

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный

руководитель: Козорез Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент.

Официальные
оппоненты:

Димитров Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», заведующий кафедрой;

Клентак Анна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», доцент кафедры.

Ведущая

организация: федеральное автономное учреждение "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского"(ФАУ «ЦАГИ»), г. Жуковский.

Защита диссертации состоится «29» января 2025 года в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», 300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 92.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», <https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-06/rumakina-av-24-2-417-06>

Автореферат разослан «19» ноября 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

Литвинова Ирина Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время беспилотная и малая авиация осуществляет воздушное движение по заранее разработанному плану: либо по составленному маршруту наблюдения пунктов, либо по расписанию рейсов перевозки пассажиров. Выполнение полётного задания группой летательных аппаратов (ЛА) значительно сокращает время обслуживания. Групповые действия – это обслуживание заявок (наблюдение наземных объектов, доставка грузов, перевозка пассажиров) группой ЛА (беспилотной и/или малой авиации). Вместе с тем в настоящее время становится актуальным и востребованным режим «воздушное такси», когда не существует заданного спроса между аэропортами, удовлетворяемого по расписанию, а заявки поступают на перелёты в пункты, состав которых заранее не известен. Особенность такого режима состоит в том, что новые заявки на перевозку пассажиров, грузов или просто наблюдения пунктов появляются «в случайное время и в случайном месте» и разработать маршрут заранее невозможно. Другая особенность заключается в том, что при диспетчеризации воздушного движения необходимо учитывать возможности не только свободных, но и занятых ЛА. Режим «воздушного такси» необходим в тех районах нашей страны, где крайне затруднено движение наземного транспорта (Сибирь, Арктика, Дальний Восток и др.) и требуется локальное несистематическое воздушное движение.

В данной работе поставлена задача организации производства – групповых действий беспилотной и малой авиации для обслуживания заявок в режиме «воздушного такси» и разработки путей её совершенствования. При решении этой задачи необходимо учесть экономические затраты, скорость обслуживания, безопасность как показатели качества групповых действий. Важным является тот факт, что при увеличении скорости обслуживания неизбежно возрастают эксплуатационные затраты, поэтому, в целом, при поиске компромисса необходима параметрическая оптимизация решения, для которой требуется указать единый критерий оценки качества в свёртке с обоснованным выбором её формы.

Известные результаты оценки качества с помощью аддитивной формы свёртки указывают, что при совместном учёте позитивных и негативных факторов эта оценка в ряде случаев не эффективна в связи с малой чувствительностью к их значительным изменениям. Обеспечение групповых действий беспилотной и малой авиации для обслуживания заявок, поступающих при групповом полёте ЛА, не столько до вылета, сколько «по вызову» в самом полёте, повышающее качество и надёжность, – актуальная и перспективная задача организации производства. Однако в известных работах по групповым действиям ЛА приведённые выше особенности не учитываются¹.

¹ Выражаю искреннюю признательность и благодарность заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору Георгию Николаевичу Лебедеву за консультирование на всех этапах написания диссертации и поддержку.

Степень разработанности темы исследования. Исследования задачи усовершенствования методов и средств группового управления производственными процессами в гражданской авиации освещены в работах Нечаева Е.Е., Воробьева 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. Анализ проблем управления качеством и организации производства представлен в работах Васина С.А., Постниковой Е.С., Маликова 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 работ вышеупомянутых и других авторов показал, что в них рассматривается 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, ранее не разработанной.

Цели и задачи исследования

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**:

1. Выполнены научно-технический обзор и анализ задачи обеспечения качества организации групповых действий беспилотной и пилотируемой авиации в режиме «воздушного такси».
2. Предложена концепция организации и управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации.
3. Разработана методика организации групповых действий беспилотной и малой авиации, позволяющая определить оптимальное количество летательных аппаратов в одном вылете и подобрать дисциплину обслуживания.
4. Разработана методика оценки качества организации групповых действий беспилотной и малой авиации.
5. Разработана информационная система компьютерного моделирования как инструментарий оценки эффективности организации групповых и индивидуальных

действий малой и беспилотной авиации, а также их совместного использования в одном вылете.

6. Осуществлена апробация предложенных научно-технических решений на авиационных предприятиях.

Объект исследования – процесс организации производства и управления действиями беспилотной и малой авиации, осуществляющей 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:

– 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.

Предлагаемый подход к процессу управления качеством основан на выполнении 4 основных действий:

1) формирование общего критерия оценки качества групповых действий малой пилотируемой и беспилотной авиации на основе метода штрафных функций;

2) назначение различных дисциплин обслуживания в штатном и пиковом режимах и назначение динамических приоритетов при избытке либо самих ЛА, либо поступающих заявок с целью ранжирования ЛА или заявок и последующего сокращения их числа;

3) групповое целераспределение ЛА между заявками с учётом не только свободных, но и занятых ЛА;

4) выбор оптимального числа ЛА и их типов по критерию максимума качества обслуживания в одном вылете.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке:

1) концепции организации и управления групповым действием беспилотной и малой авиации, обеспечивающей улучшение результативности процесса, отличающейся комплексным учётом параметров и включающей отдельные методики;

2) методики организации производства и управления качеством процесса групповых действий малой и беспилотной авиации, отличающейся возможностью выбора оптимального количества ЛА в одном вылете, а также реализацией выбора дисциплины обслуживания в зависимости от загрузки сети;

