

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Пензенский государственный университет»

ЧЕПИГА АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГРУПП
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук

Петренко Сергей Владимирович

Пенза 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Быстрое формирование и совершенствование способов применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных отраслях экономики, включая транспорт и сельское хозяйство, используемых как пространственно-распределенные группы воздушных объектов (ВО), становится доминирующим фактором развития критически важных промышленных и военных инфраструктур, что ставит в первый ряд проблему создания и совершенствования средств их обеспечения.

Использование воздушных объектов в промышленно развитых странах для оперативной и экономичной доставки грузов на расстояния, превышающие сотни километров, становится рядовым способом регулирования логистических потоков и ограничивается дальностью и продолжительностью непрерывного полета. Чрезвычайно актуальным является развитие транспортной сети доставки с использованием воздушных объектов для Российской Федерации. Это вызвано значительной площадью территорий и отсутствием транспортной доступности в ряде регионов, особенно в районах Сибири, Дальнего Востока и Заполярья.

Одним из путей обеспечения непрерывности и оперативности движения транспортных потоков воздушных объектов является создание сети комплексов дистанционного обеспечения (КДО) процесса полета. В свою очередь, эффективность функционирования наземных комплексов дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов (ПРГВО) определяется математическими моделями и алгоритмами управления, учитывающими условия обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов и особенности управления механическим перемещением поворотного устройства. Дистанционное обеспечение воздушных объектов происходит непосредственно в процессе полета с помощью комплексов, которые осуществляют слежение за перемещением БПЛА в воздушном пространстве. Важным компонентом таких комплексов является поворотное устройство, которое обеспечивает точное наведение и удержание диаграммы направленности КДО на движущемся воздушном объекте.

Эти факты подтверждают актуальность исследований, направленных на поиск моделей и алгоритмов управления КДО, в силу указанных особенностей и составляют **практическое противоречие**, заключающееся в необходимости применения комплекса дистанционного обеспечения полета воздушных объектов и низкой эффективности алгоритмов функционирования КДО по критерию минимума времени обслуживания ВО, в которых не учитываются особенности пространственного распределения воздушных объектов в процессе их полета.

Степень разработанности темы исследования.

Результаты исследований в области построения моделей и алгоритмов КДО нашли отражение в работах таких отечественных ученых, как А.А. Галяев, В.Ю. Тугаенко, Т. Нугента, Д. Каре. Следует заметить, что центральными элементами, влияющими на оптимальность применения КДО, являются алгоритмы целераспределения и управления, которые часто являются узким местом в системе управления комплекса, и оптимизация их использования сегодня вызывает

наибольший интерес. Изучение различных отечественных и зарубежных источников позволяет сделать вывод о том, что получение достоверной величины границ (пространства) оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов позволит иметь объективную картину о возможностях по их обслуживанию, и приводит к заключению о необходимости вычисления оптимального местоположения комплекса в соответствии с законами, которые определены эмпирическим путем.

Необходимо отметить недостаточную изученность способов и форм информационной поддержки функционирования, поэтому разработка моделей и алгоритмов дистанционного обеспечения является актуальной **научной задачей**, которая обуславливается необходимостью разрешения **научных противоречий**: - между необходимостью научной организации обеспечения воздушных объектов и недостаточными исследованиями условий обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов; - между объективной потребностью оптимального управления комплексами дистанционного обеспечения и невозможностью ее реализации из-за отсутствия целостного научного подхода к адаптации алгоритмов управления комплексов дистанционного обеспечения в современных условиях.

Цель диссертации состоит в определении оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов путем разработки и исследования модели и алгоритмов определения оптимальной траектории перемещения и математической модели управления поворотным устройством комплекса.

Объектом исследования является система управления комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Предмет исследования: модели, алгоритмы и методы оптимизации дискретных процессов.

Задачи исследования. Поставленная цель в диссертации достигается в результате решения следующих основных задач:

- анализ существующих методов и моделей определения оптимальных условий дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;
- разработка алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределенных воздушных объектов по критерию минимума времени;
- разработка алгоритма управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обеспечении множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время;
- разработка модели определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;

– разработка комплекса прикладных программ для проведения вычислительного эксперимента по определению оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;

– оценка адекватности разработанных алгоритмов на основе данных вычислительных и натурных экспериментов.

Методы исследований. Выполненные в работе теоретические и экспериментальные исследования базируются на применении методов теории сложных систем, математического аппарата общей теории систем, теории статистики и математического моделирования. Общей методологической основой в диссертации является системный подход.

Научная новизна:

1. Предложен алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных воздушных объектов, отличающийся формированием пространственной траектории из этапов с минимальными градусными значениями между кластерами воздушных объектов, что позволяет минимизировать время перемещения поворотного устройства комплекса. Кроме того, алгоритм отличается наличием вложенного алгоритма сортировки обслуживаемых воздушных объектов, что позволяет получить упорядоченный набор пространственных кластеров воздушных объектов и благодаря этому обеспечить максимум обслуживаемых воздушных объектов.

2. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения, отличающийся применением адаптации закона управления поворотным устройством к изменению градусной величины его поворота, что позволяет реализовать кусочно-непрерывный закон управления поворотным устройством и минимизировать время обслуживания воздушных объектов.

3. Разработана модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов, отличающаяся учетом динамики и нелинейного характера обеспечения, использованием многослойной нейронной сети прямого распространения и обеспечивающая увеличение количества успешно обслуженных воздушных объектов, по сравнению с эвристическим выбором.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)» разработаны модели и алгоритмы управления комплексом дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов, направленные на минимизацию времени обслуживания и максимизацию количества обслуженных воздушных объектов. Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффек-

тивности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта».

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределенных воздушных объектов.

2. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время.

3. Модель определения оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что создан упорядоченный набор в виде алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения; алгоритма управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения за минимальное время; модели определения оптимальных условий дистанционного обеспечения воздушных объектов и функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Практическая значимость диссертации состоит в прикладном характере проведенных исследований, направленных на определение оптимальных условий дистанционного обеспечения беспилотных летательных аппаратов и функционирование комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов. Разработанные в диссертации математическая модель и алгоритмы позволяют создать комплекс прикладных программ по определению оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов, сформулированных в работе, подтверждается использованием фундаментальных теоретических положений, справедливость которых доказана ранее и подтверждена на практике, корректным применением математической статистики, адекватностью предложенной модели реальным процессам, совпадением теоретических результатов с данными, полученными экспериментальным путем.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно отражены в 11 научных публикациях: из них: 5 статей опубликованы в журнале, входящем в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендован-

ных ВАК Минобрнауки России для публикаций научных результатов диссертаций, 1 тезис доклада, 1 патент на изобретение и 4 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ Роспатента.

Апробация результатов работы. Результаты диссертации докладывались на VIII Научно-технической конференции «Математическое моделирование инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО» (г. Москва, 2023 г.); XXXI Всероссийском научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы электропривода» (г. Москва, 2024 г.); XXX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (г. Москва, 2024 г.).

