

В. И. Гончаренко<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц., goncharenkovi@mai.ru,

Г. Н. Лебедев<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., kaf301@mai.ru,

Д. А. Михайлин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., tau\_301@mail.ru,

В. Б. Малыгин<sup>2</sup>, начальник тренажерного центра, mbv898@ya.ru,

А. В. Румакина<sup>1</sup>, старший преподаватель, a\_rumakina@mail.ru,

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет гражданской авиации

## Планирование числа летательных аппаратов в групповом полете с учетом их живучести и требуемой длительности наблюдения наземных объектов\*

*В интересах повышения качества планирования группового полета летательных аппаратов сформулирована постановка задачи разработки алгоритмов оперативного определения допустимой длительности наблюдения наземных объектов и требуемого числа летательных аппаратов при обслуживании потока заявок с учетом влияния их живучести. Предложен алгоритм определения длительности наблюдения при обслуживании очередной заявки, описанный в виде процедуры нечеткой логики. Для реализации алгоритма определения длительности наблюдения разработана специализированная экспертная система. На вход экспертной системы поступают величины, описывающие влияние учитываемых факторов в оценке приоритета обслуживания очередного объекта. На выходе экспертной системы формируется альтернатива — продолжить поиск объекта, либо прекратить. Предложен новый подход к решению задачи целераспределения объектов между летательными аппаратами при групповом полете на основе совместного использования двух динамических приоритетов для выбора объектов наблюдения и для назначения обслуживающих летательных аппаратов. Предложен оригинальный подход к решению задачи рационального назначения числа летательных аппаратов в одном вылете с помощью аппарата теории массового обслуживания с учетом случайного характера динамической обстановки. Для оценки требуемого числа летательных аппаратов при обслуживании потока заявок процесс противодействия описан с помощью двух нелинейных дифференциальных уравнений (типа Риккати). Получена общая формула определения числа летательных аппаратов в одном вылете, состоящая из трех слагаемых, — числа летательных аппаратов для выполнения предполетного задания, для обслуживания заявок, поступивших в полете, и для пополнения резерва с учетом потерь живучести летательных аппаратов, что в целом обеспечивает успешное обслуживание процесса наблюдений. Сформирована математическая модель потери живучести летательных аппаратов в виде уравнения Бернулли. Проведено компьютерное моделирование потерь живучести летательных аппаратов в одном вылете для трех случаев: при слабом действии помех, при равенстве противодействующих сил, при сильном противодействии.*

**Ключевые слова:** объекты наблюдения, беспилотный летательный аппарат, поток заявок, живучесть

### Введение

В настоящее время планированию групповых действий летательных аппаратов (ЛА) при наблюдении наземных объектов уделяется повышенное внимание [1–9]. Обычно используется режим поочередного наблюдения различных объектов одним ЛА, а главной задачей считается маршрутизация группового полета при планировании обслуживания заявок как до, так и во время полета. Однако процесс

самого обслуживания этих заявок исследуется не в полной мере, в частности, не решена задача назначения допустимой длительности наблюдения объектов с нужным качеством и с учетом живучести ЛА.

Особую важность оптимизация этого процесса приобретает в динамической обстановке, когда условия наблюдения носят случайный характер из-за перерасхода топлива, либо отставания от заданного графика полета, низкого качества полученной видеoinформации и других причин. В данной работе предложены меры по снижению негативного влияния этих факторов, в том числе за счет решения задачи

\*Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-08-00652.

выбора общего числа ЛА в одном вылете, обеспечивающего успешное обслуживание заявок при наблюдении объектов.

Целью работы является повышение качества предполетного планирования группового полета, гарантирующего успешное обслуживание всех заявок в одном вылете с учетом влияния живучести ЛА и различной требуемой длительности обслуживания заданных объектов.

### Постановка задачи

Необходимо решить задачу при следующих допущениях.

1. Считается, что до начала полета на указанной территории заданы число  $n$  и состав наземных объектов наблюдения с известными координатами их местоположения, различными априорными важностями  $B_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) и требуемым графиком наблюдения каждого из них "в нужное время и в нужном месте" [10–12].