3) методики оценки качества процесса групповых действий беспилотной и малой авиации, отличающейся одновременным комплексным учётом различных показателей качества, учитывающих специфику беспилотной и малой авиации.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке концепции и инструментария совершенствования качества процесса организации и управления групповыми действиями малой и беспилотной авиации за счёт выбора оптимального числа ЛА 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) и реализовать 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 ЛА 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 ЛА в одном вылете для выполнения малыми ЛА авиакомпании ОА «АК «Баргузин» полетных заданий по мониторингу местности, доставке грузов и пассажиров, эвакуации при экстренных ситуациях. Также опробована 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 без-

опасности, 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 программного моделирования, содержащего математические модели движения ЛА, 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 опубликованы 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.), в материалах 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 (АММАГ'2022) (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] выполнены решение задач организации групповых действий при спасении людей при наводнении, а также 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, 1 приложения, списка литературы из 115 наименований. Содержит 46 рисунков, 57 таблиц. Общий объём диссертации составляет 148 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены актуальность избранной темы, степень её разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена обзору и анализу групповых действий беспилотных и малых ЛА. Показано, что в известных работах рассмотрены задачи управления групповым полётом по одному заданному критерию без уделения внимания многокритериальной оценке качества этих действий. Такие задачи решаются методом полного перебора, ветвей и границ, а также других алгоритмов целочисленного программирования, однако подобные решения относятся к условиям, когда все заявки или объекты известны заранее и время их обслуживания не учитывается. С другой стороны, показано, что теория массового обслуживания позволяет оценить как время обслуживания, так и вероятности простоя и отказа в обслуживании, однако при этом не анализируются затраты, которые требуется минимизировать.

Анализ известных подходов к оценке качества процессов проектирования систем, их производства и эксплуатации подтверждает во всех случаях единство в вопросе учёта как позитивных, так и негативных факторов на основе метода штрафных функций. Однако, как правило, общая оценка качества представляет собой отношение «доходной части» в числителе и «негативной» в знаменателе, когда каждая из них определяется с помощью аддитивной свёртки. Также необходимо отметить, что обслуживание случайного потока заявок в авиации в режиме «воздушного такси» является малоизученным. При этом не рассматриваются полётные ситуации, когда величина хотя бы одного из негативных факторов недопустимо велика и всё

качество групповых действий стремится к нулю. Поэтому сделан вывод о необходимости нового решения задачи при следующей постановке:

1. Процесс обслуживания наземных объектов с помощью группы летательных аппаратов рассмотрен при поступлении потока заявок, возникающих в самом полёте. Источником заявок являются заданные на указанной территории объекты с известным числом n , координатами их местоположения и априорными важностями $B_j (j = 1, \dots, n)$ (рисунок 1). На рисунке 1 точка А – аэродром, место вылета и прилёта ЛА.

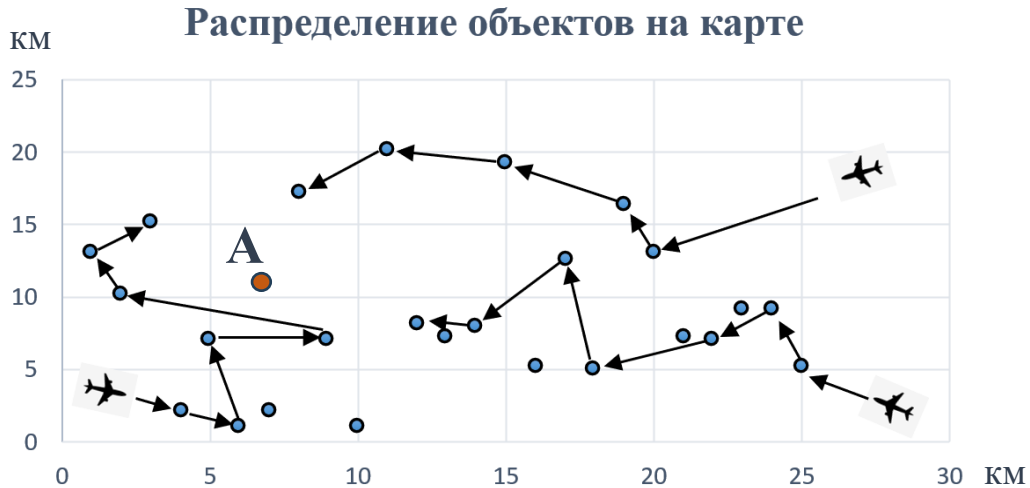


Рисунок 1 – Организация перелётов группы ЛА при выполнении заявок

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

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

где λ – величина, обратная среднему времени между возникающими заявками, или интенсивность поступления заявок. Выбор в диссертации закона Пуассона обоснован тем, что, во-первых, в научных работах по массовому обслуживанию он используется чаще других, а во-вторых, создаёт наилучший вариант, необходимый для учёта всех возможных ситуаций. 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 заданных скорости и высоте полёта. Принято, что при отсутствии заявок полёт продолжается в сторону конечного пункта.

3. В зависимости от случайного числа вновь поступивших заявок S , общего числа ЛА N и числа ЛА d , не занятых обслуживанием (из общего числа ЛА), возможны 3 полётные ситуации:

- $d > S$ – режим *простоя в обслуживании*, что приводит к неоправданным эксплуатационным затратам;
- $d = S$ – *штатный* режим, когда все ЛА заняты обслуживанием;
- $d < S$ – *пиковый* режим (перегрузки в работе), что приводит к задержкам в обслуживании и нежелательному увеличению времени пребывания заявок в очереди.