Внедрение. Материалы диссертационной работы использованы: АО НПК «Барл» в ООО ЦИТМ «Экспонента» (г. Москва) в рамках разработки беспилотных летательных систем; в ООО «Парус электро» (г. Москва) в рамках работы по проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае; в учебном процессе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (г. Пенза) и ФГБОУ ВО «ДонНТУ» (г. Донецк).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 133 страницы машинописного текста, 26 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников, включающий 115 наименований и приложений на 30 листах.

Основное содержание работы

В введении представлено обоснование актуальности темы, научная новизна работы, выносимые на защиту научные положения и результаты.

Первая глава диссертации содержит анализ существующих подходов по реализации и развитию дистанционного обслуживания воздушных объектов и выработку требований по их совершенствованию. Определены основные методы теории множеств и кластеризации при оценке воздушной обстановки в различных информационных системах. Рассмотрены существующие технологии дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов. Произведен анализ существующих законов управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения. На основании результатов выполненного анализа определена научная задача диссертации, поставлена цель исследований и сформулированы задачи работы.

Вторая глава диссертации посвящена разработке алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения множества пространственно-распределенных воздушных объектов и алгоритма управления поворотным устройством.

Пусть имеется множество (рисунок 1) из N воздушных объектов $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, каждый из которых характеризуется следующими параметрами:

- $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$: пространственные координаты воздушного объекта;
- $c_i \in [0, 100]$: текущий уровень потребности в обслуживании (%);
- c_{crit} — критический порог обслуживания, требующий приоритетного обслуживания.
- $\mathbf{r}_{target} = (x_{target}, y_{target}, z_{target})$: целевые координаты воздушного объекта.

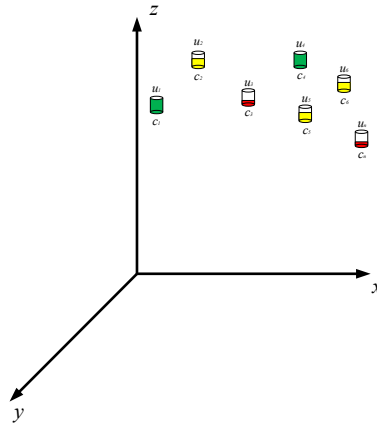


Рисунок 1 – Пространственное распределение групп воздушных объектов

КДО располагается в точке $\mathbf{p}_{kep} = (x_{kep}, y_{kep}, z_{kep})$ и характеризуется:

- диаграммой направленности с углами раскрытия α_h и α_v в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно;
- текущими угловыми координатами (φ, θ), где φ — азимут, θ — угол места.

Для формализации задачи определения воздушных объектов (рисунок 1), попадающих в зону действия диаграммы направленности, вводится бинарная матрица пересечений:

$$\mathbf{I} = [i_{j,k}, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n], \quad (1)$$

где $i_{jk} = 1$, если воздушный объект u_k попадает в диаграмму направленности КДО при нацеливании на него u_j , в противном случае $i_{jk} = 0$.

Для определения попадания воздушного объекта u_k в диаграмму направленности, направленный на него u_j , разработан следующий алгоритм:

1. Вычисление единичного вектора направления от КДО к ВО u_j :

$$\mathbf{d}_j = \frac{\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}}{\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}\|}. \quad (2)$$

2. Вычисление расстояния от КДО до воздушного объекта u_j :

$$r_j = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_{kep}\|. \quad (3)$$

3. Для воздушного объекта u_k вычисление вектора направления:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{p}_k - \mathbf{p}_{kep}. \quad (4)$$

4. Вычисление проекции вектора $\mathbf{d}_k$ на направление $\mathbf{d}_j$:

$$proj_{jk} = \mathbf{d}_k \cdot \mathbf{d}_j. \quad (5)$$

5. Проверка, находится ли ВО u_k за диаграммой направленности КДО относительно объекта u_j : если $proj_{jk} \leq 0$, то ВО u_k находится вне зоны видимости КДО, и $i_{jk} = 0$.

6. Вычисление перпендикулярного отклонения ВО u_k от оси диаграммы направленности:

$$\mathbf{p}_{jk} = \mathbf{p}_k - (\mathbf{p}_{kep} + proj_{jk} \cdot \mathbf{d}_j). \quad (6)$$

7. Разделение отклонения ВО от диаграммы направленности на горизонтальную и вертикальную составляющие:

$$h_{jk} = \sqrt{p_{jk,x}^2 + p_{jk,y}^2};$$

$$v_{jk} = |p_{jk,z}|.$$
(7)

8. Вычисление ширины диаграммы направленности на расстоянии проекции:

$$w_{h,jk} = 2 \cdot \text{proj}_{jk} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_h}{2}\right);$$

$$w_{v,jk} = 2 \cdot \text{proj}_{jk} \cdot \tan\left(\frac{\alpha_v}{2}\right).$$
(8)

9. Определение попадания воздушного объекта u_k в диаграмму направленности, направленный на объект u_j : $i_{jk} = 1$, если $h_{jk} < w_{h,jk}/2$ и $v_{jk} < w_{v,jk}/2$, а в противном случае $i_{jk} = 0$.

На рисунке 2 представлен процесс формирования кластеров ВО для оптимизации траектории перемещения поворотного устройства КДО. Разработанный алгоритм позволяет автоматически определять оптимальное количество кластеров, в зависимости от пространственного распределения ВО и ширины диаграммы направленности КДО. Сформированная матрица пространственных кластеров является ключевым элементом для последующего формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства.

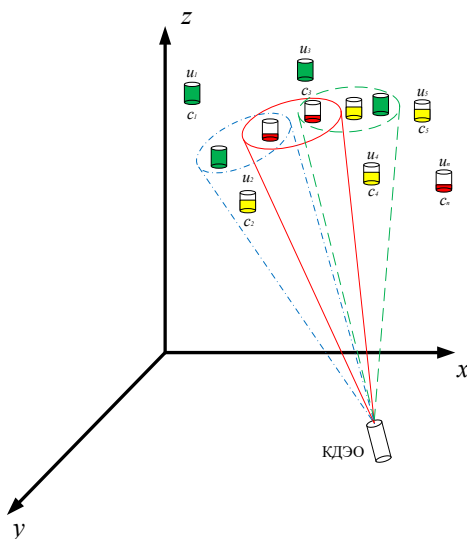


Рисунок 2 – Формирование кластеров воздушных объектов, путем определения попадания воздушных объектов в диаграмму направленности КДО

В результате выполненного перебора, в соответствии с разработанным алгоритмом, формируется матрица пересекающихся пространственных кластеров ВО – (связный граф (рисунок 3)), который отражает степень пересечения различных кластеров воздушных объектов (ВО) в пространственной области и позволяет выявить оптимальные позиции поворотного устройства для максимально эффективного обеспечения нескольких объектов одновременно. На рисунке 3 представлен пример процесса формирования пространственных кластеров ВО для оптимизации работы поворотного устройства КДО. Рисунок состоит из двух

частей: а) и б), демонстрирующих преобразование исходного множества воздушных объектов в структурированные кластеры.