2. Во время полета источником полетных заданий является случайный поток заявок со средней интенсивностью  $\lambda$  их поступления, возникающий из-за необходимости получения новой видеoinформации, при заданном среднем расстоянии  $r_{cp}$  между местоположением объектов на территории.

3. Для обслуживания наземных объектов используется группа однотипных ЛА ( $i = 1, \dots, N$ ) с заданной постоянной скоростью полета  $V$ , имеющимся запасом топлива  $\Delta V_T$  и известным общим временем  $T$  одного вылета.

4. Под обслуживанием понимается наблюдение каждого объекта на указанной высоте в течение определенного времени  $\Delta t$ , либо в случае использования малой авиации "по вызову" указанное место получения заявки является пунктом вылета для попадания из него в другой указанный пункт. При этом известны допустимые пределы времени обслуживания  $\Delta t$  одной заявки

$$\Delta t_{\min} < \Delta t < \Delta t_{\max}. \quad (1)$$

5. Длительность обслуживания на каждом очередном шаге зависит от следующих факторов:

— недостаточной надежности обнаружения объектов в зависимости от освещенности наблюдаемой местности, высоты полета ЛА при наблюдении и других причин;

— недостаточного запаса топлива из-за его перерасхода на предыдущих шагах обслуживания;

— невысокой априорной важности обслуживаемой заявки по сравнению с ожидаемой важностью на последующем этапе группового полета.

6. В процессе полета возможны случайные отказы бортового оборудования ЛА или потеря живучести части из них при действии внешних факторов, что требует перепланирования групповых действий и, кроме того, учета включения в план вылета запасных ЛА.

Требуется:

— сформировать алгоритм оперативного определения допустимой длительности очередного наблюдения;

— при оптимизации многомерной маршрутизации группового полета обеспечить перед вылетом назначение нужного числа ЛА с учетом потери их живучести, гарантирующего успешное обслуживание всех заявок.

### Алгоритм определения длительности наблюдения при обслуживании очередной заявки на основе нечеткой логики

В процессе выполнения группового полета ЛА существует ряд негативных факторов, которые оказывают влияние на длительность наблюдения наземного объекта при обслуживании очередной заявки. Дело в том, что обычно планируется фиксированная длительность наблюдения очередных объектов в штатной ситуации. Однако реальные условия мониторинга объектов часто отличаются от расчетных. К числу мешающих непредвиденных факторов относятся, например, недостаточная освещенность участка местности, изменения относительной важности объектов и другие, которые будут подробно рассмотрены ниже. Учет таких факторов в условиях неопределенности целесообразен с помощью не только количественных, но и качественных оценок на основе метода нечеткой логики [13–16]. Это позволит повысить эффективность оперативного планирования полета и дает возможность вместо заданной неизменной длительности наблюдения использовать переменную величину, иногда меньшую, а иногда большую в зависимости от конкретной обстановки.

Алгоритм определения длительности наблюдения при обслуживании очередной заявки предлагается описать в виде процедуры нечеткой логики, состоящей из следующих функций принадлежности.

1. Функция  $F_1$  принадлежности успешному обнаружению объекта в зависимости от нормированного значения высоты полета  $X_1$  при использовании различных технических средств представлена на рис. 1. Поиск наземного объекта при его обнаружении на разной высоте  $H_j$  может осуществляться как оптико-электронными техническими средствами (функция принадлежности  $F_{11}$ ), так и радиолокационными (функция принадлежности  $F_{12}$ ). На рис. 1 обозначено  $X_{1кр}$  — начальное критическое значение в момент падения уверенности в обнаружении объекта при увеличении высоты полета. В процедуре нечеткой логики  $X_{1кр} = a_1$ , при этом  $a_2$  — заданное конечное значение в момент падения уверенности в обнаружении объекта,  $a_2 = 1$ .