4. Требуется предложить эффективный подход к управлению качеством групповых действий беспилотной и малой авиации в режиме «воздушного такси», сформировать критерий оценки качества группового полёта для его сравнения с известными подходами в обслуживании, выбрать оптимальное число ЛА в одном вылете N .

Во второй главе представлены концепция организации групповых действий беспилотной и малой авиации и методика оценки её качества. Предложен критерий нормированной мультипликативной формы оценки качества в виде одного числа J_0 , который не уступает по трудоёмкости вычислений чисто аддитивной форме, но более чувствителен к значительным изменениям влияющих факторов. Этот критерий J_0 учитывает две штрафные функции – Π_1 и Π_2 . Π_1 используется при оценке эксплуатационных затрат, Π_2 – при оценке времени τ обслуживания очередной заявки:

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

где X_1 и X_2 – нормированные параметры, обратные значениям самих штрафных функций; m_1 и m_2 – весовые коэффициенты, обозначающие важность каждого из критериев.

Π_1 прямо пропорционален числу используемых ЛА N :

$$\Pi_1 = \kappa_1 \frac{N}{\rho},$$

Π_2 при скорости полёта ЛА V , среднем расстоянии между пунктами r_{cp} и средней длине очереди заявок S_{cp} определится как

$$\Pi_2 = \frac{\kappa_2}{N},$$

где κ_1 – коэффициент затрат на перелёт ЛА; ρ – коэффициент загрузки системы ($\rho > 1$); κ_2 – коэффициент затрат на простой.

Показано, что при использовании сравниваемой аддитивной свёртки J_1 оценки качества по формуле $J_1 = \left(\frac{1}{1+\Pi_1} m_2 \right) + \left(\frac{1}{1+\Pi_2} m_1 \right)$ при $m_1+m_2=1$ попытка найти оптимальное значение N числа ЛА оказалась безуспешной, т.к. аддитивный критерий вообще не чувствителен к выбору оптимума. Поэтому для окончательного выяснения преимуществ мультипликативного подхода требуется

дополнительное уточнение с учётом различного характера действий малой и беспилотной авиации.

Получены формулы назначения динамических приоритетов Π_{1j} для заявок при их избытке (когда $n > N$) либо приоритетов $\Delta\Pi_{2i}$ для самих ЛА (когда $n < N$):

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

Соответственно динамический приоритет для ЛА имеет вид

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

где d – число свободных ЛА; S – число заявок; Δ_0 – дополнительный штраф для занятых ЛА с учётом незавершённости выполняемого обслуживания; δ – коэффициент для назначения приоритетов.

В отличие от известных подходов назначение приоритетов для свободных и занятых ЛА осуществляется следующим образом: $\delta=0$ для свободных ЛА, $\delta=0,5$ для занятого ЛА в беспилотной авиации и $\delta=1$ для занятого ЛА в малой авиации.

Рассмотрена главная подзадача диспетчеризации обслуживания – групповое целераспределение заявок между ЛА при их численном равенстве, содержащее 3 операции.

1. Ранжирование всех свободных заявок по критерию (1), в котором среднее расстояние R_j вычисляется с учетом расстояния, которое необходимо преодолеть для завершения текущей заявки.

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

2. Выбор из этого списка на очередном шаге первоочередной заявки j^* по критерию, учитывающему её важность и максимальную суммарную удалённость от группировки ЛА:

$$\Pi_2 = \max_{j=1\dots N} \tau_j (\sum_{i=1}^d r_{ij} + \sum_{i=d+1}^N r_{ij} + \Delta 0\delta).$$

3. После выбора наиболее удалённого пункта с максимальным рангом J_2 решение задачи назначения «своего» ближайшего ЛА, который может оказаться как свободным, так и занятым:

$$\Pi_3 = \min_i \begin{cases} r_{ij^*} & \text{при } i = 1 \dots d, \\ r_{ij^*} + \Delta 0\delta & \text{при } i = d + 1 \dots N. \end{cases}$$

Укрупнённая блок-схема алгоритма оперативного планирования действиями свободных и занятых ЛА показана на рисунке 2.