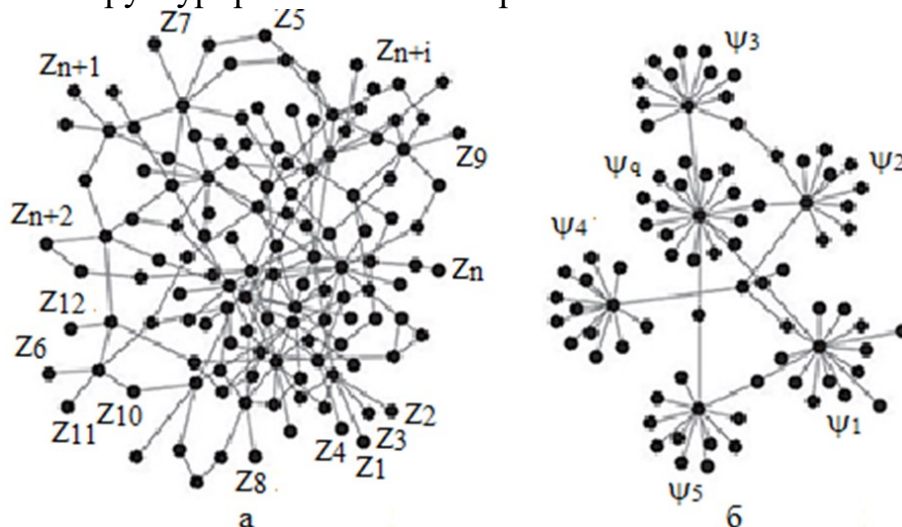


Рисунок 3 – Пример формирования пространственных кластеров ВО а) исходное множество Ψ ; б) кластеры $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_q$, составляющие множество Ψ .

Предполагается, что для реализации алгоритма необходимо построить оптимальную траекторию перемещения поворотного устройства КДО, которая может быть создана на основе кусочно-непрерывного закона управления (угла поворота антенной системы) – рисунок 4, причем, условием оптимальности такой траектории будет обеспечение максимально возможного количества воздушных объектов за минимальное (располагаемое) время.

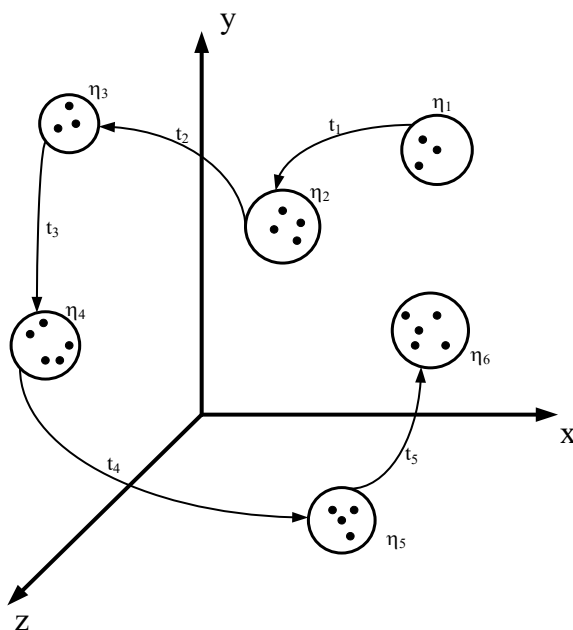


Рисунок 4 – Оптимальная траектория обхода кластеров ВО

Решение задачи формирования оптимальной траектории представляет собой оптимизационную задачу удаления связанных вершин графа за минимальное число шагов. При этом необходимо учитывать время на удаление вершины η_i и

время на перемещение между вершинами, представленное нагруженностью ребер t_i (рисунок 4). Сформулируем общую оптимизационную задачу в виде системы уравнения:

$$\begin{cases} |\Phi| = |\Psi \setminus \Omega| \rightarrow \max; \\ \left(\sum_{i=1}^q \eta_i + \sum_{i=1}^{q-1} t_i \right) \rightarrow \min; \\ \left(\sum_{i=1}^q \eta_i + \sum_{i=1}^{q-1} t_i \right) \leq \frac{S_{\text{марш}}}{V_{\text{ВО}}}. \end{cases} \quad (9)$$

где: Φ – множество обслуживаемых воздушных объектов, Ψ – исходное множество, Ω – множество необслуженных воздушных объектов, η_i – время обеспечения КДО ПГВО, t_i – время на перемещение поворотного устройства КДО, $S_{\text{марш}}$ – длина маршрута полета, $V_{\text{ВО}}$ – скорость воздушных объектов.

Требуется определить последовательность перемещений диаграммы направленности $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$, где $s_i \in U$, такую, что:

1. Все воздушные объекты получают обслуживание за располагаемое время.
2. Количество поворотов КДО – k – минимальное.
3. При построении приоритета обслуживания учитывается состояние воздушных объектов с критическим значением необходимости обслуживания.
4. При каждом повороте КДО количество одновременно обслуживаемых объектов – максимальное.

Предлагаемый гибридный алгоритм состоит из двух основных фаз:

Фаза 1: Приоритетная обработка критических объектов

1. Формирование множества ВО с критическим уровнем обслуживания:

$$U_{\text{crit}} = \{u_i \in U \mid c_i < c_{\text{crit}}\}. \quad (10)$$

2. Пока $U_{\text{crit}} \neq \emptyset$:

а) нахождение воздушного объекта с минимальным уровнем обслуживания:

$$u_{\min} = \arg \min_{\{u_i \in U_{\text{crit}}\}} (c_i). \quad (11)$$

б) если существует несколько воздушных объектов с одинаковым минимальным уровнем обслуживания, то выбирается объект, при наведении на который количество покрываемых воздушных объектов максимально:

$$u_{\text{selected}} = \arg \max_{u_i \in U_{\min}} \sum_{j=1}^N (i_{ij} \cdot [u_j \in U_{\text{available}}]), \quad (12)$$

где $[u_j \in U_{\text{available}}]$ – индикаторная функция, равная 1, если воздушный объект u_j еще не обслужен, и 0 в противном случае.

в) если по-прежнему существует несколько кандидатов (множество $U_{\text{candidates}}$), то осуществляется выбор кандидата, для наведения на который требуется минимальный угол поворота КДО:

$$u_{selected} = \arg \min_{u_i \in U_{candidates}} \Delta\Omega((\varphi, \theta), (\varphi_i, \theta_i)), \quad (13)$$

где $\Delta\Omega$ - функция вычисления углового расстояния между текущим положением КДО и требуемым для наведения на воздушный объект u_i .