2. Функция  $F_2$  принадлежности успешному обнаружению объекта в зависимости от нормированного значения израсходованного топлива  $\Delta V_j$  и освещенности  $X_2$  представлена на рис. 2. На рис. 2 обозначено  $X_{2кр}$  — начальное

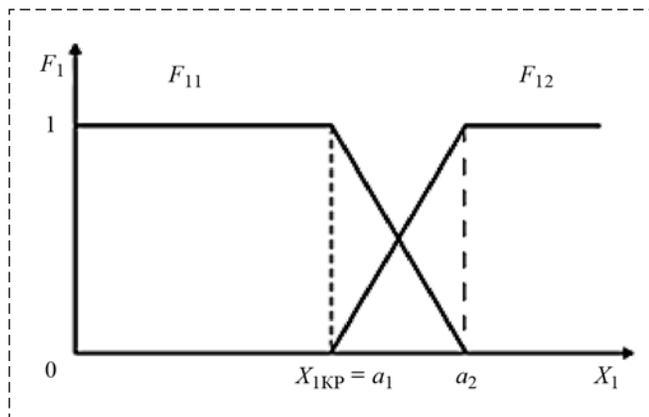


Рис. 1. Функции принадлежности успешному обнаружению в зависимости от высоты полета

Fig. 1. Successful detection membership functions as a function of flight altitude

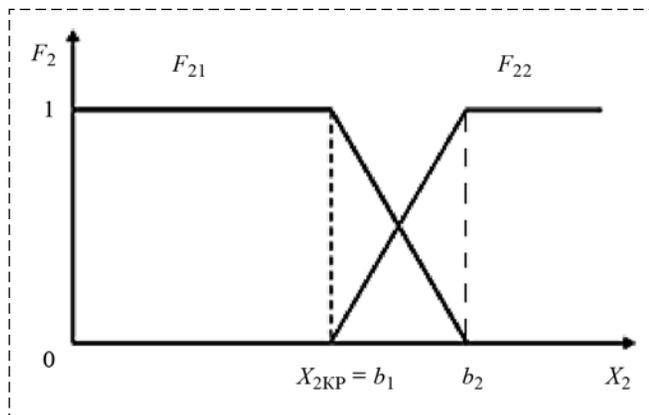


Рис. 2. Функции принадлежности успешному обнаружению в зависимости от освещенности

Fig. 2. Successful detection membership functions as a function of illumination

критическое значение в момент падения уверенности в обнаружении объекта при увеличении расхода топлива. В процедуре нечеткой логики  $X_{2кр} = b_2$ , при этом  $b_2$  — заданное конечное значение в момент падения уверенности в обнаружении объекта,  $b_2 = 1$ .

Для реализации алгоритма определения длительности наблюдения разработана специализированная экспертная система, представленная на рис. 3. Структура экспертной системы включает следующие элементы: нормализатор, фазификатор с функциями принадлежности, машину логического вывода, базу правил нечеткого вывода и дефазификатор.

На входе экспертной системы в оценке приоритета обслуживания очередного объекта учитываются следующие величины:  $H_j$  — высота полета,  $\Delta V_j$  — значение израсходованного топлива и  $B_j$  — динамическая важность очередного объекта обслуживания. Входные переменные в блоке "нормализатор" преобразуются в безразмерные