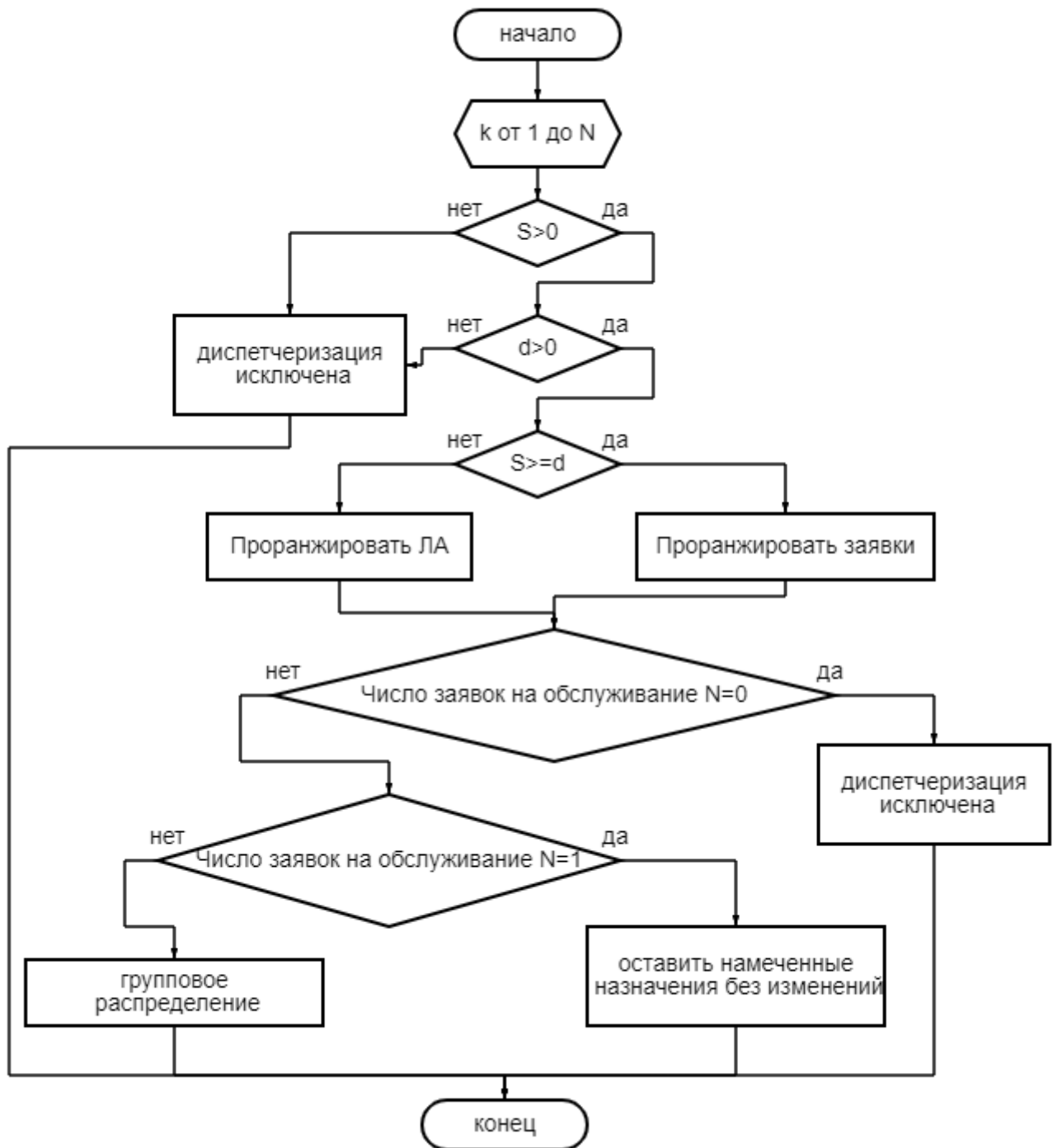


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма оперативного планирования групповыми действиями свободных и занятых ЛА

Главное отличие использования минимаксного критерия в данной работе состоит в ранжировании и распределении занятых ЛА наряду с учётом свободных ЛА. Последующая сравнительная оценка общего качества обслуживания показала, что предложенный алгоритм управления групповыми действиями ЛА приводит к повышению качества на 10–20 % по сравнению с существующими при сравнительной оценке результатов, полученных при компьютерном моделировании.

В третьей главе описаны методики организации производства и управления, сравнение предложенных подходов с другими подходами. В частности, показано, что при уточнении штрафа Π_2 для **беспилотной авиации** согласно теории массового обслуживания обязательным является условие $N > \rho$, или $x > 1$, которое надо учесть при использовании формулы определения вероятности простоя при неограниченной максимальной длине очереди:

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

Пусть в конкретном случае имеются следующие исходные данные для расчёта: $\rho = 3; N = 5; 6; 7$, то есть значения $x = 1,67; 2; 2,33$.

Тогда вероятности простоя P_0 всех БЛА, вычисленные по формуле (2), $P_0 = 0,047; 0,05; 0,055$.

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

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

Аппроксимируя зависимость L от x простейшей дробно-рациональной функцией, получим

$$\Pi_2 = \frac{1}{1 + \frac{c}{x^2}}, \text{ при этом } c \cong 1.$$

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

$$J_{\text{БЛА}} = m_1 \Delta_1 + m_2 \Delta_2 = \frac{m_1}{1+x} + \frac{m_2 x^2}{x^2+c}; J_0 = \left(\frac{1}{1+x} + m_2 \right) \left(\frac{x^2}{x^2+c} + m_1 \right).$$

Также при сравнении оценок качества J_1 и J_0 установлен выигрыш на 10–15 % для предложенного подхода в самой оценке и в сокращении требуемого числа ЛА в 1,3–1,5 раза.

В случае групповых действий **малой авиации** с учётом оплачиваемого времени простоя пилотируемых ЛА на лётном поле получена более сложная формула оценки:

$$J_{\text{ма}} = (0,5 + \Delta \Pi_1)(0,5 + \Delta \Pi_2) = \left(0,5 + \frac{1}{2-\alpha+y} \right) \left(0,5 + \frac{y}{c+y} \right),$$

где α – коэффициент отношения эксплуатационных затрат простоя на земле к затратам в полёте, то есть $0 < \alpha < 1$; c – коэффициент относительной значимости обслуживания по сравнению с эксплуатационными затратами, то есть $0,5 \leq c \leq 2$. С помощью этих формул установлено, что за счёт использования занятых ЛА число свободных ЛА на лётном поле уменьшилось, а значит, повысилось качество обслуживания.

Приведено описание программы компьютерного моделирования случайного потока заявок для разных дисциплин обслуживания. Результирующий график качества обслуживания I от числа используемых ЛА N показан на рисунке 3.

