации при  $P = 1$  (когда происходит фактическое целераспределение) от случаев  $d = 1$  или  $S = 1$  (когда обнаруживается лишь факт существования единственного претендента из пары «заявка – ЛА»). В блоке 5 фиксируется уже намеченное назначение свободного ЛА для одной заявки в то время, как в блоке 6 устанавливается факт исключения действий на очередном шаге планирования.

Наибольший интерес представляет блок 7 группового целераспределения при одинаковом числе участников, его действия рассмотрены ниже. Единство предложенного подхода подтверждается тем, что он включает в себя следующие частные случаи:

- при  $N = 1$  первое действие осуществляется только с помощью блока 2, и при  $P = 1$ , процедура группового целераспределения отсутствует, что соответствует известной задаче о коммивояжёре при одномерной маршрутизации;

- при  $N = d = S$ , когда нет занятых ЛА, решается только одна задача целераспределения, а первое действие отсутствует, что соответствует классической задаче распределения ресурсов, а в решаемой задаче в первую очередь соответствует предложенному планированию.

#### **4.3.4 Предлагаемый подход к решению задачи и оценке его эффективности**

Как показано в [2,3], задачах обслуживания заявок на групповые полеты по перевозке пассажиров, почты и грузов при отсутствии регулярного

расписания вследствие слабой предсказуемости объёмов перевозок наиболее эффективное планирование перевозок достигается при использовании генетического алгоритма с целераспределением заявок как между свободными, так и занятыми ЛА. Такой подход включает:

– формирование первоначальной «элиты» многомерных маршрутов при неоднократном использовании разных вариантов критерия назначения первоочередных заявок на каждом шаге маршрутизации с помощью следующего динамического приоритета  $\Pi_j$ , включая нормированные значения параметров

$$\Pi_j = \max_{j=1\dots N} \left[ \frac{r_{min}}{r_{ij}} + m_1 \right] \left[ \frac{\tau_j}{\tau_{max}} + m_2 \right] \quad (4.12)$$

где:  $r_{ij}$  – расстояние от начала маршрута по  $j$ -й заявке до расчетного промежуточного пункта  $i$ -го маршрута;

$r_{min}$  - минимальное расстояние между пунктами;

$\tau_j$ - время ожидания заявки в очереди;

$\tau_{max}$  – максимально допустимое время ожидания;

$m_1$  и  $m_2$  - весовые коэффициенты значимости сомножителей (чем меньше значение  $m_1$ , тем важнее первый сомножитель при условии, что  $m_1 + m_2 = 1$ )., значения которых заранее неизвестны. Это требует рассмотрения множества этих значений с помощью следующей операции:

- множество сформированных маршрутов  $M$  разбивается на ряд блоков, содержащих минимум две или более заявок, после чего, в результате их «скрещивания» и частичных перестановок образуется расширенное множество «потомков». Завершающей операцией является генетический отбор лучшего решения с помощью интегральной штрафной функции  $J_v$  оценки его эффективности, учитывающей зачастую противоречивые интересы исполнителей и заказчиков

$$J_v = \min_{v=1 \dots MN} \left[ \left( \max_{i=1 \dots N} \frac{\eta_i}{T_{\max}}(v) + m_1 \right) \left( \frac{\sum_{i=1}^N L_i(v)}{L_{\max}} + m_2 \right) \right] \quad (4.13)$$

где:  $J_v$  - интегральная штрафная функция;

$v$  - номер варианта решения после «скрещивания» и «мутации»;

$T_{\max}$  - максимальное время ожидания выполнения заявки;

$L_{\max}$  - максимальная суммарная длина пути всех ЛА;

$L_i(v)$  - длина пути каждого маршрута в  $i$ -м варианте;

$\max \eta_i(v)$  — максимальное время нахождения заявки в очереди в  $v$ -м

варианте.

Далее получим оценку эффективности целераспределения заявок с помощью генетического алгоритма и подхода целераспределения в сравнении с другими известными методами.

Для решения поставленной задачи будем использовать результаты компьютерного моделирования. Использование генетического привело к:

– первый вариант — максимальное время ожидания всех маршрутов  $T_{\max} = 187$  из всех 12-и значений, а длина пути соответственно  $L_1 = 27$ ,  $L_2 = 29$ ,  $L_3 = 30$ . Среднее значение эксплуатационных затрат  $T_{cp} = 29$ , а интегральная штрафная функция  $J_v = 13020$ ;

- второй вариант —  $T_{\max} = 165$ ,  $T_{cp} = 34$ ,  $J_v = 12500$ ;

- при генетическом отборе —  $T_{\max} = 155$ ,  $T_{cp} = 36$ ,  $J_v = 11470$ .

В результате сравнения результатов разница оказалась мала. Поэтому предлагается назначать масштабные коэффициенты без генетического алгоритма один раз экспертным путем, при этом  $m_2$  много меньше  $m_1$ .

#### **4.3.5 Планирование кратковременных перелётов малой авиации при эвакуации вследствие чрезвычайной ситуации.**

На рис. 4.10 представлена ситуация в районе наводнения. Обслуживаемые пункты находятся на расстоянии, которое значительно больше пути до базы сосредоточения эвакуированного населения. Точками А

и В отмечены места стоянок ЛА перед вылетом, знаком О — пункты прилета в безопасное место. Линиями показаны перелеты: пунктирные — кратковременные при эвакуации; непрерывные — планируемые при маршрутизации при ситуации обслуживания восьми пунктов.

Высокими потенциальными рисками отмечены островные пункты 2, 3, 6 и 7. Данные о координатах ( $X_j$ ,  $Y_j$ ) пунктов и стоянок известны. Расстояние между любыми двумя пунктами не более 50 км, до пунктов эвакуации не более 10 км. Скорость полета принимаем 120 км/ч (2 км/мин).

Важной информацией для решения задачи являются данные о времени ожидания  $\tau_j$  каждой заявки в очереди, которые зависят от степени опасности. Значения  $\tau_j$  для восьми заявок представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 Данные по времени ожидания в очереди на эвакуацию

j	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau_j$ (мин)	10	20	100	75	70	100	40	50

Также дано:

1.  $n = 8$  - число объектов
2.  $N = 2$  – число ЛА
3. Координаты ЛА –  $x_A = 0; z_A = 0; x_B = 115; z_B = 40$

Тогда согласно предложенному подходу:

1. Весь процесс эвакуации состоит из  $n/N$  шагов.
2. На каждом шаге  $K$  выполняются две операции – ранжирования НО и целераспределения наиболее приоритетных между ЛА
3. Расчеты проводятся с помощью 6 формул:

$$\begin{aligned} \Delta t_j(k) &= H_{kp} - H_j, \\ l_j(k) &= \sqrt{(\eta_j - x_k)^2 + (\xi_j - z_k)^2}, \\ \Pi_j(k) &= \frac{\Delta t_j^2(k)}{l_j(k)} \end{aligned} \quad (4.14)$$



$$x_k = \frac{\eta_{j^*}(k) + \eta_{j^{**}}(k)}{2}; z_k = \frac{\xi_{j^*}(k) + \xi_{j^{**}}(k)}{2},$$

$$H_j(k) = H_j(k-1) - \frac{V_B * l_{cp}(k)}{V_{ЛА}},$$

$$l_{cp}(k) = 0.5 (l_{j^*}(k) + l_{j^{**}}(k)).$$

где:

$$V_{ЛА} = 1.5 \text{ (км/мин)} \quad V_B = 0.03 \text{ (м/мин)}$$

При сравнении результатов, полученных в различных вариантах маршрутизации, оказалось, что учет свободных и занятых летательных аппаратов не повлиял на окончательное движение вертолетов, и показанные на рис. 4.13 маршруты совпадают с маршрутами, получаемыми без учета занятости.

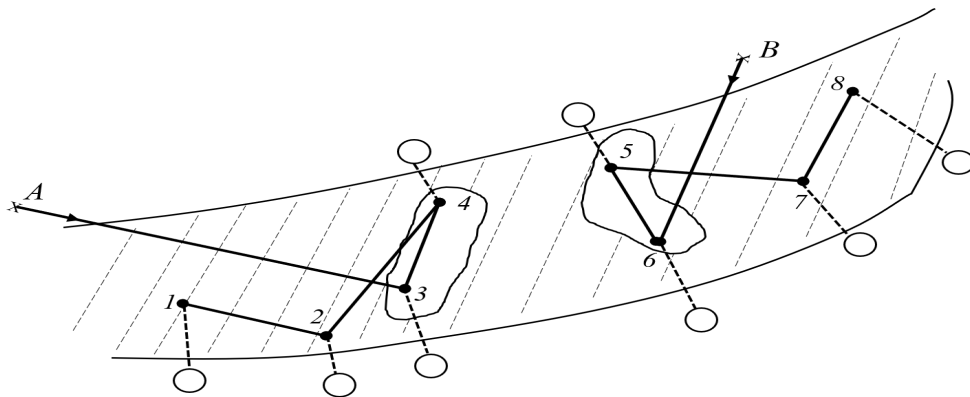


Рисунок 4.13 Картина расположения наземных пунктов в районе наводнения и их обслуживание без учета занятых ЛА

#### 4.3.6. Результаты дополнительного компьютерного моделирования процесса обслуживания 6 пунктов в районе наводнения

Рассмотрим первый случай расположения 6 объектов, показанный на рис. 4.11.

Ниже представлены следующие результаты назначения приоритетов обслуживаемых пунктов и маршруты полетов пилотируемых вертолетов при их целераспределении. Всего было выполнено 6 шагов выбора

первоочередной пары пунктов эвакуации и их распределение между двумя вертолетами. До этих действий таблица исходных данных по состоянию вертолетов (их занятости)  $C_i$  и пунктов (по их обслуживаемости)  $D_i$  представлена двумя таблицами.