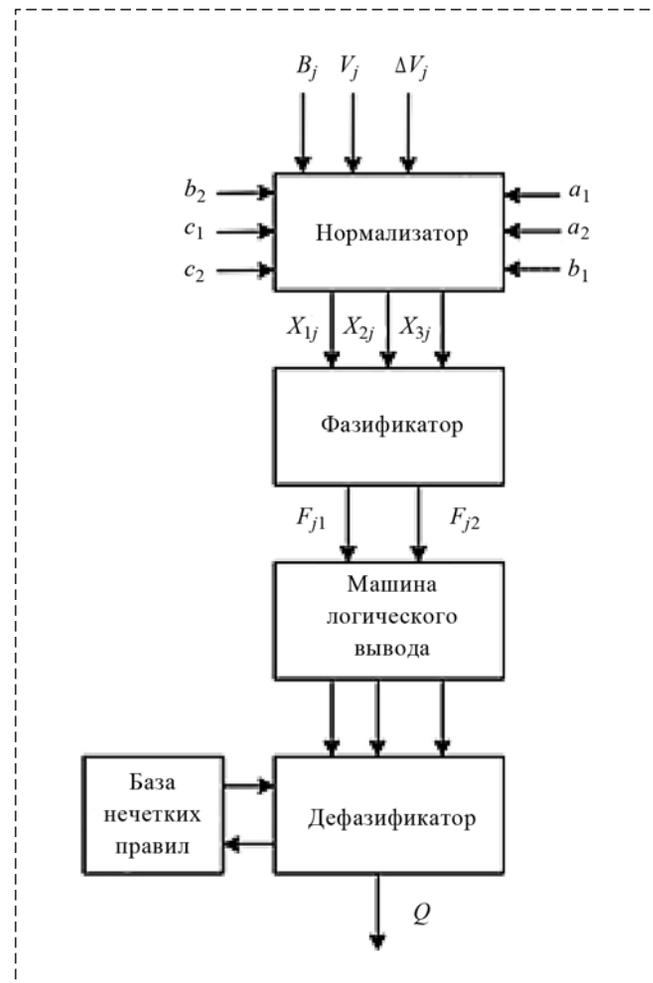


Рис. 3. Функциональная схема экспертной системы нечеткой логики

Fig. 3. Fuzzy logic expert system functional diagram

величины путем умножения на соответствующие масштабные коэффициенты и поступают в фазификатор. Фазификатор, применяя функции принадлежности к нормализованным входным величинам, определяет значения соответствующих входных лингвистических переменных. Затем машина логического вывода на основе совокупности правил нечеткого логического вывода преобразует входные переменные в нечеткие управляющие решения. На выходе экспертной системы формируется альтернатива — продолжить поиск объекта либо прекратить.

На рис. 3 обозначено  $c_1$  — значение интервальной точки  $X_{3кр} = c_1$ , которое соответствует началу падения уверенности в продолжении наблюдения при уменьшении априорной важности,  $c_2$  — заданное конечное значение в момент падения уверенности в обнаружении объекта,  $c_2 = 1$ .

Свертка перечисленных величин  $F_{j1}(X_j)$  и  $F_{j2}(X_j)$ , где  $j = 1, \dots, 3$  ( $H_j$ ,  $\Delta V_j$  и  $B_j$ ) позволяет получить оценку возможности выполнения успешного обслуживания в виде коэффициента уверенности  $Q$ :

$$Q = \prod_{j=1}^3 (F_{j1} + F_{j2}). \quad (2)$$

На рис. 3 обозначены:

$$X_{1j} = \frac{H_j}{H_{\max}}, X_{2j} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_T}, X_{3j} = \frac{B_j}{B_{\max}}. \quad (3)$$

При ухудшении перечисленных выше факторов искомый коэффициент уверенности  $Q$  в продолжении поиска объекта падает, как по-

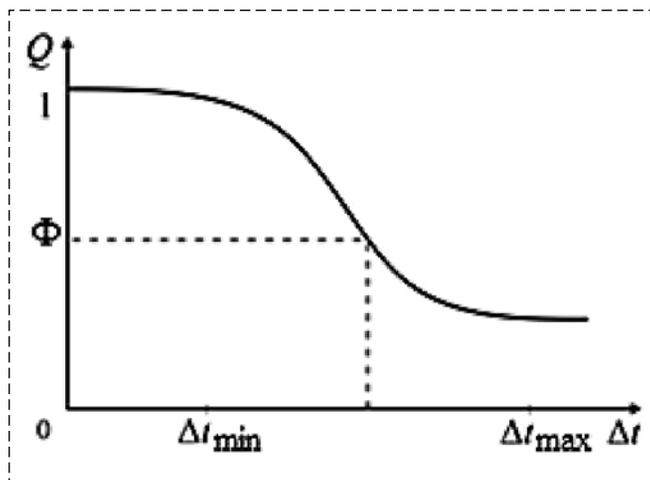


Рис. 4. График падения коэффициента уверенности в ходе поиска цели при ухудшении негативных факторов в зависимости от длительности наблюдения  $\Delta t_j$

Fig. 4. The graph of the decrease in the confidence coefficient during the search for a target with the negative factors deterioration, depending on the observation duration

казано на рис. 4. На рис. 4 обозначены  $\Delta t_{\min}$  и  $\Delta t_{\max}$  — минимальное и максимальное времена обслуживания.

При достижении коэффициентом  $Q$  заданного порога  $\Phi$  процесс поиска прекращается. Это позволяет в целом сэкономить общее время выполнения всего полета. Сравнение предложенного и известного подходов при не учете перечисленных факторов показывает, что использование процедуры нечеткой логики сокращает длительность наблюдения в среднем на 10...15 %.