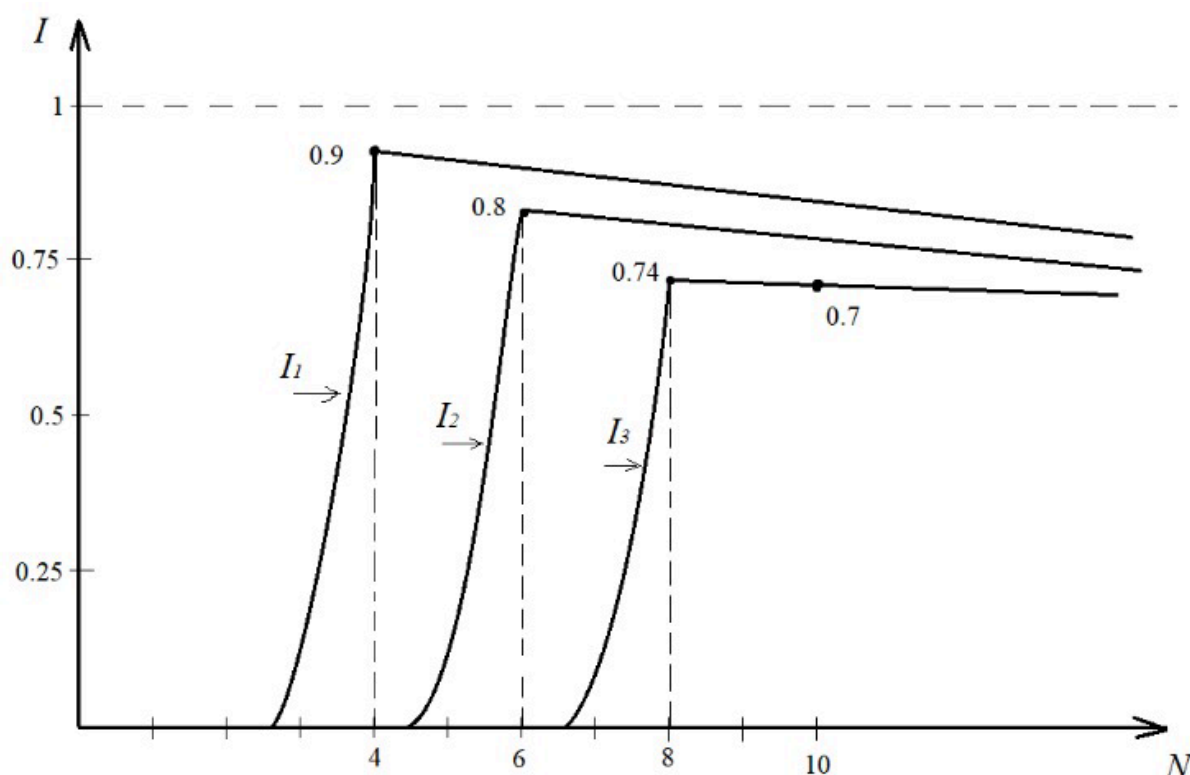


Рисунок 3 – Итоговые графики зависимости качества обслуживания от числа ЛА для 3 вариантов диспетчеризации групповых действий

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.

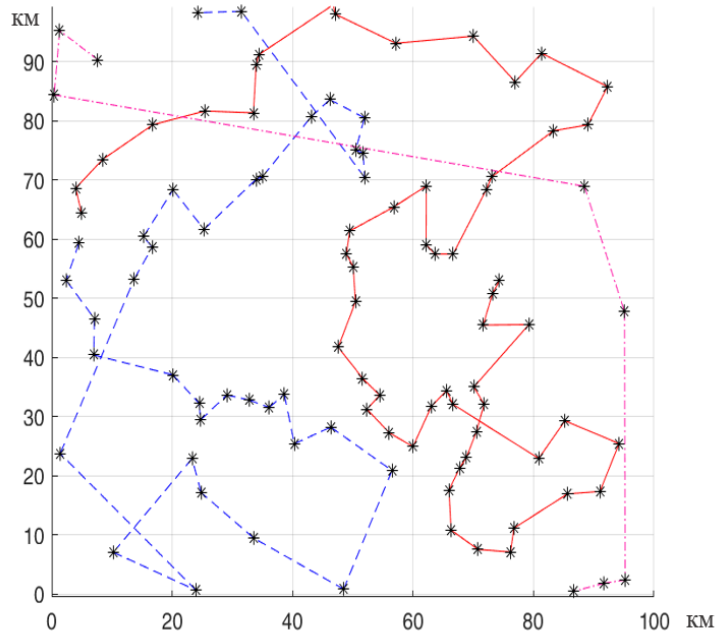
Из графика рисунка 3 видно, что значение нормированного качества в мультипликативной форме при использовании предложенной методики выбора оптимального числа ЛА и дисциплины обслуживания увеличилось на 21 %.