Таблица 4.4 Исходные данные для вертолетов ( $C_1, C_2=0$ ).

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	0	10	0
2	0	10	0

Оба вертолета свободны.

В табл. 4.5 показано состояние 6 пунктов до обслуживания. В начале работы алгоритма пункты не обслужены ( $d_i=0$ ).

Таблица 4.5 Исходные данные 6 пунктов ( $D_i=0$ )

$j$	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	0
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	15	0	1.2	0
5	15	5	1	0
6	20	10	0.8	0

Это состояние системы до обслуживания пунктов. Затем, на первом шаге выбираются 2 наиболее приоритетных пункта. (№1 и №4) (рис. 4.14).

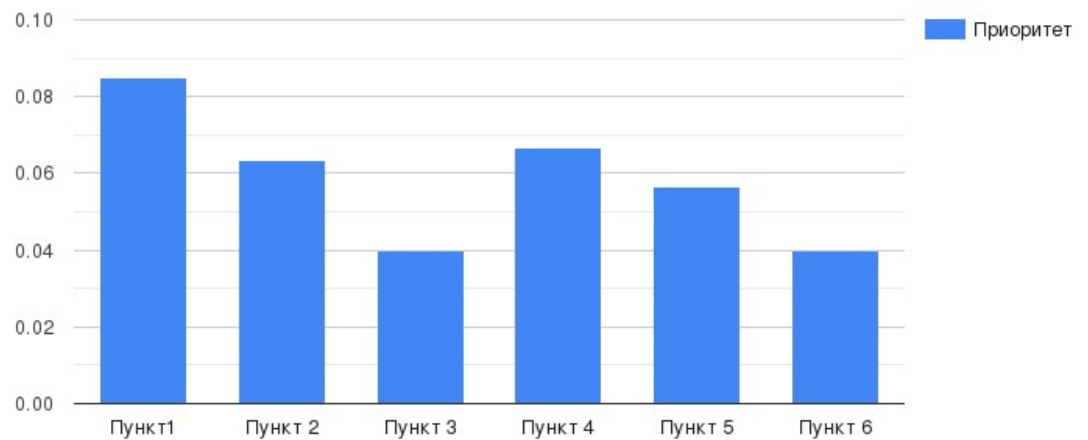


Рисунок 4.14 Диаграмма значений приоритетов

После выбора пунктов решается задача первого целераспределения. Оказалось, что подлежащим целераспределению в первую очередь являются пункт №4. ( $d=1$  для пункта №4). Пункт обслуживает вертолет №1 ( $c_1=1$ ).

Таблица 4.6 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 1.

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	15	0	1
2	0	10	0

Таблица 4.7 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 1.

$j$	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	0
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	15	0	1.2	1
5	15	5	1	0
6	20	10	0.8	0

В результате первого шага вертолет №1 оказался занятым, а вертолет №2- свободным.

На втором шаге целераспределения эта разница учитывается, и для пункта №1, несмотря на близость занятого вертолета, пункт №1 обслуживается вертолетом №2, что видно в табл. 4.8 и 4.9.

Таблица 4.8 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 2.

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	15	0	0
2	-10	0	1

Таблица 4.9 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 2.

j	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	15	0	1.2	1
5	15	5	1	0
6	20	10	0.8	0

Далее выбирается следующая пара наиболее приоритетных пунктов (№2 и №5) (рис. 4.15). На первом шаге целераспределения был выбран пункт №2. Он будет обслужен вертолетом №2.

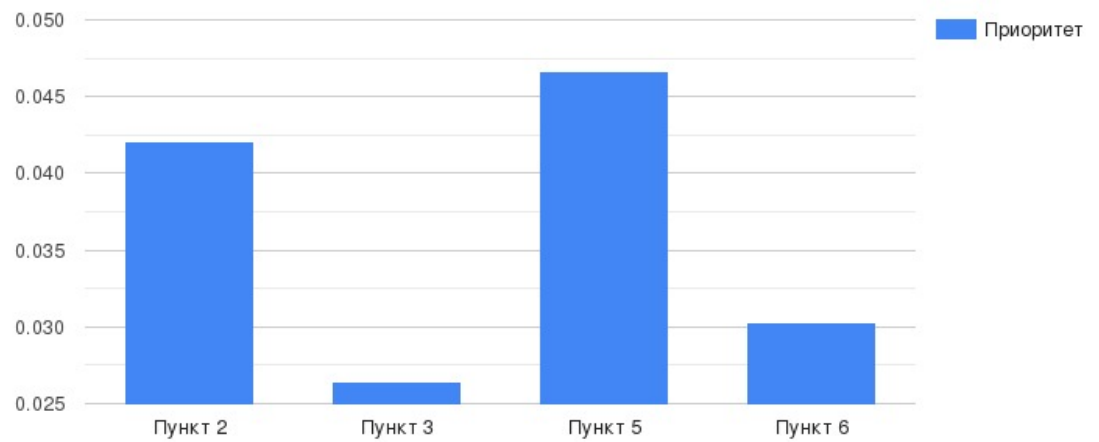


Рисунок 4.15 Диаграмма значений приоритетов необслуженных пунктов после обслуживания пункта №1 и пункта №4.

Таблица 4.10 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 3.

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	15	0	0
2	-15	5	1

Таблица 4.11 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 3.

$j$	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	0
4	15	0	1.2	1
5	15	5	1	0
6	20	10	0.8	0

Для обслуживания пункта №5 был выбран вертолет №1.

Таблица 4.12 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 4.

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	15	5	1
2	-15	5	0

Таблица 4.13 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 4.

j	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	0
4	15	0	1.2	1
5	15	5	1	1
6	20	10	0.8	0

Из оставшейся пары пунктов также выбирается подлежащий целераспределению в первую очередь. Это пункт №3. Его обслуживает вертолет №2 (табл. 4.14 и табл. 4.15)

Таблица 4.14 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 5.

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	15	5	0
2	-20	10	1

Таблица 4.15 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 5.

j	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	1
4	15	0	1.2	1
5	15	5	1	1

6	20	10	0.8	0
---	----	----	-----	---

Пункт №6 будет обслужен вертолетом №1, что показано в табл. 4.16 (C1=1).

Таблица 4.16 Таблица данных о текущем состоянии ЛА после обслуживания всех пунктов.

i	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>
1	20	10	1
2	-20	10	0

Состояние пунктов после обслуживания продемонстрировано в табл. 4.17.

Таблица 4.17 Таблица данных о текущем состоянии пунктов после обслуживания всех пунктов.

j	X <sub>i</sub>	Y <sub>i</sub>	τ <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	1
4	15	0	1.2	1
5	5	15	1	1
6	20	10	0.8	1

В общем результате приоритетного целераспределения оказывается, что маршруты перелетов имеют вид, показанный на рисунке 4.16.

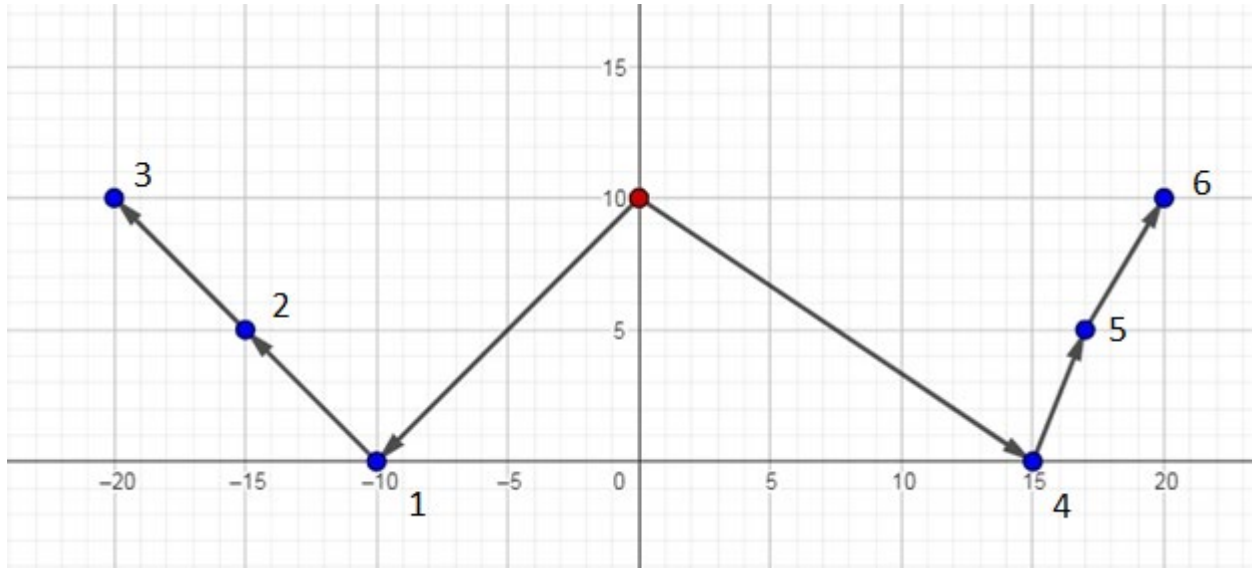


Рисунок 4.16. Маршруты летательных аппаратов в первом случае расположения объектов.

На рис. 4.16 видно, что **учет свободных и занятых летательных аппаратов также не повлиял на окончательное движение** вертолетов, и их маршруты совпадают с маршрутами, получаемыми без учета занятости.

Рассмотрим второй вариант распределения пунктов на территории, **когда определенная группа пунктов находится в большой близости друг с другом** (пункты №1 и №4), а остальные – в отдалении.