г) добавление выбранного воздушного объекта $u_{selected}$ в последовательность S;

д) удаление из множества доступных воздушных объектов $U_{available}$ всех объектов, покрываемых диаграммой направленности при наведении на $u_{selected}$:

$$U_{available} = U_{available} \setminus \{u_j \in U_{available} \mid i_{selected}, j = 1\}. \quad (14)$$

е) Обновление множества ВО с критическим уровнем обслуживания:

$$U_{crit} = U_{crit} \cap U_{available}. \quad (15)$$

Фаза 2: Обработка оставшихся воздушных объектов

1. Пока $U_{available} \neq \emptyset$:

а) Для каждого доступного воздушного объекта u_i вычисление параметров:

– количество одновременно покрываемых воздушных объектов:

$$cover_i = \sum_{j=1}^N (i_{ij} \cdot [u_j \in U_{available}]), \quad (16)$$

– доля воздушных объектов с низким уровнем обслуживания среди покрываемых объектов:

$$LP_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^N (i_{ij} \cdot [u_j \in U_{available}]) [c_j < 50\%] \right)}{\left(\sum_{j=1}^N (i_{ij} \cdot [u_j \in U_{available}]) \right)}. \quad (17)$$

б) нахождение воздушного объекта с максимальным процентом покрытия объектов с низким уровнем обслуживания:

$$u_{\max LP} = \arg \max_{u_i \in U_{available}} LP_i. \quad (18)$$

в) если максимальный процент равен 0 (нет объектов с низким уровнем обслуживания), выбор объекта с максимальным покрытием:

$$u_{selected} = \arg \max_{u_i \in U_{available}} cover_i. \quad (19)$$

г) если существует несколько воздушных объектов с одинаковыми параметрами (множество $U_{candidates}$), выбор того, для которого требуется минимальный угол поворота:

$$u_{selected} = \arg \min_{u_i \in U_{candidates}} \Delta\Omega((\varphi, \theta), (\varphi_i, \theta_i)). \quad (20)$$

д) добавление выбранного объекта в последовательность S;

е) удаление из множества доступных воздушных объектов всех объектов, покрываемых диаграммой направленности при наведении на выбранный объект.

Для каждого кластера G_j в сформированной последовательности обхода S базовое время обслуживания определяется как:

$$\eta_{base,j} = \max \left\{ \frac{(c_{target} - c_i) E_{total,i}}{100 P_{charge,i} \eta_{eff,i}} \mid i \in G_j \right\}, \quad (21)$$

где: c_{target} - целевой уровень необходимости обслуживания (единый для всех объектов или дифференцированный для критических); c_i - текущий уровень обслуживания ВО i ; $E_{total,i}$ - полная потребность в обслуживании ВО i ; $P_{charge,i}$ - мощность обслуживания ВО i ; $\eta_{eff,i}$ - коэффициент эффективности обслуживания ВО i .

Этот подход определяет время обслуживания кластера на основе максимального времени, необходимого для обслуживания любого из входящих в него объектов до целевого уровня.

После расчета базовых времен обслуживания для всех кластеров в последовательности необходимо проверить, не превышает ли суммарное время обхода располагаемое время полета:

$$\sum \eta_{base,j} + \sum t_i \leq \frac{S_{марш}}{V_{BO}}, \quad (22)$$

где: $\sum \eta_{base,j}$ - суммарное базовое время обслуживания всех кластеров; $\sum t_i$ - суммарное время на перемещение поворотного устройства между кластерами; $S_{марш}$ - длина маршрута полета; V_{BO} - скорость воздушных объектов.

Если суммарное время обхода превышает располагаемое время, необходимо скорректировать времена обслуживания кластеров. Для кластеров, содержащих объекты с критически высоким уровнем обслуживания, гарантированное минимальное время обслуживания:

$$\eta_{min,j} = \max \left\{ \frac{\max(c_{safe} - c_i, 0) E_{total,i}}{100 P_{charge,i} \eta_{eff,i}} \mid i \in G_j, c_i < c_{crit} \right\}, \quad (23)$$

где c_{safe} - минимально безопасный уровень обслуживания (например, 15-20%).

После выделения гарантированного времени для критических объектов, оставшееся время распределяется между всеми кластерами пропорционально:

$$T_{remaining} = \frac{S_{марш}}{V_{BO}} - \sum t_i - \sum \eta_{min,j}, \quad (24)$$

$$\eta_j = \eta_{min,j} + (\eta_{base,j} - \eta_{min,j}) \frac{T_{remaining}}{\sum_k (\eta_{base,k} - \eta_{min,k})} \quad (25)$$

для всех кластеров j , где $\eta_{min,j}$ - гарантированное минимальное время (может быть нулевым для некритических кластеров).

Таким образом, при формировании оптимальной траектории обхода кластеров алгоритм не только определяет последовательность наведений, но и оптимальное время обслуживания для каждого кластера, обеспечивая приоритетное обслуживание критических объектов и максимально эффективное использование располагаемого времени.

**Алгоритм управления поворотным устройством комплекса
дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при
обслуживании множества пространственно-распределенных групп
воздушных объектов за минимальное время**

Особенностью рассматриваемой системы является применение безредукторного привода на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) по обеим осям, что позволяет: исключить люфты и упругие деформации в механической передаче; повысить быстродействие системы; увеличить точность позиционирования; снизить массогабаритные характеристики.

В результате проведенных имитационных экспериментов было определено, что универсальный закон управления поворотным устройством КДО по азимуту не является оптимальным во всем диапазоне углов от 0° до 120° . Это связано с изменением момента инерции азимутальной оси от текущего положения оси угла места согласно характеристике, представленной на рисунке 5.

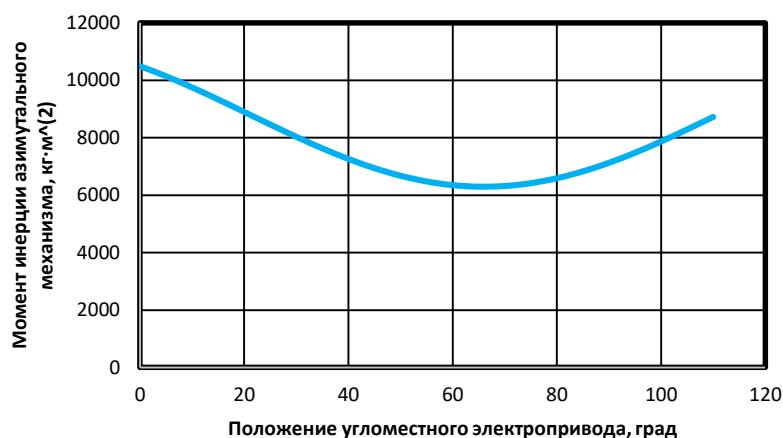


Рисунок 5 – Графическая зависимость момента инерции азимутального электропривода от положения углового электропривода

Для минимизации времени перемещения КДО от одного обслуживаемого кластера воздушных объектов к другому был разработан алгоритм управления поворотным устройством КДО. Структура системы управления поворотным устройством КДО представлена на рисунке 6.