Представлена формула приближённого определения оптимального числа ЛА

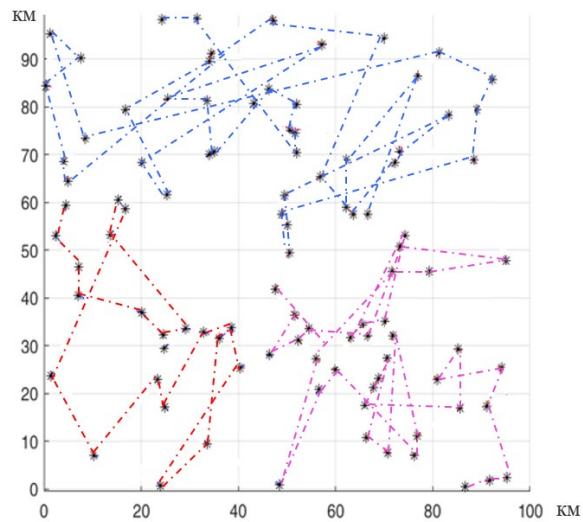
$$N_{\text{опт}} \approx 2\sqrt{\frac{m_1}{m_2}} + \frac{\lambda r_{\text{ср}}}{V},$$

где λ – средняя скорость потока заявок; $r_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между пунктами; V – скорость полёта ЛА; $\frac{m_1}{m_2}$ – отношение значимостей экономичности и скорости обслуживания при управлении качеством.

В результате моделирования установлено, что основной вклад в получение выигрыша предложенного подхода вносит учёт не только свободных, но и занятых ЛА. Сравнительная картина разных случаев представлена на рисунке 4.



a



б

б

Рисунок 4 – Картина перелётов 3 БЛА:

a – без учёта занятых в перелёте; б – с учётом занятых в перелёте

В четвёртой главе описана апробация разработанного инструментария на нескольких примерах применения беспилотных и малых ЛА для достижения максимума качества групповых действий с учетом интенсивности возникновения заявок на обслуживание λ , среднего расстояния между перелётами $r_{\text{ср}}$, известной скорости полёта V , а также неодинаковой значимости экономичности и скорости обслуживания. Кроме того, предложено выбирать не только число ЛА, но и их тип. Так, например, для достижения максимального качества групповых действий предложено применять не только лёгкие БЛА (квадрокоптеры), выгодные для малых расстояний, но и более мощные БЛА с большей массой полезной нагрузки, более выгодные при использовании на больших расстояниях. Для апробации рассмотрены 4 частные задачи оценки качества групповых действий ЛА в различных условиях группового полёта.

В 1-й задаче логического управления многорежимным полётом БЛА при наблюдении наземных объектов принято допущение, что на любом этапе полёта выбранный способ назначения для каждого объекта из свободных или занятых ЛА предусматривает разбиение этого полёта на ряд простых операций или режимов: разворот по курсу, снижение или набор высоты, прямолинейный полёт. На рисунке 1 показана картина перелётов для 3 БЛА. С помощью компьютерного моделирования установлено, что по сравнению с жадным алгоритмом маршрут сокращается на 10–15 %, а время ожидания – на 15–20 %. Для мультипликативной формы оценки качества получен следующий результат:

– для известного подхода с помощью жадного алгоритма

$$J_0^I = \left(\frac{1}{1+\varepsilon_{\text{ж}}} + m_1 \right) \left(\frac{1}{1+\tau_{\text{ж}}} + m_2 \right),$$

где $\varepsilon_{\text{ж}}$ и $\tau_{\text{ж}}$ – соответственно эксплуатационные затраты и время ожидания заявок;

– для предложенного подхода

$$J_0^{II} = \left(\frac{1}{1+0,87\varepsilon_{\text{ж}}} + m_1 \right) \left(\frac{1}{1+0,8\tau_{\text{ж}}} + m_2 \right).$$

Таким образом, общая эффективность в среднем повысилась на 16 %.

Во 2-й задаче оценки качества облёта препятствий с выбираемым радиусом R_0 учитывается множитель Π_3 в мультипликативной свёртке:

$$\Pi_3 = m_3 + \frac{1-m_3}{1+\Pi_3(1-m_3)}, J_0 = \left[m_1 + \frac{y}{y+2-\alpha(R)} \right] \left[m_2 + \frac{y}{y+c(R)} \right] \left[m_3 + \frac{1-m_3}{1+(1-m_3)\frac{R_{\text{min}}}{R}} \right].$$

При возрастании числа опасных препятствий проблема достижения компромисса усугубляется. Оказалось, что оптимальный радиус облёта для конкретных условий равен 600 м, а сравнение оценки качества достигаемого при этом результата показало выигрыш в 13 % по сравнению с другими условиями.

В 3-й задаче рассмотрен случай экстренной эвакуации людей при наводнении с помощью двух пилотируемых вертолётов. Местоположения населённых пунктов и точек вылета вертолётов заранее известны. Считается, что важность заявок на эвакуацию от разных пунктов меняется по мере затопления местности (рисунок 5).