В табл. 4.18 и 4.19 показаны координаты и состояние пунктов и летательных аппаратов до обслуживания.

Таблица 4.18 Состояние ЛА до обслуживания пунктов.

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	0	10	0
2	0	10	0

Таблица 4.19 Состояние пунктов до обслуживания ( $D_i=0$ ).

$j$	$X_i$	$Y_i$	$\tau_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	0
2	-15	5	1	0



3	-20	10	0.8	0
4	5	0	1.2	0
5	10	10	1	0
6	20	10	0.8	0

Затем, на первом шаге также выбираются 2 приоритетных пункта (№1 и №4). После выбора пунктов решается задача первого целераспределения. Оказалось, что подлежащим целераспределению в первую очередь является пункт №4. (табл. 4.20) ( $D=1$  для пункта №4). Пункт обслуживает вертолет №1 ( $c_1=1$ ).

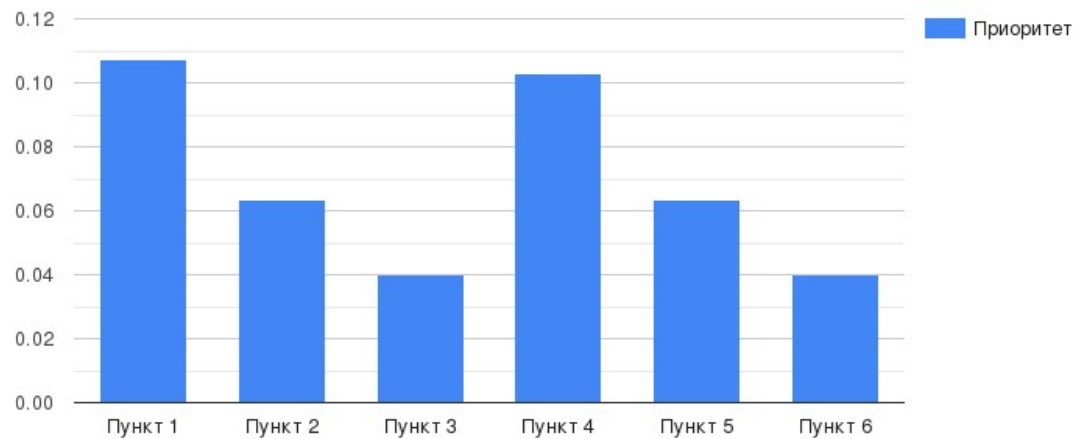


Рисунок 4.17 Диаграмма значений приоритетов

Таблица 4.20 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 1.

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	5	0	1
2	0	10	0

Таблица 4.21 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 1.

j	$X_i$	$Y_i$	$B_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	0
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	0
6	20	10	0.8	0

Далее, на втором шаге целераспределения, несмотря на то, что вертолет №1 является занятым, а вертолет №2 – свободным, пункт №1 будет обслужен вертолетом №1, тк это сократит общую длину маршрута. (табл. 4.22 и 4.23)

Таблица 4.22 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 2

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	5	0	1
2	10	10	0

Таблица 4.23 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 2

j	$X_i$	$Y_i$	$B_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	0
6	20	10	0.8	0

На следующем шаге была выбрана вторая пара наиболее приоритетных для обслуживания пунктов (пункт №2 и пункт №5) (рис. 4.19). Первым

подлежащим целераспределению пунктом оказался пункт №5. Его обслуживает вертолет №2. (табл. 4.24 и 4.25)

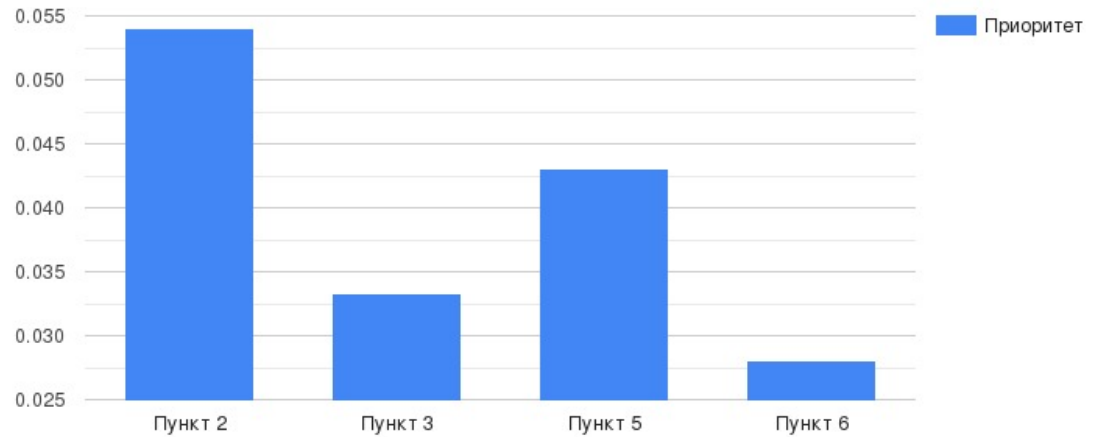


Рисунок 4.18. Диаграмма значений приоритетов необслуженных пунктов после обслуживания пункта №1 и пункта №4.

Таблица 4.24 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 2

$i$	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	-10	0	0
2	10	10	1

Таблица 4.25 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 3

$j$	$X_i$	$Y_i$	$B_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	0
3	-20	10	0.8	0
4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	1
6	20	10	0.8	0

Пункт №2 обслуживается вертолетом №1 (табл. 4.26 и 4.27)

Таблица 4.26 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 4

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	-10	0	1
2	20	10	0

Таблица 4.27 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 4

j	$X_j$	$Y_j$	$B_j$	$D_j$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	0
4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	1
6	20	10	0.8	0

Среди оставшихся двух пунктов выбирается подлежащий целераспределению первым(пункт №3). Его обслуживает вертолет №1 ( $C_1=1$ ) (табл. 4.28 и 4.29)

Таблица 4.28 Таблица данных о текущем состоянии ЛА на шаге 5

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	-20	10	1
2	20	10	0

Таблица 4.29 Таблица данных о текущем состоянии пунктов на шаге 5

j	$X_j$	$Y_j$	$B_j$	$D_j$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	1

4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	1
6	20	10	0.8	0

Пункт № 6 обслуживается вертолетом №2.

После обслуживания всех пунктов таблицы координат и состояния ЛА и пунктов выглядят следующим образом:

Таблица 4.30 Таблица данных о состоянии ЛА после обслуживания 6 пунктов

i	$X_i$	$Y_i$	$C_i$
1	-20	10	0
2	20	10	1

Таблица 4.31 Таблица данных о состоянии пунктов после обслуживания ( $D_i=1$ ).

j	$X_i$	$Y_i$	$B_i$	$D_i$
1	-10	0	1.2	1
2	-15	5	1	1
3	-20	10	0.8	1
4	5	0	1.2	1
5	10	10	1	1
6	20	10	0.8	1

В результате работы алгоритма, маршруты ЛА будут выглядеть следующим образом (**общая длина пути меньше, чем на рис. 4.16 и, кроме того, время обслуживания пунктов 1 и 4 уменьшилось в 1,3-1,5 раза при использовании занятых ЛА как показано рис. 4.19**).

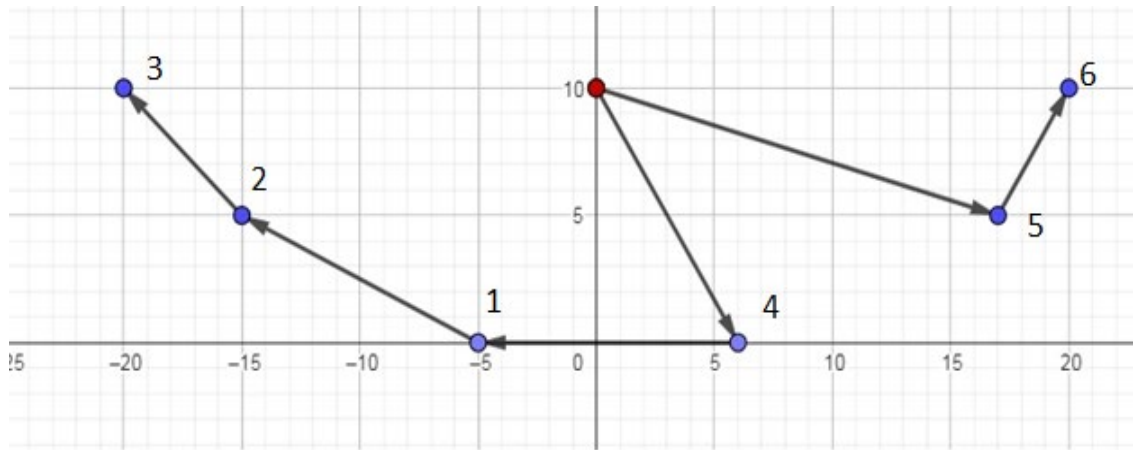


Рисунок 4.19 Маршруты обслуживания во втором случае.

Для количественной оценки выигрыша проведем сравнение двух значений качества обслуживания при эвакуации. При этом будем считать, что наиболее важным фактором при оценке качества является скорость эвакуации т.е. второй фактор, поэтому в мультипликативной свертке зададимся значениями  $m_1=0.9$ ,  $m_2=0.1$ . Тогда в первом случае оценка качества обслуживания без учета занятых ЛА имеет вид:

$$J_0^I = \left( \frac{1}{1 + 1.1\mathfrak{E}} + m_1 \right) \left( \frac{1}{1 + 1.5\tau} + m_2 \right) \quad (4.15)$$

Во втором случае при использовании как свободных, так и занятых ЛА получим:

$$J_0^{II} = \left( \frac{1}{1 + \mathfrak{E}} + m_1 \right) \left( \frac{1}{1 + \tau} + m_2 \right) \quad (4.16)$$

Это позволяет найти отношение оценок 4.16 к 4.15 и тем самым определить выигрыш  $V=1.3$ .