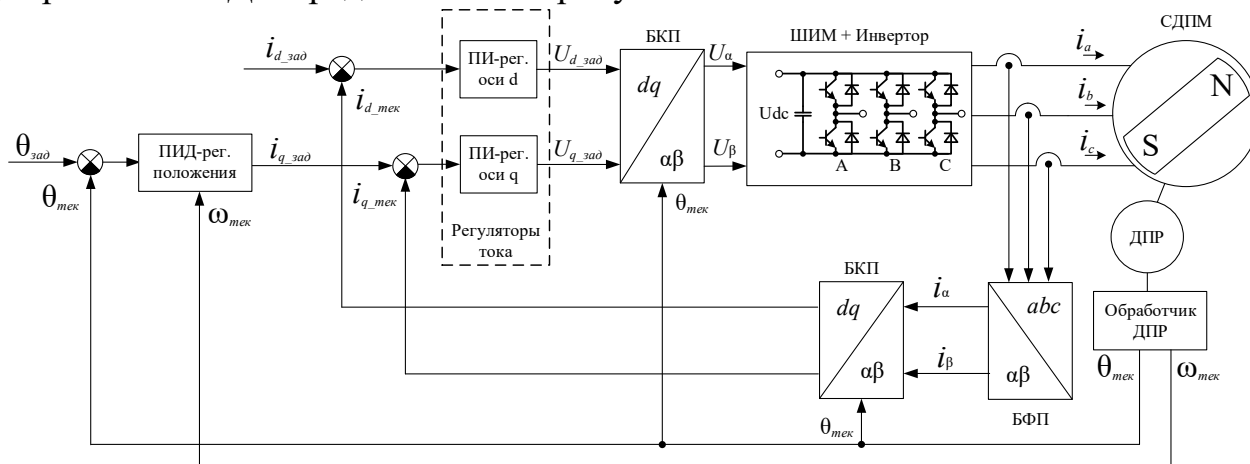


Рисунок 6 – Структура системы управления в составе КДО

Разработанная система управления имеет иерархическую двухконтурную структуру, включающую:

- внутренний контур регулирования токов статора;
- внешний контур регулирования положения.

Внутренний контур регулирования токов построен на принципах векторного управления и предназначен для формирования электромагнитного момента двигателя.

Необходимо учесть, что для различных углов поворота необходимо получить адаптивный алгоритм управления, обеспечивающий минимальное время перемещения поворотного устройства КДО за счет определения крутизны траектории изменения скорости перемещения при формировании управляющего момента, при этом необходимо производить постоянный контроль текущего положения поворотного устройства КДО и дополнительное регулирование в случае необходимости.

Для решения поставленной задачи предлагается применить адаптивный закон ПИД-управления, основанный на изменении коэффициентов регулятора в зависимости от текущего угла места, что позволяет компенсировать влияние переменности момента инерции на динамические характеристики системы.

Коэффициенты ПИД-регулятора азимутального привода представляются как функции от угла места:

$$\begin{aligned} K_{p,\varphi}(\theta) &= K_{p,\varphi,0} \cdot f_p(\theta); \\ K_{i,\varphi}(\theta) &= K_{i,\varphi,0} \cdot f_i(\theta); \\ K_{d,\varphi}(\theta) &= K_{d,\varphi,0} \cdot f_d(\theta), \end{aligned} \quad (26)$$

где: $K_{p,\varphi}, K_{i,\varphi}, K_{d,\varphi}$ – базовые коэффициенты, настроенные для максимального значения момента инерции; $f_p(\theta), f_i(\theta), f_d(\theta)$ – функции коррекции, зависящие от угла места.

Для обеспечения инвариантности динамических характеристик системы к изменению момента инерции функции коррекции коэффициентов регулятора должны компенсировать эту зависимость. Исходя из теории автоматического управления, для системы второго порядка оптимальные коэффициенты пропорциональны моменту инерции:

$$f_p(\theta) = f_i(\theta) = f_d(\theta) = \frac{J_{\varphi,\max}}{J_{\varphi}(\theta)}, \quad (27)$$

где $J_{\varphi,\max}$ – максимальное значение момента инерции, для которого настроены базовые коэффициенты регулятора.

Подставляя модель зависимости момента инерции от угла места, получаем:

$$f_p(\theta) = f_i(\theta) = f_d(\theta) = \frac{J_{\varphi,\max}}{J_{\varphi,\min} + \Delta J_{\varphi} \cdot \cos^2(\theta)}, \quad (28)$$

где: $J_{\varphi,\min}$ – минимальный момент инерции (при $\theta = 90^\circ$); ΔJ_{φ} – диапазон изменения момента инерции; $\cos^2(\theta)$ – функция, описывающая зависимость момента инерции от угла места.

Алгоритм управления поворотным устройством на основе адаптивного ПИД регулятора реализуется следующим образом:

1. Измерение текущих азимута φ и угла места θ .
2. Расчет коэффициента коррекции на основе зависимости момента инерции от угла места:

$$f(\theta) = \frac{J_{\varphi, \max}}{J_{\varphi, \min} + \Delta J_{\varphi} \cdot \cos^2(\theta)}. \quad (29)$$

3. Коррекция коэффициентов ПИД-регулятора азимутального привода:

$$\begin{aligned} K_{p, \varphi}(\theta) &= K_{p, \varphi, 0} \cdot f(\theta); \\ K_{i, \varphi}(\theta) &= K_{i, \varphi, 0} \cdot f(\theta); \\ K_{d, \varphi}(\theta) &= K_{d, \varphi, 0} \cdot f(\theta). \end{aligned} \quad (30)$$

4. Расчет ошибок позиционирования:

$$\begin{aligned} e_{\varphi} &= \varphi_{target} - \varphi; \\ e_{\theta} &= \theta_{target} - \theta, \end{aligned} \quad (31)$$

где: φ_{target} и θ_{target} – заданные КДО азимут и угол места.

5. Формирование управляющих сигналов с использованием скорректированных коэффициентов:

$$\begin{aligned} u_{\varphi} &= K_{p, \varphi} \cdot e_{\varphi} + K_{i, \varphi} \cdot \int e_{\varphi} dt + K_{d, \varphi} \cdot \frac{de_{\varphi}}{dt}; \\ u_{\theta} &= K_{p, \theta} \cdot e_{\theta} + K_{i, \theta} \cdot \int e_{\theta} dt + K_{d, \theta} \cdot \frac{de_{\theta}}{dt}. \end{aligned} \quad (32)$$

Управление поворотным устройством заключается в достижении нуля разности углов требуемого положения и текущего положения поворотного устройства КДО. Алгоритм реализации траектории движения поворотного устройства КДО для обеспечения множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов включает следующие этапы:

1. **Инициализация:** определение начального положения поворотного устройства (φ_0, θ_0) ; настройка базовых коэффициентов регуляторов $K_{p, \varphi}, K_{i, \varphi}, K_{d, \varphi}, K_{p, \theta}, K_{i, \theta}, K_{d, \theta}$.

2. **Цикл обработки последовательности кластеров:** получение текущего кластера из оптимальной последовательности $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$; определение целевых углов наведения $(\varphi_{target}, \theta_{target})$ для текущего кластера; определение времени обслуживания текущего кластера η_j .

3. **Перемещение к текущему кластеру:** реализация движения с использованием алгоритма управления на основе метода переключения параметров регулятора.