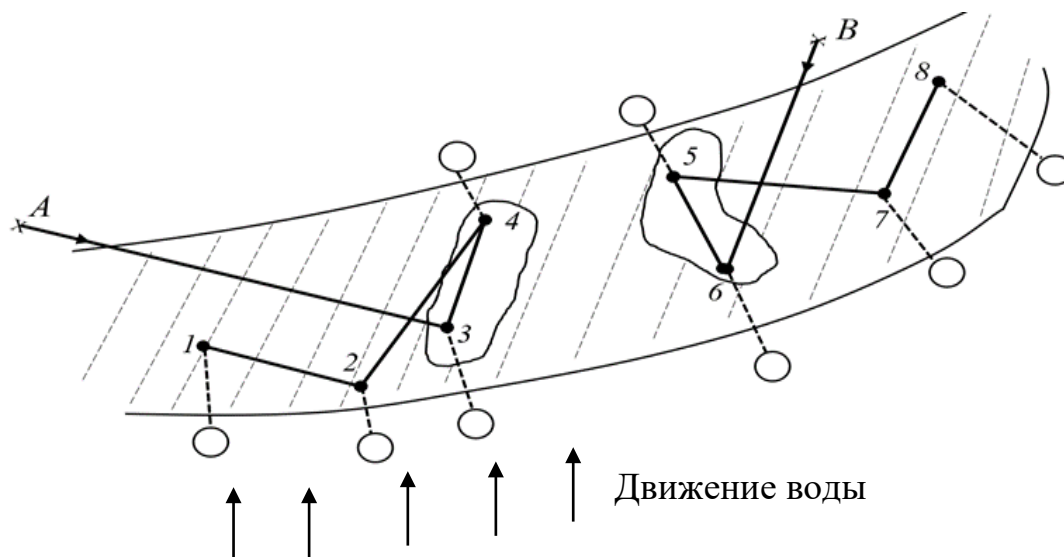


Рисунок 5 – Расположение наземных пунктов в районе наводнения и их обслуживание без учёта занятых ЛА

Расчёты и компьютерное моделирование показали, что при обслуживании с учётом занятых ЛА общая длина пройденного пути снизилась незначительно, но время ожидания эвакуации из наиболее опасных пунктов (пп. 1–4) сократилось в 1,5–2 раза. Проведено сравнение предложенного и известного подходов. Оценка качества обслуживания без учёта занятых ЛА имеет вид

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

Оценка качества обслуживания при использовании как свободных, так и занятых ЛА имеет вид

$$J_0^{II} = \left(\frac{1}{1+\tau} + m_1 \right) \left(\frac{1}{1+\tau} + m_2 \right).$$

Это позволило получить выигрыш в 30 % при оценке достигаемого качества.

В 4-й задаче рассмотрено применение беспилотной авиации в почтовых перевозках. Принято допущение, что заданную территорию можно условно разбить на четыре района (рисунок 6).

Предложено перевозить отсортированную почту в отдалённые районы с помощью одного высокоскоростного БЛА₀, а в «своём» районе – с помощью несколь-

ких лёгких БЛА с уменьшенной скоростью полёта, но с малыми эксплуатационными затратами. В этих условиях можно сравнить предложенный способ с обычным обслуживанием с помощью пилотируемых вертолётов, когда затраты для БЛА на порядок меньше, чем в малой авиации, но скорость обслуживания в 4 раза ниже.

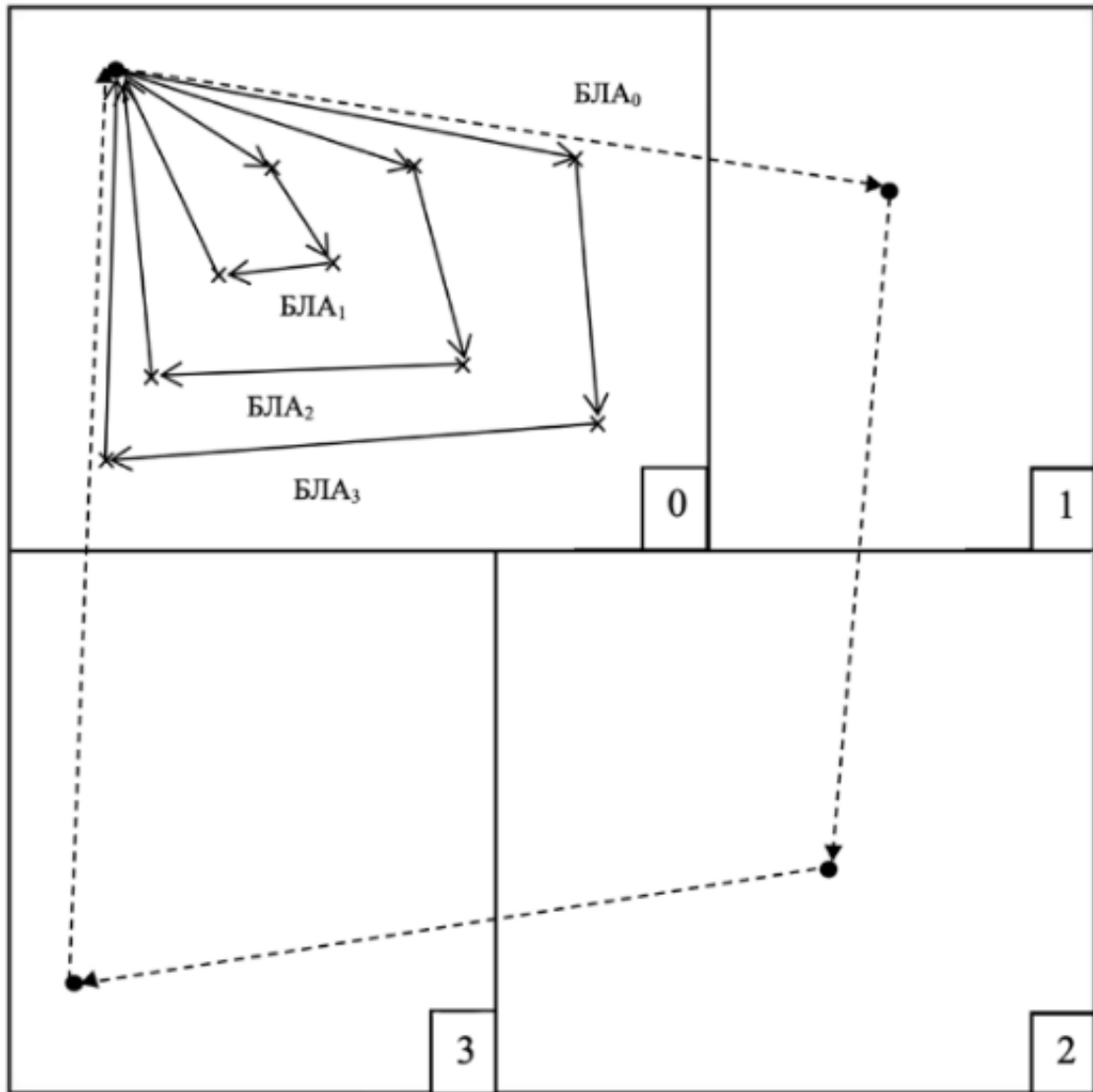


Рисунок 6 – Пример почтовых перевозок в своём и отдалённых районах с помощью группы БЛА