#### 4.4 Оценка возможности применения беспилотной авиации для почтовых перевозок с высоким качеством обслуживания

##### 4.4.1 Постановка задачи

Одной из важных практических задач является использование легкой беспилотной авиации для почтовых перевозок в труднодоступных районах для

наземного транспорта [86]. В качестве постановки задачи можно указать следующие допущения:

К одному из допущений относится наличие двух видов почтовых перевозок – высокоскоростной почты для отдаленных районов и более дешевых видов беспилотной авиации для перелетов на малые расстояния (рис. 4.20):

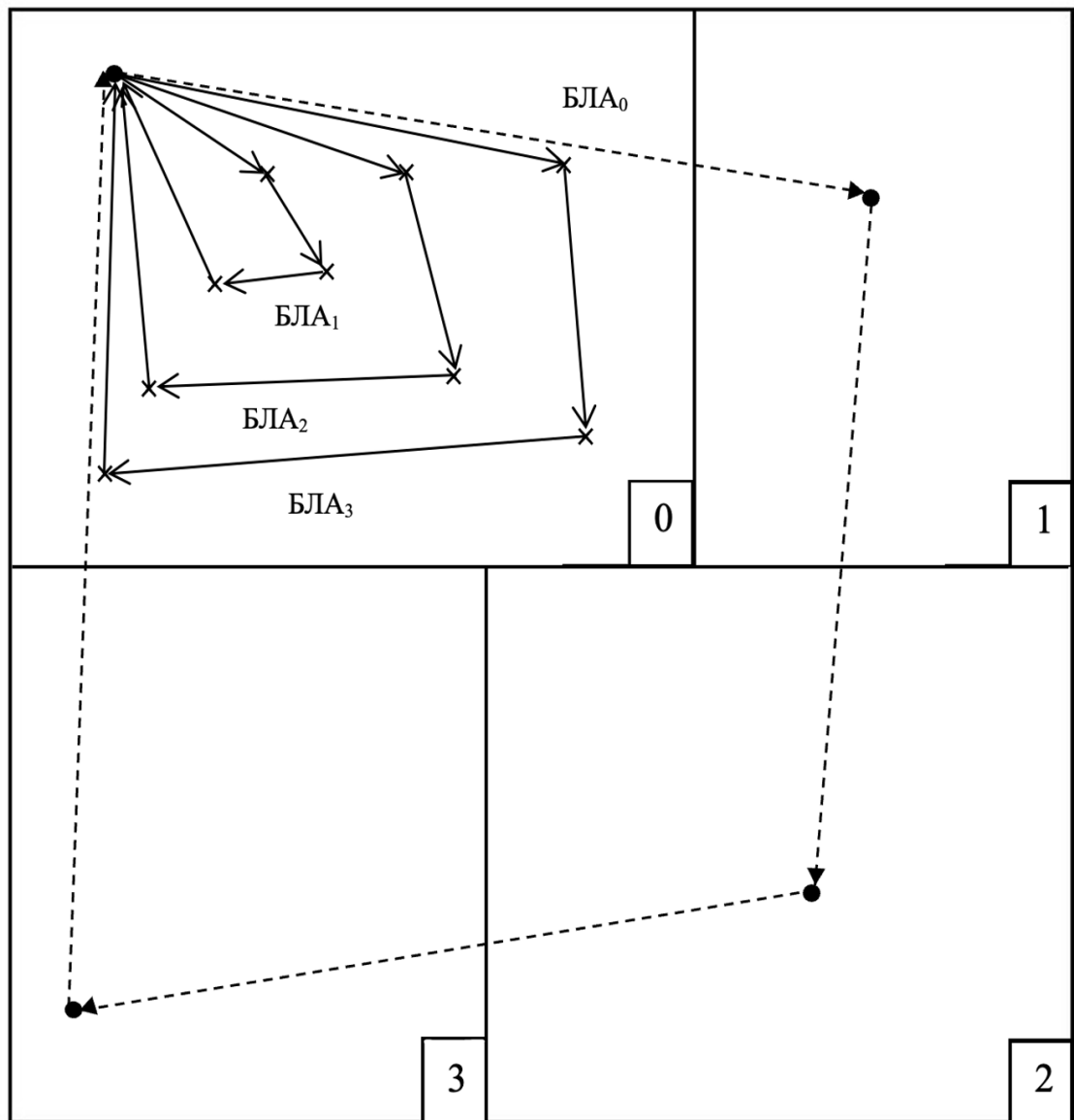


Рисунок 4.20 Пример почтовых перевозок в своём и отдалённых районах с помощью группы БЛА.

- пересылка большой по объёму почты в другие сектора района (рис. 4.20
- это сектора 1, 2, 3) с помощью БЛА<sub>0</sub>, имеющего повышенную скорость  $\Delta V_0$

полёта и увеличенный вес полезной нагрузки, когда после посещения каждого сектора добавляется почта в следующие сектора;

- перелёты группы лёгких БЛА (например БЛА<sub>1</sub> и БЛА<sub>2</sub>) внутри своего сектора с «рассылкой» множества писем “n” по указанным адресам с возвращением в «своё» почтовое отделение с координатами  $x_0, y_0$ .

#### **4.4.2 Решение задачи планирования перелётов**

Решение задачи находится с помощью трех следующих действий, когда в качестве входных данных задаются начальные координаты ЛА, координаты пунктов, требующих обслуживания, а также их априорные приоритеты пунктов. В первом действии вычисляются приоритеты всех необслуженных пунктов, выявляется группа наиболее приоритетных пунктов, которые впоследствии будут целераспределены. Эти пункты будут подлежать целераспределению в первую очередь. Во втором действии по минимаксному критерию среди двух наиболее приоритетных пунктов выявляется пункт, подлежащий целераспределению первым, и к нему направляется ближайший летательный аппарат. В третьем действии осуществляется пересчет координат местоположения ЛА после их очередного перелета.

Блок-схема работы алгоритма представлена на рис. 4.21.



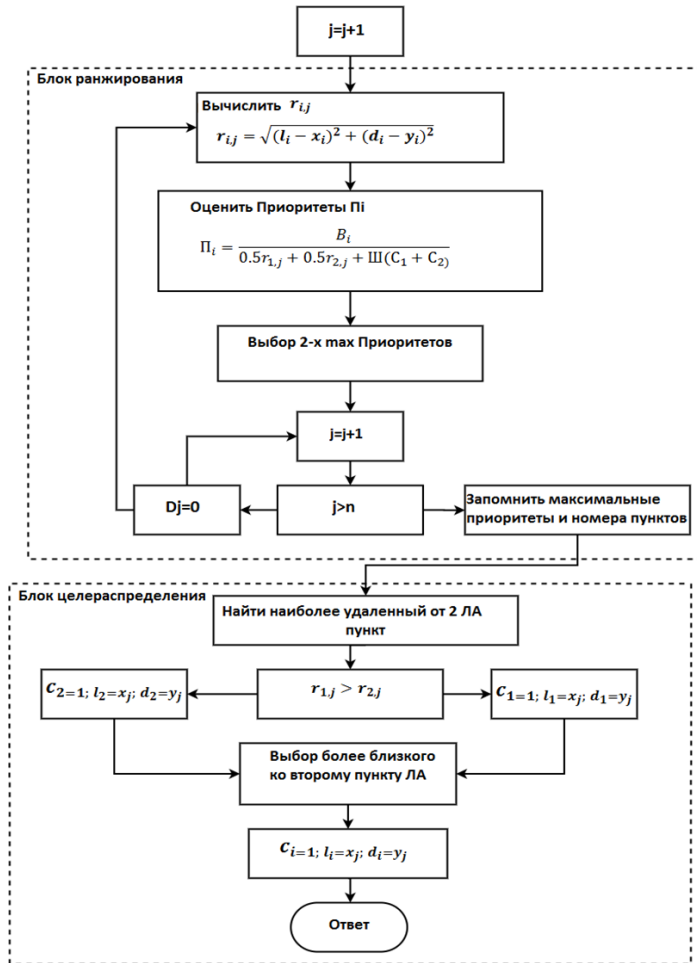


Рисунок 4.21 Блок-схема работы алгоритма.

В этом алгоритме ниже представлены конкретные вычислительные операции отдельных блоков алгоритма (рис .4.22).



Рисунок 4.22 Выбор наиболее удаленной заявки от свободных ЛА.  
На рис. 4.23 показан другой блок.



Рисунок 4.23 Выбор ближайшего к  $j$ -й заявке свободного ЛА.