4. **Обслуживание кластера:** точное удержание поворотного устройства в целевом положении в течение времени обслуживания η_j .

5. **Переход к следующему кластеру:** обновление текущего положения; переход к следующему кластеру в последовательности.

Разработанные алгоритм и модель управления поворотным устройством КДО позволяют реализовать траекторию перемещения поворотного устройства,

при передаче соответствующей последовательности курсовых углов, в систему управления за минимальное располагаемое время.

Третья глава диссертации содержит модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения, а также результаты разработки алгоритма управления поворотным устройством и алгоритма формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения.

Модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов

Поскольку результирующим показателем эффективности функционирования КДО является количество обслуженных воздушных объектов, то для уточнения его количественных характеристик за располагаемое время была создана и исследована модель. Последовательность выполнения расчетов заключается в следующем:

1. Местоположение ВО генерируется в пространстве воздействия КДО случайным образом.
2. Местоположение КДО последовательно изменяется в пределах его дальности действия с заданной дискретностью до окончания полного обхода пространства диаграммы направленности.
3. Управление поворотным устройством КДО производится в автоматическом режиме.
4. Оператор принимает решение только на применение (не применение) КДО; инерционностью взаимодействия частей системы (оператор - КДО) можно пренебречь.

В результате предварительных расчетов и анализа полученных данных была получена описательная функция и было определено, что основными переменными, оказывающими влияние на количество обслуженных ВО, являются: дальность (D) расположения КДО от ПГВО; ширина диаграммы направленности КДО (γ); угловая величина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (β).

Формирование описательной функции заключается в определении весовых коэффициентов, оказывающих влияние на сжатие, сдвиг функции и нахождение их численных значений. Для математического описания данной зависимости была разработана функция следующего вида:

$$\theta \begin{bmatrix} D \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = W_{1 \times 1}^4 \sigma \left(W_{1 \times 3}^3 \tanh \left(W_{3 \times 6}^2 \tanh \left(W_{6 \times 3}^1 \frac{\left(\ln(\mathbf{X}_{3 \times 1}) - \mathbf{X}_{3 \times 1}^{Ln} \right)}{\sigma Ln} + \mathbf{B}_{6 \times 1}^1 + \right) + \mathbf{B}_{3 \times 1}^2 + \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^3 + \right) + \mathbf{B}_{1 \times 1}^4. \quad (33)$$

где: $X_1 = \frac{D}{D_{\max}}$; $X_2 = \frac{\beta}{\beta_{\max}}$; $X_3 = \frac{\gamma}{\gamma_{\max}}$; $\mathbf{X}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$; $\mathbf{W}^i$ – весовые матрицы преобра-

зований, определяющие нелинейную зависимость выхода от входа (матрицы коэффициентов, масштабирующие входные параметры); $\mathbf{V}^i$ – векторы смещений, корректирующие уровень активации на каждом слое.

Коэффициенты матриц $\mathbf{W}^i$ вычисляются методом градиентного спуска. В первом приближении будем полагать, что исследуемый процесс линеен, тогда:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X}, \quad (34)$$

где: $\mathbf{W} = [w_{ij}, i=1, 2 \dots n, j=1, 2 \dots m]$, $\mathbf{X} = [x_j, j=1, 2, \dots, m]$.

Полученная математическая модель дает возможность выполнить достоверное определение количества обслуживаемых ВО и определить оптимальные условия применения КДО. Переход к практическому анализу массива данных заключается в получении результатов имитационного моделирования в виде гиперкуба, на рёбрах которого отмечены аргументы функции: D , м – дальность обнаружения, γ , град. – ширина диаграммы направленности и β , град. – угловая величина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, а на пересечениях этих значений отмечено относительное количество обслуживаемых воздушных объектов.

Таким образом, модель и алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства КДО, а также *математическая модель и алгоритм управления поворотным устройством* КДО позволяют определить условия его эффективного функционирования и реализовать управляющие воздействия. Для определения адекватности разработанных моделей и алгоритмов было выполнено численное моделирование и верификация полученных данных.

Для оценки эффективности предложенных моделей и алгоритмов был проведен сравнительный анализ с традиционными методами кластеризации на синтетических и реальных наборах данных о воздушных объектах, и использовались следующие метрики:

1. Коэффициент покрытия (K_1): отношение числа объектов в итоговой последовательности к общему числу объектов.
2. Эффективность покрытия (K_2): среднее число объектов, обслуживаемых при каждом повороте КДО.
3. Приоритизация обслуживания (K_3): процент объектов с критическим значением необходимости обслуживания, обслуженных в первую очередь.
4. Угловая эффективность (K_4): средняя величина угла поворота КДО между последовательными наведениями.

Проведено сравнение разработанного гибридного алгоритма с классическими алгоритмами кластеризации и решения задачи покрытия множества:

1. Классический жадный алгоритм (Greedy Set Cover)
2. Метод k-средних (k-means)
3. Алгоритм DBSCAN
4. Иерархическая кластеризация

Результаты сравнения по ключевым метрикам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сравнения разработанного алгоритма по ключевым метрикам

Алгоритм	K_1	K_2	K_3	K_4
Гибридный алгоритм	0,35	2,86	100%	28,7°
Классический жадный	0,4	2,50	85%	42,3°
k-means	0,60	1,67	60%	65,1°
DBSCAN	0,55	1,82	75%	52,4°
Иерархическая кластеризация	0,50	2	70%	48,6°

Гибридный алгоритм показал лучшие значения по всем рассматриваемым метрикам. Наиболее заметный выигрыш зафиксирован по показателям эффективности покрытия (K_2) и угловой эффективности (K_4) за счёт явного учёта пространственных характеристик воздушных объектов при формировании кластеров.

Для проведения экспериментов использовалась следующая конфигурация: группировка из 20 ВО с различными пространственными координатами; диаграмма направленности с углами раскрытия 10° в горизонтальной и вертикальной плоскостях; КДО, расположенный в фиксированной точке пространства; пороговое значение критического уровня обслуживания: 10%; пороговое значение низкого уровня обслуживания: 50%.

Исследование полученных алгоритмов и моделей показало их реализуемость, а также уменьшение времени перемещения поворотного устройства КДО по сравнению с универсальным законом перемещения (рисунок 7). Относительный выигрыш времени при замещении универсального закона перемещения поворотного устройства КДО оптимальным (рисунок 8) составил на наиболее часто встречающемся интервале перемещения 1° - 5° 35%, а на интервале 10° - 17° 40%. При этом время перемещения поворотного устройства на интервале 1° - 22° 35% практически не отличалось от времени перемещения с идеальным законом управления.