Получен следующий результат:

– для известного подхода (без использования БЛА)

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

– для предложенного подхода (с использованием БЛА)

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

Если считать, что при почтовых перевозках более важна скорость обслуживания (а это значит, что $m_2=0,2$, а $m_1=0,8$), то тогда общий выигрыш качества $B=1,4$ из-за малых эксплуатационных затрат беспилотной авиации. Таким образом, инструментом выбора числа ЛА и их типов при управлении качеством является его мультипликативная оценка.

В заключении представлены итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены акты внедрения результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача, связанная с совершенствованием инструментария и процесса организации групповых действий ЛА 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 оценки качества в специальной мультипликативной форме.

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 по сравнению 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 ЛА 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 в ходе выполнения транспортно-связных, санитарных, лесоавиационных работ, мониторинга местности и аэрофото-съемки, выполняемых АО «Авиакомпания «Баргузин», что подтверждено актом о внедрении.

4. Предложена методика оценки качества процесса групповых действий беспилотной и малой авиации, учитывающая специфику беспилотной и малой авиации, отличающуюся одновременным комплексным учётом различных показателей качества, позволяющая оптимально подобрать тип ЛА для выполнения различных задач. Применение предложенной методики в Центре комплексирования ПАО «Яковлев» позволяет получить количественные оценки качества обслуживания авиацией заявок в унифицированной форме, учитывающие экономичность и безопасность, при этом положительный эффект составляет 10–15 %.

5. Разработана информационная система компьютерного моделирования как инструментарий оценки эффективности организации групповых действий малой и беспилотной авиации, позволяющая получать количественные оценки её групповых действий для дальнейшего повышения их качества.

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

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуются применять при решении задач повышения эффективности и качества процесса управления групповыми действиями беспилотной и малой авиации, 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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

Публикации по специальности 2.5.22

1. Румакина, А.В. Управление качеством планирования групповых действий беспилотной авиации для почтовых перевозок / А.В. Румакина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – Вып 5. – С. 20–22.

2. 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.

3. Румакина, А.В. Оценка качества обслуживания малой авиацией при спасении людей при наводнении / Д.А. Козорез, А.В. Румакина, А.Р. Денискина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – Вып. 5. – С. 7–11.

4. 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.

Другие публикации

5. Постановка задачи планирования маршрутов летательных аппаратов при обслуживании случайного потока поступающих в полете заявок / В.И. Гончаренко, Г.Н. Лебедев, А.В. Румакина, Д.С. Мартынкевич // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т.18. – № 1 (199). – С. 17–27.

6. Оценка практической эффективности обслуживания потока заявок в стандартных и экстренных ситуациях при помощи генетического алгоритма / Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Д.А. Михайлин, А.В. Румакина // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2021. – № 36. – С. 48–59.

7. Задача управления безопасной посадкой и полётом по непересекающимся маршрутам для группы летательных аппаратов / А.И. Еремин, Д.А. Михайлин, А.В. Румакина, А.П. Москалев // Авиакосмическое приборостроение. – 2020. – № 5. – С. 3–15.

8. 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.

9. Roumakina, 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. Roumakina // Mechatronics, Automation, Control. – 2016. – V.17. – № 11. – С. 783–791.

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

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

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

Публикации в международных системах цитирования Scopus и Web of Science

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

14. 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.

15. 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. «19th International Conference «Aviation and Cosmonautics», AviaSpace 2020». – 2021. – Article number 012031.

16. Operational Planning of Aircraft Routes When Servicing a Random Stream of Requests Arriving During the Flight / V.I. Goncharenko, G.N. Lebedev, D.S. Martyn-

kevich, A.V. Rumakina // Journal of Physics: Conference Series. 11. Сер. «XI International Scientific and Technical Conference on Robotic and Intelligent Aircraft Systems Improving Challenges, RIASIC 2020». – 2021. – Article number 012016.

17. 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.

18. Aircraft Group Coordinated Flight Route Optimization Using Branch-and-Bound Procedure in Resolving the Problem of Environmental Monitoring / G.N. Lebedev, V.I. Goncharenko, D.A. Mikhailin, A.V. Rumakina // SEMINAR ON SYSTEMS ANALYSIS. – 2017. – Vol. 10. – DOI 10.1051/itmconf/20171001003.

Публикации в материалах и трудах конференций

19. 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 т. / под ред. А.В. Гуськова. – Новосибирск, 2023. – С. 286–289.

20. 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 в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2022). – Москва, 2022. – С. 413–415.

21. 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.

22. 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, автоматизации и обработки информации»: сборник трудов. – 2019. – С. 113.

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

24. 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. – Vol. 10.

Подписано в печать 12.11.2024

**Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 138к
Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95**