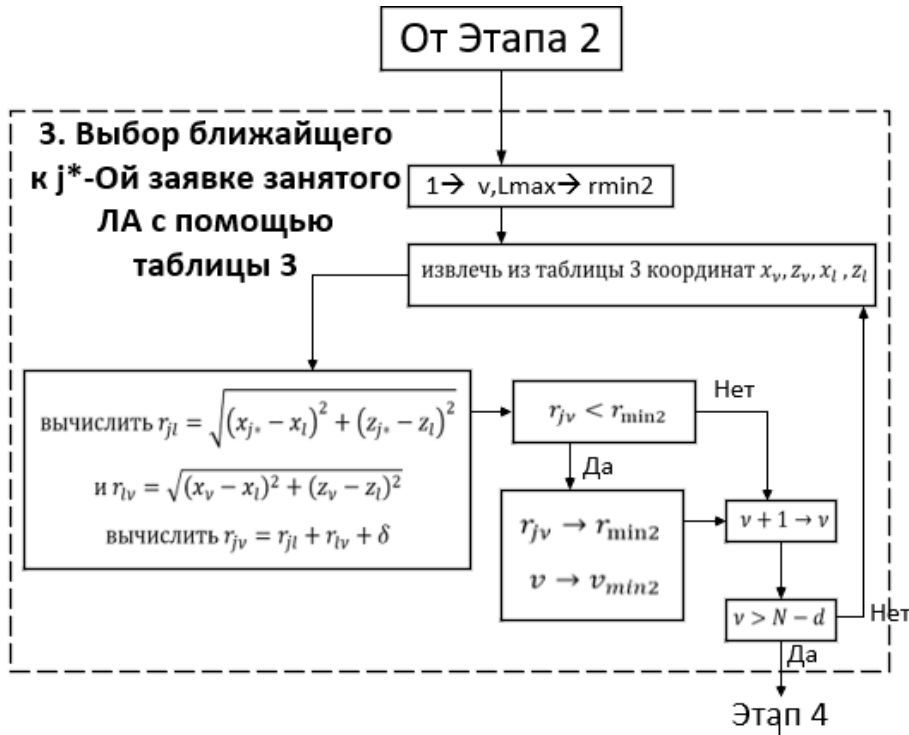


Рисунок 4.24 Выбор ближайшего свободного ЛА.



Рисунок 4.25 Исключение из таблиц результатов выбора для заявки  $j$ .

**В первом случае пересылки почты в отдаленные районы** число используемых БЛА может быть невелико (по максимуму - это число отдалённых зон в указанном районе) и так как в число почтовых отделений мало, то маршрутизация перелётов тривиальна и не представляет проблемы (на рисунке маршрут перелёта БЛА<sub>0</sub> показан пунктиром).

**Зато во втором случае рассылки почты в ближайшем районе** число “n” писем, присланных из разных секторов, весьма велико, а число “N” беспилотников зависит от имеющегося спроса или потока заявок на перелёты.

Тогда, действуя по критерию назначения приоритетов

$$P_{ij} = \max \frac{\tau_i}{r_{ij}}, \text{ где } i = 1, \dots, N - \text{номер БЛА} \quad (4.17)$$

можно составить матрицу в виде табл. 4., показанную ниже, если известны исходные данные задачи в виде табл. 4. и табл. 4..

Тогда

$$r_{ij} = \sqrt{(\alpha_i - x_j)^2 + (\beta_i - y_j)^2} \quad (4.18)$$

Иными словами, есть две таблицы: табл. 4. для писем и табл. 4. для БЛА.

Таблица 4.32 Данные адресатов

j	x <sub>j</sub>	y <sub>j</sub>	τ <sub>j</sub>
1			
2			
...			
j			
...			
n			

Таблица 4.33 Данные местоположения БЛА

i	$\alpha_i$	$\beta_i$
1		
2		
N		

В итоге формируем матрицу приоритетов (табл. 4.34) после ранжирования  $n^*=N$ .

Таблица 4.34.

i \ j	1	$j^*$	$n^*$
1			
...			
N			

А) Выбираем столбец  $j^*$   $\Delta\Pi_j = \min_j \sum_{i=1}^{n^*} \Pi_{ij}$ ;

Б) В столбце  $j^*$  ищем  $\Delta\Pi_{ij^*} = \max_i$ .

Ответом при использовании выбранного минимаксного алгоритма маршрутизации являются показанные непрерывными линиями маршруты перелётов двух БЛА.

Теперь можно перейти к сравнению качества почтовых перевозок с помощью БЛА с другими вариантами обслуживания [80, 81, 89, 90компьют]. В частности, для территорий труднопроходимыми маршрутами для сухопутного транспорта будем считать, что в этом случае возможно использование пилотируемой «малой» вертолётной авиации. Соответственно очевидно, что эксплуатационные затраты (в том числе и расходы топливо) для БЛА по крайней мере на порядок меньше, чем эксплуатационные расходы “Э<sub>ж</sub>” для вертолётов, а скорости полёта  $\Delta V_{\text{БЛА}} = 10 \div 15$  м/сек уступают скорости  $\Delta V_{\text{в}} = 50$

м/с всего лишь в несколько раз. Это значит, что время ожидания при получении писем сократится аналогичным образом.

Тогда, действуя по аналогии с §4.1.3, получаем для мультипликативной формы оценки качества, следующий результат. Будем считать, что эксплуатационные затраты на почтовые перевозки с помощью малой авиации на порядок больше, чем затраты на обслуживание с помощью беспилотной авиации (т.е. их отношение равно 10). В свою очередь, учитывая разницу в скоростях полета пилотируемого вертолета и БЛА, будем считать, что отношение этих скоростей равно 4. Тогда получим:

- для известного подхода без использования БЛА:

$$Y_0 = \left( \frac{1}{1 + \varepsilon_{\text{ж}}} + m_1 \right) * \left( \frac{1}{1 + \tau_{\text{ж}}} + m_2 \right) \quad (4.19)$$

- для предложенного подхода с помощью БЛА:

$$Y_m = \left( \frac{1}{1 + 0,1 * \varepsilon_{\text{ж}}} + m_1 \right) * \left( \frac{1}{1 + 4 * \tau_{\text{ж}}} + m_2 \right) \quad (4.20)$$

Поэтому, если считать, что более важна скорость обслуживания при почтовых перевозках (а это значит, что  $m_2=0,2$ , а  $m_1=0,8$ ), то тогда **общий выигрыш “В” в качестве обслуживания составляет 1,4. Это означает, что, по существу, беспилотная почтовая авиация более выгодная за счет малых эксплуатационных затрат.**

#### 4.5 Результаты внедрения предложенного подхода

Среди наиболее актуальных задач обеспечения максимального качества обслуживания в полете особое место занимают наиболее ответственные этапы полета малой авиации при взлете и посадке, а также при возникновении опасных ситуаций при встрече различного рода препятствий в самом полете. Во всех перечисленных случаях первостепенным является обеспечение безопасности полета не только малой, но и беспилотной авиации. Для контроля безопасности группового полета БЛА важен его контроль с

помощью ручного управления, когда сам перелет БЛА состоит из нескольких участков выполнения простых полетных операций – разворот по курсу, изменение высоты полета, прямолинейный полет с указанной скоростью и т.д. Для логического контроля правильности выполнения группового маршрутного полета была разработана программа автоматического формирования любого перелета на ряд участков с помощью назначения промежуточных пунктов (ППМ). Его работоспособность подтверждается актом о внедрении в АО «Кронштадт». В нем указано, что полученный алгоритм позволяет реализовать безопасный многорежимный полет и реализовать в реальном времени логику обхода препятствий, возникающих непосредственно в полете.

Также будет получен акт о внедрении в Центр Комплексирования «Иркут» в котором подтверждается метод оценки снижения риска при взлете и посадке малой авиации в сложных условиях с учетом использования на борту системы автоматического контроля безопасности и предупреждения экипажа об устранении возникающих угроз;

- способ получения общей оценки в мультипликативной форме качества обслуживания малой авиацией при их перелетах в режиме «воздушного такси».

Применение указанных результатов позволяет получить количественные оценки в унифицированной безразмерной форме как при определении коэффициента безопасности полета, так и при совместном дополнительном учете его экономичности. Также предложенный подход обеспечивает определение в виде одного числа ожидаемый положительный эффект от внедрения бортовой автоматизированной системы контроля безопасности полета, который может достигнуть 10÷15%.

Кроме того, полученные в данной работе результаты были использованы при выполнении 7 грантов РФФИ, в том числе - 15-08-00043 «Разработка принципов построения и алгоритмов интеллектуальной системы

нейросетевого и логического управления и навигации беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающей при множественных отказах и помехах безопасность одиночного и группового полета», 18-08-00463 «Разработка алгоритмического обеспечения для систем автоматического контроля безопасности, предупреждения и предотвращения опасных полётных ситуаций беспилотной и пилотируемой авиации», 19-08-00010 «Интеллектуальная система оперативного планирования маршрутов и графиков воздушного движения гражданской авиации при изменении метеоусловий, спроса пассажиров и потере навигационной точности воздушных судов в полёте» 20-08-00652 «Интеллектуальная система оперативного планирования групповых действий малой авиации при обслуживании потока заявок по вызову в режиме воздушного такси».

#### 4.6 Выводы по Главе 4

1. При оценке качества обслуживания **беспилотной авиацией** наблюдаемых наземных объектов **показано**, что оно существенно возрастает за счет снижения в 1,5-2 раза времени полного выполнения полетного задания при малом числе используемых свободных и занятых ЛА.

2. Рассмотрен пример обслуживания **малой авиацией** наземных объектов в случае спасения людей при наводнении **подтвердил**, что за счёт управления качеством обслуживания при сокращении времени ожидания начала эвакуации в каждом пункте **удается** повысить скорость ликвидации возрастающей угрозы и **обеспечить** безопасность людей в экстренных ситуациях.

3. **Установлено**, при встрече в полете летательных аппаратов с крупными препятствиями при управлении качеством обслуживания **необходимо использовать** в мультипликативной свертке оценки эффективности **дополнительный сомножитель**, оценивающий безопасность



их облета, чтобы ее гарантировать с учетом требуемой скорости обслуживания и допустимых эксплуатационных затрат.

4. Показано, что при использовании минимаксного критерия целераспределения ЛА между обслуживаемыми пунктами **минимизируется** число пересечений маршрутов, что также повышает безопасность группового полета.