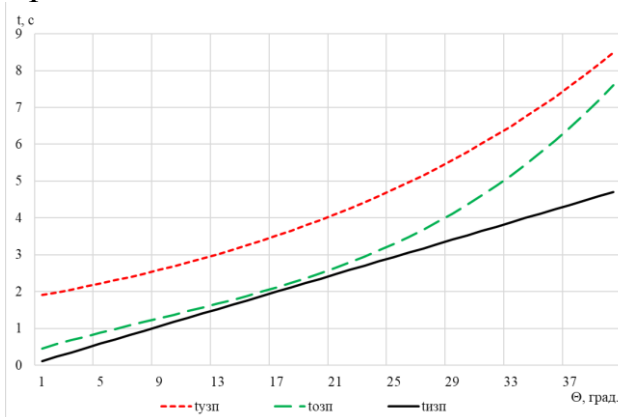


Рисунок 7 – Результаты моделирования времени перемещения поворотного устройства КДО ($t_{узн}$ – время поворота с универсальным законом поворота, $t_{опт}$ – с оптимальным законом поворота, $t_{идеал}$ – с идеальным законом поворота).

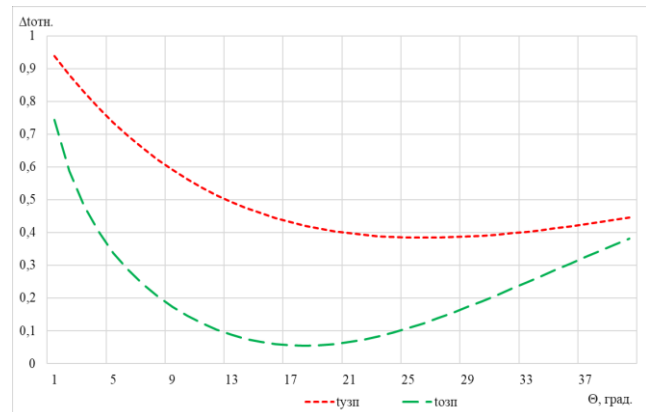


Рисунок 8 – Относительный выигрыш времени при замещении универсального закона перемещения поворотного устройства КДО оптимальным.

Полученные результаты позволили перейти к проведению вычислительного эксперимента по определению условий эффективного функционирования КДО, в котором на первом этапе моделирования определялись численные значения коэффициентов описательной функции, для чего были выполнены 20 172 имитационных экспериментов с дискретностью перемещения КДО 100 м от 0:0 м до 4000:4000 м, изменением размера области обслуживания КДО от 0,5° до 6,5°, при оптимальном законе управления поворотным устройством КДО (Рисунок 9).

Для случая трёх аргументов: дальность (D) расположения КДО от пространственно-распределенных групп ВО; ширина диаграммы направленности КДО (γ); угловая величина пространства обслуживания в горизонтальной плоскости (β), путем варьирования размерности матриц и набора численных значений в них в процессе итерационного поиска с использованием метода градиентного спуска, были получены следующие значения:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{1 \times 1} &= 1,0668, \mathbf{W}_{1 \times 3} = (1,2425 \quad -0,9222 \quad 0,6432). \\ \mathbf{W}_{6 \times 3}^1 &= \begin{pmatrix} 0,2071 & -0,4161 & 0,8182 \\ 0,1081 & 0,9191 & 0,5987 \\ -0,1815 & 0,5747 & 1,0125 \\ -0,0273 & 1,1459 & -1,3546 \\ 0,2258 & -0,0046 & -1,3239 \\ 0,8419 & -0,8196 & -0,5409 \end{pmatrix}. \\ \mathbf{W}_{3 \times 6}^2 &= \begin{pmatrix} 0,1359 & -0,1995 & 0,5673 & -0,4810 & 0,1513 & 0,1440 \\ 0,5482 & -0,3453 & -0,9475 & 0,2469 & 1,1861 & -0,2329 \\ 0,3341 & 0,0120 & -0,2617 & 0,0752 & 1,0567 & -0,1880 \end{pmatrix}. \\ \hat{\mathbf{X}}_{3 \times 1}^{ln} &= \begin{pmatrix} 0,88946631 \\ 3,98387905 \\ 7,02026586 \end{pmatrix}, \sigma_{\mathbf{X}_{3 \times 1}} = \begin{pmatrix} 0,74139845 \\ 0,53140829 \\ 0,61970084 \end{pmatrix}. \\ \mathbf{B}_{6 \times 1}^1 &= \begin{pmatrix} 0,4367 \\ 0,4499 \\ -0,3398 \\ 1,0966 \\ -0,6285 \\ 0,0487 \end{pmatrix}. \\ \mathbf{B}_{3 \times 1}^2 &= \begin{pmatrix} 0,2336 \\ 0,4614 \\ -0,2308 \end{pmatrix}, B^3 = -0,1812, \quad B^4 = 0,2996. \end{aligned}$$

Средняя ошибка аппроксимации составила **3,162%**

Проверка адекватности полученной модели с использованием критерия Пирсона показала, что $\chi_{\text{набл.}}^2 = 3.61056$, $\chi_{\text{крит.}}^2 = 30.57791$, при $\alpha=0,01$. т.е. расхождение теоретических (полученных путем аппроксимации) и эмпирических (полученных путем имитационного моделирования) данных незначимое. p -уровень или вероятность получить для данной модели распределение случайной величины такое же, как и для данных имитационного моделирования, при условии того, что нулевая гипотеза верна (сила доказательства нулевой гипотезы p -

$value = P_{пр.}$) составляет $P_{пр.} = 0,9828$. На этом синтез аппроксимирующей функции на основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, завершен.

На основе разработанных математических моделей и алгоритмов создано программное обеспечение для системы управления КДО, которое реализует:

- определение и отображений зон, обеспечивающих оптимальные условия дистанционного обеспечения пространственно-распределенных групп воздушных объектов;
- формирование пространственно-распределенных кластеров воздушных объектов и оптимальной траектории управления поворотным устройством КДО с определением точного места и последовательности воздействия на множества ПГВО, с учетом характеристик КДО;
- отображение информации о времени и последовательности выполнения воздействия на множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов.

Сравнение количества обслуженных ВО в автоматическом режиме функционирования КДО с количеством обслуженных ВО при управлении оператора демонстрирует значительное превышение количества обслуженных ВО при использовании разработанных моделей и алгоритмов (рисунок 9, 10).

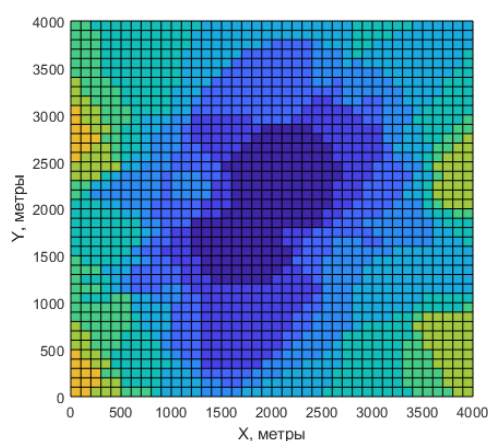


Рисунок 9 – Распределение количества обслуженных воздушных объектов при действиях оператора.