5. Анализ рассмотренных примеров показал, что управление качеством должно выполняться в зависимости от разной интенсивности потока заявок и с учетом неодинаковых требований к скорости и экономичности их обслуживания. В результате учета этих факторов ответом в процессе управления качеством являются выбор числа ЛА, их типов и степени занятости в полете. В частности, при увеличении потока заявок соответствующим образом назначаются растущее оптимальное число ЛА, например, в задаче наблюдения наземных объектов. В задаче оценки качества действий малой авиации в чрезвычайных ситуациях более важным фактором является время ожидания в обслуживании, чем эксплуатационные затраты. В задаче групповых действий при почтовых перевозках в отдаленные районы используются высокоскоростные БЛА, а при перелетах на малые расстояния – более дешевые, легкие БЛА с меньшей скоростью полета. Во всех случаях инструментом выбора является мультипликативная оценка качества обслуживания, а общий выигрыш от применения предложенного подхода составляет в среднем 25%.

## Заключение

В работе решена актуальная научная задача, связанная с совершенствованием инструментария и процесса организации групповых действий летательных аппаратов беспилотной и малой авиации, имеющая существенное значение для развития управления качеством продукции, стандартизации и организации производства, как отрасли знаний.

Получены следующие основные результаты:

1. На основе проведённого научно-технического обзора и анализа проблемы обеспечения качества обслуживания заявок беспилотной и малой авиации в режиме воздушного такси, установлены основные критерии качества, такие как экономичность, скорость обслуживания и безопасность, а также сформулирован для использования в исследовании критерий мультипликативной формы оценки качества в специальном виде.

2. Предложена концепция организации и управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации, позволяющая улучшить качество организации групповых действий ЛА за счёт сокращения эксплуатационных затрат – время перелета уменьшилось на 21%, а также за счет сокращения времени ожидания в очереди заявки на обслуживание в 4 раза в сравнении с известными алгоритмами, при использовании минимаксного критерия при ранжировании и учете занятых ЛА при целераспределении. Данные результаты получены с помощью программного моделирования.

3. Предложена методика организации групповых действий беспилотной и малой авиации, позволяющая определить оптимальное количество летательных аппаратов в одном вылете, а также подобрать дисциплину обслуживания в зависимости от загрузки сети. Данная методика позволила сократить на 15÷20% число задействованных ЛА при сохранении требуемого качества обслуживания при выполнении транспортно-связных, санитарных, лесоавиационных работ, мониторинге местности и аэрофотосъемке, выполняемых АО «Авиакомпания «Баргузин», что подтверждено актом о внедрении.

4. Предложена методика оценки качества процесса групповых действий беспилотной и малой авиации, учитывающих специфику беспилотной и малой авиации, отличающуюся одновременным комплексным учётом различных показателей качества, позволяющие верно подобрать тип летательных аппаратов для выполнения различных задач. Применение предложенной методики в ПАО «Яковлев» - Центр комплексирования позволяет получить количественные оценки в унифицированной форме,

учитывающие экономичность и безопасность, а положительный эффект составляет 10-15%.

5. Разработана информационная система компьютерного моделирования как инструментарий оценки эффективности организации групповых малой и беспилотной авиации, а также их совместного использования в одном вылете, позволяющая получать количественные оценки групповых действий беспилотной и малой авиации для дальнейшего повышения качества групповых действий.

Главным результатом выполненного исследования является формирование мультипликативной формы оценки качества организации групповых действий летательных аппаратов в виде единого критерия эффективности, учитывающего различные факторы.

***Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.***

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять при решении задач повышения эффективности и качества процесса управления групповыми действиями беспилотной и малой авиацией, к которым предъявляются высокие требования по показателям эксплуатационных затрат, скорости обслуживания заявок и безопасности групповых действий ЛА в полёте.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является совершенствование методик и инструментария повышения эффективности и качества процесса управления планированием групповых действий беспилотной и малой авиации в различных режимах.

### Литература

1. Планирование траектории беспилотного летательного аппарата в сложных условиях при наличии угроз / М.А Андреев // Известия РАН. Теория и системы управления, 2012. № 2. С. 166-176.
2. Амусин Б. Летающие роботы / Б. Амусин, Е. Лосев // Армейский сборник. 2002. № 2. С. 38-41.
3. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. / Б. Банди – М., Радио и связь, 1988
4. Басовский, Л.Е. Управление качеством: Учебник / Л.Е. Басовский, В. Б. Протасьев. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 212 с.
5. Свод знаний по управлению бизнес-процессами. BPM СВОК 3.0: Учебное пособие / под ред. А.А Белайчук - Москва: Альпина Пабл., 2016. - 480
6. Биард Рэндал У., Малые беспилотные летательные аппараты. Теория и практика/ Биард Рэндал У., Маклэйн Тимоти У - Техносфера, 2022 - 312 стр
7. Благовещенский, Д. И. Новое руководство по FMEA: Функциональный анализ процессов / Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, В.Н. Козловский // Методы менеджмента качества. 2020. № 11. С. 30-35.
8. Бойко, А. А. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем / А. А. Бойко, И. С. Дегтярев // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2. – С. 245-266.
9. Бойцов Б., Прогнозирование долговечности напряженных конструкций. Комплексное исследование шасси самолета Издательство: Машиностроение, 1985, [Электронный ресурс] Б. Бойцов. – Режим доступа: [livelib.ru;](https://www.livelib.ru/author/600962/top-boris-bojtsov) <https://www.livelib.ru/author/600962/top-boris-bojtsov> [Дата обращения 16 марта 2024].

10. Бойцов Б. Согласование метрик качества при модернизации автоматизированной системы предприятия / Б. Бойцов, Артамонов, Денискин // Труды МАИ, Выпуск № 49, Файл\_old: 49-53
11. Борисова Л.В. Практические аспекты реализации процессного подхода в системе менеджмента качества / Л.В. Борисова, В.П. Димитров, О.В. Пантюхин // Тула - 2023.
12. Бьерн А. Бизнес-процессы инструменты совершенствования / А. Бьерн // РИА «Стандарты и качество» - 2003.
13. Васильев, В. А. Управление качеством / В. А. Васильев. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2022. – 160 с.
14. Васин, С. А. Решение вопросов качества продукции при дизайнпроектировании промышленных изделий / С. А. Васин, А. А. Кошелева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 41–46.
15. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
16. Воробьев В.Г. Автоматическое управление полетом самолетов / В.Г. Воробьев, С.В. Кузнецов - Москва - 1995.
17. Глудкин, О. П. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин; под. ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 600 с.
18. Гомзин А.В. Беспилотные летательные аппараты, представленные на «МАКС-2003» / А.В. Гомзин, Н.Ю. Шевелева // Изв. вузов. Авиационная техника. 2004. № 3. С. 3-6.
19. Гончаренко В.И. Задача оперативной двумерной маршрутизации группового полета беспилотных летательных аппаратов / В.И. Гончаренко,

Г.Н. Лебедев, Д.А. Михайлин // Известия РАН. Теория и системы управления - 2019. - №1. С. 153-166.

20. Гончаренко В.И. Задача целераспределения движущихся объектов при их наблюдении группой беспилотных летательных аппаратов / В.И. Гончаренко [и др.] // Нейрокомпьютеры и их применение. Сборник тезисов XXI Всероссийской научной конференции. Москва, - 2023. - С. 55-А.

21. Гончаренко В.И. Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории / В.И. Гончаренко [и др.] // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления.- 2021. - № 3. С. 64—81. DOI: 10.31857/S0002338821030057.

22. Гончаренко В.И. Многомерная маршрутизация с повышенной навигационной точностью при обслуживании заявок на полеты летательных аппаратов, / В.И. Гончаренко, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин // Научный Вестник МГТУ ГА Том 24, - №4 - 2021 г. - с 9.

23. Оперативное планирование групповых действий летательных аппаратов при обслуживании случайного потока поступающих в полете заявок / В.И. Гончаренко, Г.Н. Лебедев, Д.С. Мартынкевич, А.В. Румакина // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов. Сборник докладов XI Международной юбилейной научно-технической конференции. – 2021. – С. 321–326.

24. Гончаренко В.И. Планирование и координация маршрутов полета беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи / В.И. Гончаренко, А.В. Рожнов, Г.И. Теплов // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь: материалы 21-й Международной научной конференции (DCCN-2018, Москва). М.: РУДН, 2018. С. 220-229

25. Планирование съемки множества спортивных мероприятий на обширной территории группой беспилотных летательных аппаратов / В.И. Гончаренко [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование. - 2019. - Т. 15. - № 3. - С. 672-681.

26. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 22 с

27. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и подсистем. М.: Стандартиформ, 2010. – 23 с

28. ГОСТ 22315-77. Средства агрегатные информационно-измерительных систем. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 10 с.

29. ГОСТ 7.1 — 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. - 169

30. ГОСТ Р 56116-2014. Воздушный транспорт. Система менеджмента безопасности авиационной деятельности. Метрологические риски. Основные положения. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 8 с

31. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – М.: Стандартиформ, 2020. – 90 с

32. ГОСТ Р 7.0.11-2011. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу М.: Стандартиформ, 2018. – 15 с

33. ГОСТ Р ИСО 10004-2020. Менеджмент качества. Удовлетворенность потребителей. Руководящие указания по мониторингу и измерению. – М.: Стандартиформ, 2020. – 36 с

34. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М: ИПК Издательство стандартов, 2015. – 32 с

35. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 32 с.
36. Денискина А.Р. Качество пассажирской авиаперевозки как система процессов взаимодействия её участников / А.Р. Денискина, А.Б. Фомкин // Сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции / отв. ред. Е.В. Павлов, - 2014. - С. 159-164.
37. Дивак Н.И. Анализ структуры воздушного пространства МВЗ / Н.И. Дивак, Е.Е. Нечаев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации - 2015. - № 221 (11). - С. 13-17.
38. Доусон. М. Программируем на Python / М. Доусон // Санкт Петербург, 2011, - 416 с.
39. Евдокименков В.Н. Планирование групповых действий беспилотных летательных аппаратов в распределенной системе интеллектуального управления / В.Н. Евдокименков, С.В. Хохлов // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2022, - Т. 19, - №3, - С. 3-15.
40. Евдокименков В.Н. Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. / В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков, С.Д. Оркин. - М.: Изд-во МАИ, 2015. 271 с.
41. Ермаков П.Г. Программа для построения оптимального маршрута облета БВС вертолетного типа необорудованных вертодромов / П.Г. Ермаков, В.Н. Евдокименков, А.А. Гоголев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023682103, 23.10.2023. Заявка от 12.10.2023.
42. Ершова И.М. Инструментарий повышения качества продукции / И.М. Ершова, А.Р. Денискина // Управление качеством. избранные научные труды Девятнадцатой Международной научно-практической конференции.



Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). - Москва, 2020. - С. 105-110.

43. Зинина А.И. Алгоритм разработки методики по выполнению требований международного стандарта системы менеджмента качества 9100-2018 для выполнения НИОКР по проектированию и разработке авиационных систем и агрегатов / А.И. Зинина, А.Р. Денискина // Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения. тезисы 1-ой Международной научно-технической конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - Москва, 2022. - С. 159-161.

44. Каляев, И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян М: ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", - 2009. - 280 с.

45. Канушкин С.В. Синергетический подход в управлении группой беспилотных летательных аппаратов системы охранного мониторинга / С.В. Канушкин // Правовая информатика. – 2018 -№ 3. – С.25-37

46. Ким Н.В. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения [Электронный ресурс] / Н.В. Ким, И.Г. Крылов // Труды МАИ – 2012. - №62, Режим доступа: <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/grupповое-primeneniye-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf>. [Дата обращения: 11 апреля 2024]

47. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. /Пер. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. М.: Машиностроение, 1979. - 432 с., ил

48. Корнеев В.М. Особенности конструкции и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов самолетного типа / В.М. Корнеев - Издательские решения, 2018. - 37с.

49. Костерев, В. В. Надежность технических систем и управление риском: учебное пособие / В.В. Костерев. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с

50. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. – Т.1 и 2. / Л.Т. Кузину –М., Энергия, 1973
51. Выбор множества приоритетных наземных объектов наблюдения с помощью беспилотных летательных аппаратов и маршрутизация их полета/ Г.Н Лебедев [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2019. - № 2. - С. 3—12. DOI: 10.14489/vkit.2019.02. pp.003-012.
52. Лебедев Г.Н. Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов / Г.Н. Лебедев, Л.А. Мирзоян // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. - №12, - С. 34-40.
53. Лебедев Г.Н. Постановка и решение задачи оперативной коррекции потоков прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма / Г.Н. Лебедев, В.Б Малыгин, Д.А Михайлин // Научный вестник МГТУ ГА. - 2017. - Т. 20, - № 4. - С. 8-17.
54. Лебедев Г.Н. Постановка многокритериальной задачи маршрутизации и планирования графиков полета пилотируемой и беспилотной авиации в динамической обстановке и подход к ее решению с помощью генетических алгоритмов / Г.Н. Лебедев, В.Б Малыгин, Д.А Михайлин, Тан Бяо // Научный Вестник МГТУ ГА – 2018. - Т. 21,- № 5. - С. 10.
55. Лебедев Г.Н. Применение динамического программирования в задачах маршрутизации полета беспилотного летательного аппарата. / Г.Н. Лебедев, А.В. Ефремов // Самара.: Научный вестник СГАУ. - 2011. - № 3
56. Лебедев Г.Н. Применение искусственного интеллекта при моделировании примеров групповых действий беспилотной авиации / Г.Н. Лебедев, С.С. Кананадзе, А.В. Моржин // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. Сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции. - Москва, - 2023. - С. 105.

57. Левин А.В. Жадные методы - Алгоритм Дейкстры // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. Introduction to The Design and Analysis of Algorithms. М.: Вильямс, 2006. С. 189-195.

58. Липунцов, Ю. П. Управление процессами. Методы управления предприятием с использованием информационных технологий / Ю. П. Липунцов

59. Мелехин В.Б. Планирование автономным беспилотным летательным аппаратом эффективных маршрутов облета целей / В.Б. Мелехин, М.В. Хачумов // Авиакосмическое приборостроение. - 2020. - № 4. - С. 3-14. DOI: 10.25791/aviakosmos.04.2020.1150.

60. Меркулов В.И. Оптимизация алгоритма группового управления БЛА в составе локальной сети/ В. И. Меркулов, Д.А. Миляков, И.О. Самодов // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2013. - № 3. - С. 157—166.

61. Румакина, А.В. Логический алгоритм планирования безопасного группового полёта беспилотных летательных аппаратов, исключающий пересечение их маршрутов / Д.А. Михайлин, А.В. Румакина // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации»: Сборник трудов. – 2019. – С. 113.

62. Михайлин Д.А. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач / Д.А. Михайлин, Н.В. Аллилуева, Э.М. Руденко // Труды МАИ, - 2018. - № 98. - С.22

63. Беспилотные авиационные комплексы. I. Классификация, основные принципы создания и применения / В.С. Моисеев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника - 2006. - № 3. - С. 3-5.

64. Беспилотные авиационные комплексы. I. Структура и организация функционирования / В.С. Моисеев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника.- 2006. - № 2. - С. 3-7.

65. Моисеев В.С. Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография./ В.С. Моисеев // Казань: РИЦ «Школа», - 2017. - 572 с.

66. Мороз А.Ю. Сокращение затрат на оснастку при конструкторско-технологической подготовке машиностроительного производства изделий / А.Ю. Мороз, А.В. Родионова, А.Г. Схиртладзе // Вестник МГТУ Станкин. - 2017. - № 3 (42) - С. 110-113

67. Окрепилов, В.В. Менеджмент качества: учебник / В.В. Окрепилов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 650 с.

68. Плахотникова, Е.В. Современные проблемы управления качеством при производстве технических систем / Е.В. Плахотникова // Стандарты и качество. – 2015. – № 9. – С. 102-103

69. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие / С.В. Пономарев [и др.]. – М.: РИА "Стандарты и качество", 2005. – 248 с.

70. Рубин Г.Ш. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем / Г.Ш. Рубин, Ю.В. Данилова, М.А. Полякова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4 (52). – С. 100-105

71. Румакина, А.В. Выбор числа летательных аппаратов в одном вылете при управлении качеством групповых действий малой авиации в режиме воздушного такси / В.И. Гончаренко, А.В. Румакина, Н.С. Сальников // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике

72. Румакина, А.В. Двумерная маршрутизация группового полёта двух ЛА / А.В. Румакина // Гагаринские чтения 2017: Тезисы докладов. – 2017. – С. 875.

73. Задача управления безопасной посадкой и полётом по непересекающимся маршрутам для группы летательных аппаратов / Румакина А.В. [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2020. – № 5. – С. 3–15.

74. Румакина, А.В. Задача управления качеством планирования групповых действий беспилотной и малой авиации, действующей в режиме «воздушного такси» с помощью выбора дисциплины обслуживания / А.В. Румакина // Качество и жизнь. – 2022. – № 4 (36). – С. 76–80.

75. Метод оперативного планирования групповых действий летательных аппаратов в режиме "воздушного такси" аппаратов / Румакина А.В. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2021. - Т. 22. - № 9. - С. 484-493.

76. Румакина, А.В. Нейросетевая двумерная маршрутизация полёта летательных аппаратов с помощью модифицированного метода ветвей и границ / Г.Н. Лебедев, В.И. Гончаренко, А.В. Румакина // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2017. – № 7. – С. 49–57.

77. Румакина, А.В. Нейросетевое планирование маршрута разно-высотного полёта беспилотного летательного аппарата / Г.Н. Лебедев, А.В. Румакина // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – № 5. – С. 3–8.

78. Румакина, А.В. Оценка качества обслуживания заявок группой летательных аппаратов с помощью мультипликативной и адаптивной формы / Д.А. Козорез, А.В. Румакина // Наука Промышленность Оборона. Труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции. В 4-х томах. Под редакцией А.В. Гуськова. – Новосибирск, 2023. – С. 286–289.

79. Румакина, А.В., Денискина А.Р. Оценка качества обслуживания малой авиацией при спасении людей при наводнении / Д.А. Козорез, А.В. Румакина, А.Р. Денискина // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – № 5. – С. 7–11.

80. Оценка практической эффективности обслуживания потока заявок в стандартных и экстренных ситуациях при помощи генетического алгоритма / А.В. Румакина [и др.] // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2021. – № 36. – С. 48–59.

81. Планирование числа летательных аппаратов в групповом полете с учетом их живучести и требуемой длительности наблюдения наземных объектов / Румакина А.В. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2022. - Т. 23. - № 8. - С. 430-439.

82. Постановка задачи планирования маршрутов летательных аппаратов при обслуживании случайного потока поступающих в полете заявок / Румакина А.В. [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т.18. – № 1 (199). –С. 17–27.

83. Румакина, А.В. Программа логического управления маршрутным полётом летательного аппарата / А.В. Румакина // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 7. – С. 31–38.

84. Румакина, А.В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете / Г.Н. Лебедев, А.В. Румакина // Труды МАИ. – 2015. – № 83. – С. 1–19.

85. Румакина, А.В. Управление качеством планирования групповых действий беспилотной авиации для почтовых перевозок / А.В. Румакина // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – № 5. – С. 20–22.

86. Румакина, А.В. Управление качеством планирования групповых действий беспилотной и малой авиации, действующей в режиме «воздушного

такси» с помощью выбора числа летательных аппаратов / Г.Н. Лебедев, В.И. Гончаренко, А.В. Румакина // Качество и жизнь. – 2022. – № 4 (36). – С. 81–83.

87. Саати, Т., Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320

88. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения: пер. с англ. Е. Г. Коваленко; под ред. И. Н. Коваленко и Р. Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.

89. Сайфуллина, А.Ф. Факторы, обеспечивающие качество продукции / А. Ф. Сайфуллина, Н. С. Сагитова // Аллея науки. – 2019. – Т. 3. – № 12 (39). – С. 483-488.

90. Задача автоматического управления и контроля безопасности посадки самолёта при действии сильных микропорывов ветра / Сельвесюк Н.И. [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2019. - № 7 (209). - С. 214-226.

91. Скворцов Ю.В. Обеспечение и контроль качества продукции - одна из ключевых задач государства / Ю.В. Скворцов, Е.С. Постникова Е.С. // Управление научно-техническими проектами. Материалы Второй Международной научно-технической конференции. - 2018. - С. 218-223.

92. Алгоритмы оптимизации траекторий воздушных судов при гибкой маршрутизации / Скрыпник О.Н. [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2020. - № 1-1 - С. 69-70.

93. Токарев В.В. Создание команд бережливого производства на отечественных авиационных предприятиях / В.В. Токарев, А.Р. Денискина // Качество и жизнь, 2016. - №4 (12) – С. 72–80.

94. Фатхутдинов, Р.А. Организация производства: учебник / Р.А. Фатхутдинов . 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2007. – 544 с.

95. Хэнсен, Б.Н. Контроль качества. Теория и применение / Б.Н. Хэнсен. – М., 1968. – 520 с.
96. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. / Е.П. Чураков – М., Энергоатомиздат, 1987
97. Шадрин, А.Д. Менеджмент качества. От основ к практике / А.Д. Шадрин. – М.: Изд-во «Трек», 2004. – 360 с.
98. Шалаев, А.П. Процессное управление в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2008. И не только / А.П. Шалаев, Л.Е. Скрипко // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 1. – С. 14 – 17.
99. Шишкин, И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: учеб. для вузов / И.Ф. Шишкин; под. ред. акад. Н.С. Соломенко. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 342 с
100. Щербаков Р. Перспективные беспилотные летательные аппараты вертолетного типа // Зарубежное военное обозрение. 2003. № 3. С. 19-23.
101. Distributed Control for Multiple UAVs with Strongly Coupled Tasks / P. Chandler et al. // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. August, Austin, Texas. 2003. AIAA 2003-5799. DOI 10.2514/6.2003-5799
102. Evdokimenkov V.N. Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups / V.N. Evdokimenkov, M.N. Krasilshchikov, D.A. Kozorez // INCAS Bulletin. 2019. vol. 11. No. 1, pp. 75-88. DOI: 10.13111 / 2066-8201.2019.11.S.8.
103. Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A., Bui Trung Zung/ New algorithm for calculating the required number of unmanned aerial vehicles and the duration of their stay in dangerous area/ Journal of Applied Engineering Science? Vol. 20, No. 4, 2022, P. 1143-1151



104. Jin Y., Minai A. A., Polycarpou M. M. Cooperative Real-Time Search and Task Allocation in UAV Teams // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. December 2003, Maui, Hawaii. 2003. V. 1. P. 7 – 12. DOI 10.1109/CDC.2003.1272527

105. Little, J. D. C. A Proof for the Queuing Formula:  $L = \lambda W$  (англ.) // Operations Research (англ.) рус.: journal. — 1961. — Vol. 9, no. 3. — P. 383—387. (Литтл, Дж. Д. С. Доказательство формулы массового обслуживания:  $L = \lambda W$  (англ.) // Исследование операций: журнал. -- 1961. - Том 9, № 3. - С. 383-387.)

106. Munkres J. Algorithms for assignment and transportation problems // J. Soc. Indust. Appl. Math. 2000. No. 1. P. 32–38.

107. Rong Zhu, Dong Sun, Zhaoying Zhou. Cooperation Strategy of Unmanned Air Vehicles for Multitarget Interception // Journal Guidance, 2005, vol. 28, No. 5. DOI: 10.2514/1.14412, pp. 1068-1076.

108. Rumakina A.V. Aircraft Group Coordinated Flight Route Optimization Using Branch-and-Bound Procedure in Resolving the Problem of Environmental Monitoring / G. Lebedev, V. Goncharenko, D. Mikhaylin, A. Rumakina // ITM Web of Conferences. – 2017. – V. 10.

109. Rumakina A.V. Assessment of the Sustainable Development of the Flight Route / G. Lebedev, V. Severov, D. Mikhailin, A. Rumakina, M. Kostyshak // BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Development and Modern Problems of Aquaculture» (AQUACULTURE 2023). Сер. «BIO Web of Conferences». – 2024. – С. 05016.

110. Rumakina A.V. Modification of the Integer Branch and Bound Method for Solving of a Two-Dimensional Routing Task of an Aircraft Groups Coordinated Flight / G.N. Lebedev, V.I. Goncharenko, A.V. Rumakina // Mechatronics, Automation, Control. – 2016. – V.17. – № 11. – С. 783–791.

111. Rumakina A.V. Planning the Number of Aircraft in a Group Flight with their Survivability and the Required Observation Duration of Ground Objects / V.I. Goncharenko, G.N. Lebedev, D.A. Mikhaylin, V.B. Malygin, A.V. Rumakina // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2022. – 23 (8). – P. 430–439.

112. Rumakina A.V. Serving the Flow of Requests when Flying Around Ground Objects by Aircraft in the «air taxi» Mode / V. Goncharenko, A. Lebedev, D. Mikhaylin, A. Rumakina // *Journal of Physics: Conference Series*. 19. Ser. «19th International Conference «Aviation and Cosmonautics», AviaSpace 2020». – 2021. – C. 012031.

113. Rumakina A.V. The Method of Operational Planning of Group Actions of Aircraft in the «air taxi» Mode / G.N. Lebedev, V.I. Goncharenko, N.A. Maximov, D.A. Mikhailin, A.V. Rumakina // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2021. – 22 (9). – P. 484–493.

114. Rusmevichientong P., Van Roy B. Decentralized Decision-Making in a Large Team with Local Information // *Games and Economic Behavior*. 2003. V. 43, No. 2. P. 266 – 295. DOI 10.1016/S0899-8256(03)00006-X

115. Task Allocation for Wide Area Search Munitions with Variable Path Length / C. Schumacher et al. // *Proc. of the American Control Conf.* June, Denver. Colorado. 2003. V. 4. P. 3472 – 3477. DOI 10.1109/ACC.2003.1244069

116. Turra D., Pollini L., Innocenti M. Real-Time Unmanned Vehicles Task Allocation with Moving Targets // *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. August, Providence. Rhode Island. 2004. AIAA 2004-5253. DOI 10.2514/6.2004-5253

## Приложение А



**ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ЯКОВЛЕВ»**  
**ФИЛИАЛ ПАО «ЯКОВЛЕВ» – ЦЕНТР КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ



Директор – главный конструктор  
 филиала ПАО «Яковлев» –  
 Центр комплексирования,  
 кандидат технических наук, доцент

А. А. Герасимов  
 « 25 » июля 2024 г.

**АКТ**

о внедрении основных результатов диссертационной работы  
 Румакиной Алены Владимировны,  
 представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждаем, что основные результаты диссертационной работы Румакиной А. В. внедрены в работу филиала ПАО «Яковлев» - Центр комплексирования в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу «Разработка бортового радиоэлектронного оборудования для семейства магистральных самолетов МС-21 (МС-21-200 и МС-21-300, с двигателями PW-1400 и ПД-14)», а именно:

- метод оценки снижения риска при взлете и посадке в сложных условиях с учетом использования на борту системы автоматического контроля безопасности и предупреждения экипажа об устранении возникающих угроз;
- способ получения общей оценки в мультипликативной форме качества обслуживания авиацией при их перелетах в режиме «воздушного такси».

Применение указанных результатов позволяет получить количественные оценки в унифицированной безразмерной форме как при определении коэффициента безопасности полета, так и при совместном дополнительном учете его экономичности. Предложенный подход обеспечивает определение в виде одного числа ожидаемый положительный эффект от внедрения бортовой автоматизированной системы контроля безопасности полета до 10÷15%.

Настоящий Акт не является основанием для финансовых расчётов.

Начальник отдела № 226,  
 представитель руководства филиала  
 по научным и образовательным вопросам,  
 к. т. н., доцент

Е. С. Неретин

Инженер-конструктор 2 категории отдела № 226

Н. А. Шароватов

И.о. зам. директора по ОЛР АО «АК Баргузин»

Пшеничников А.В.

«29» августа 2024 г.

АКТ

о внедрении основных результатов диссертационной работы Румакиной Алены Владимировны, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Румакиной А.В. внедрены в работу АО «Авиакомпания «Баргузин», а именно: методика организации групповых действий малой авиации, позволяющая определить рациональное количество летательных аппаратов в одном вылете при выполнении транспортно-связных, санитарных, лесоавиационных работ, а также при патрулировании, мониторинге местности и аэрофотосъёмке. Применение данной методики позволяет сократить количество задействованных вертолётов на 15–20%.

Использование при организации различных работ не только свободных летательных аппаратов, но и занятых, завершающих полётное задание вблизи новых заявок, позволяет сократить не только общее время выполнения работ, но и длину общего маршрута задействованных вертолётов. При этом с экономической точки зрения расходы сокращаются на 12%.

И.о. зам. директора по ОЛР



А.В. Пшеничников