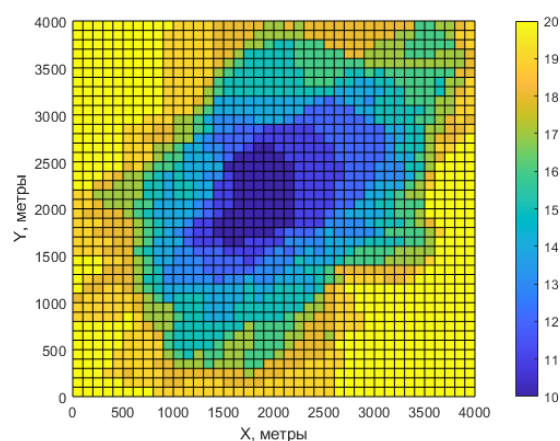


Рисунок 10 – Распределение количества обслуженных ВО при использовании разработанных моделей и алгоритмов.

Математическое ожидание выигрыша при обслуживании 20 воздушных объектов составило $\bar{X} = 3.218 \pm 0.074$, в относительных единицах $\bar{X}, \% = 16,091 \pm 0,371$. Максимальный выигрыш равен 7 воздушным объектам или 35%.

Количество ВО, обслуженных в соответствии с разработанными алгоритмами, возросло в среднем на 16%, в зависимости от дальности действия КДО. Данный факт объясняется невозможностью оператора одновременно решить многомерную оптимизационную задачу, включающую формирование иерархии воздушных объектов и очередность обхода полученной последовательности.

Увеличение общей эффективности КДО с учетом минимизации времени перемещения поворотного устройства составило, в среднем, $23,095 \pm 0,735\%$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Цель диссертации достигнута за счет решения следующих задач:

1. Проведен обзор предметной области, и установлено направление исследований, заключающееся в решении научной задачи по разработке моделей и алгоритмов для определения условий эффективного функционирования комплекса дистанционного обеспечения и формирования оптимальной траектории перемещения его поворотного устройства при обслуживании множества пространственно-распределенных групп ВО.

2. На основе заданных требований обслуживания ВО разработаны алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства комплекса дистанционного обеспечения воздушных объектов и алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного обеспечения для реализации его траектории движения при обслуживании множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время, позволяющие получить упорядоченное множество пространственных кластеров воздушных объектов, что обеспечивает превосходство над всеми существующими методами по ключевым метрикам: коэффициент покрытия – 12,5%, эффективность покрытия – 14,4%, приоритизация обслуживания – 100% и угловая эффективность – 32,2%.

3. Разработан алгоритм формирования оптимальной траектории перемещения поворотного устройства при обеспечении множества пространственно-распределенных групп ВО, удовлетворяющий критериям минимума длительности обеспечения воздушных объектов и максимума количества обслуженных воздушных объектов, который в совокупности с математической моделью представляет собой математическое обеспечение системы управления КДО, обеспечивающий увеличение эффективности на 35%.

4. Для подсистемы управления поворотным устройством в составе комплекса дистанционного обеспечения получен алгоритм, реализующий траекторию движения комплекса дистанционного обеспечения по критерию минимума времени с учетом градусной величины перемещения поворотного устройства, что позволяет сократить время перемещения на 35-40% в зависимости от угла поворота.

5. Определена область условий эффективного функционирования КДО пространственно-распределенных групп ВО, позволяющая своевременно принять решение о выборе позиции размещения КДО для достижения максимального результата, что обеспечивает увеличение количества успешно обслуженных объектов на 3.218 ± 0.074 , по сравнению с эвристическим выбором.

6. Статистические исследования общего и частных алгоритмов определения оптимальных условий функционирования КДО пространственно-распределённых групп воздушных объектов подтвердили их достоверность через сходимость теоретических и экспериментальных данных, практическую реализуемость, эффективность применения и целесообразность включения в состав системы управления КДО.

7. Разработанный комплекс проблемно ориентированных программ, составляющих основу системы управления КДО, обеспечил увеличение количества успешно обслуженных воздушных объектов на 35% по сравнению с режимом ручного управления оператором.

8. Верификация разработанных моделей и алгоритмов на современных вычислительных средствах подтвердила их реализуемость в условиях реальной эксплуатации, что обосновывает возможность практического применения в составе существующих комплексов дистанционного обслуживания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.3.1

1. Чепига А. А. Математическая модель определения оптимальных условий функционирования комплекса дистанционного энергетического обеспечения пространственно распределенных групп воздушных объектов / А. А. Чепига // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2025. – № 3(75). – С. 100-111. – DOI 10.21685/2072-3059-2025-3-7.

2. Чепига А. А. Алгоритм управления поворотным устройством комплекса дистанционного энергетического обеспечения для реализации его траектории движения при энергетической поддержке множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов за минимальное время / А. А. Чепига // Перспективы науки. – 2025. – № 11(194). – С. 70-75.

3. Чепига А. А. Модель и алгоритм формирования пространственно распределенных групп воздушных объектов для оптимизации их энергетического обеспечения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 4. С. 5–17. doi: 10.21685/2072-3059-2025-4-1.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по другим специальностям

1. Чепига А. А. Модель и алгоритм формирования множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов / А. А. Чепига, С. В. Петренко // Перспективы науки. – 2023. – № 9(168). – С. 60-63.

2. Чепига А. А. Математическая модель и алгоритм управления поворотным устройством комплекса обслуживания множества пространственно-распределенных групп воздушных объектов для реализации его траектории движения за минимальное время / А. А. Чепига, С. В. Петренко // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 9(147). – С. 29-32.

Публикации в других научных изданиях:

1. Чепига А. А. Разработка модели и метода управления комплекса обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов / А. А. Чепига // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 29 февраля – 02 марта 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг "РАДУГА", 2024. – С. 288.

Патент на изобретение:

1. Патент № 2863150 С1 Российская Федерация, МПК G08G 5/57, G08G 5/56, H02J 50/00. Способ энергетического обеспечения беспилотных летательных аппаратов: № 2025129564: заявл. 28.10.2025: опубл. 29.05.2026, Бюл. № 16 / А. А. Чепига; заявитель Чепига Андрей Александрович.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680857 Российская Федерация. Программное обеспечение автоматизированной системы контроля местоположения пространственно-распределенных динамических объектов: № 2023669256 : заявл. 19.09.2023: опубл. 05.10.2023 / С. В. Петренко, А. А. Чепига; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680342 Российская Федерация. Реализация оптимального алгоритма управления скоростью поворота антенны системы наблюдения за пространственно-распределенными динамическими объектами: № 2023669295 : заявл. 19.09.2023 : опубл. 28.09.2023 / С. В. Петренко, А. А. Чепига; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681926 Российская Федерация. Программная реализация алгоритма оптимальной редукции матрицы пространственно-распределенных динамических объектов: № 2023680563: заявл. 09.10.2023: опубл. 19.10.2023 / С. В. Петренко, А. А. Чепига; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695093 Российская Федерация. Программное обеспечение формирования оптимальной траектории обслуживания групп БПЛА комплексом дистанционной энергетической поддержки: № 2025694209: заявл. 27.11.2025: опубл. 10.12.2025 / А. А. Чепига; заявитель Чепига Андрей Александрович.