### Особенности оценки требуемого числа летательных аппаратов при обслуживании потока заявок

Наряду с выполнением полетного задания, сформированного до вылета, особое значение в рассматриваемой задаче имеет обслуживание заявок, поступающих во время полета. Решение такой задачи наиболее характерно для малой авиации, выполняющей перелеты "по вызову", когда место и время появления этих заявок случайно, а многомерная маршрутизация группового полета имеет свои особенности.

При известном подходе к многомерной маршрутизации [17] в задаче целераспределения ЛА между заявками участвуют только свободные ЛА, а их приоритет определяется только близостью к очередной анализируемой заявке. Кроме того, в предложенном авторами новом подходе [18] на основе минимаксного критерия назначение динамических приоритетов осуществлялось однократно без учета многокритериальности задачи.

Поэтому в данной работе для повышения оперативности обслуживания предлагается следующий перечень операций многомерной маршрутизации.

1. На каждом шаге планирования обслуживания случайно возникших заявок сначала формируется множество этих заявок числом не более  $N$  на основе динамического приоритета  $\Pi_1(j)$  для претендующих на обслуживание заявок [19]:

$$\Pi_1(j) = \max_{j=1, \dots, N} \left( \frac{1}{R_j} + m_1 \right) (\tau_j + m_2), \quad (4)$$

где  $\tau_j$  — время ожидания заявки в очереди;  $R_j$  — общая удаленность места возникновения заявки от всех ЛА, в том числе и занятых, что

раньше не учитывалось;  $m_1$  и  $m_2$  — назначенные экспертным путем масштабные коэффициенты.

2. С помощью минимаксного критерия выполняется операция целераспределения заявок между всеми ЛА, в том числе занятыми, поскольку в ряде случаев эти ЛА после завершения обслуживания своей заявки могут оказаться ближе к новой заявке.

3. Затем определяется наиболее удаленная от группы ЛА заявка, и для нее определяется наиболее близкий ЛА, а также тот ЛА, время "простоя" которого на земле максимально. При этом должен использоваться другой динамический приоритет  $\Pi_2(i)$  для ЛА, претендующих на попадание в план группового полета:

$$\Pi_2(i) = \min_{j=1, \dots, N} (r_{ij} + m_3)(\Delta t_i + m_4), \quad (5)$$

где  $r_{ij}$  — расстояние между назначенной наиболее удаленной заявкой  $j$  и  $i$ -м ЛА, в том числе занятым;  $\Delta t_i$  — время "простоя" ЛА, освободившегося от обслуживания;  $m_3$  и  $m_4$  — заранее неизвестные масштабные коэффициенты, назначенные по аналогии с  $m_1$  и  $m_2$  экспертным путем [20]. Принципиальным отличием данной работы является предложенный подход к целераспределению, использующий два приоритета —  $\Pi_1$  для объекта наблюдения и  $\Pi_2$  для ЛА, в отличие от, например, известных подходов, рассмотренных в работах [21—23].

Нужно отметить, что на основе предложенного подхода достигается заметное снижение средней длительности перелетов, которая становится меньше, чем  $r_{cp}$ . Поэтому, если учесть общепринятые в теории массового обслуживания условия [23], то коэффициент загрузки  $\rho$  при обслуживании одним ЛА должен быть явно меньше, чем подлежащее оценке число  $\Delta N_1$  всех ЛА:

$$\rho = \frac{\lambda}{M_1} = \frac{\lambda r_{cp}}{V} < \Delta N_2, \quad (6)$$

где  $M_1$  — средняя скорость обслуживания одной заявки при перелете одного ЛА, и внесенные в многомерную маршрутизацию изменения гарантируют успешное обслуживание при выполнении простого равенства

$$\Delta N_1 = \frac{\lambda r_{cp}}{V}. \quad (7)$$

## Планирование числа летательных аппаратов в групповом полете с учетом потерь их живучести

Одним из факторов, мешающих успешному обслуживанию объектов, является возможный выход из строя в полете одного или нескольких ЛА в случае отказов бортового оборудования или влияния внешних помех при наблюдении [24, 25]. В случае интенсивных отказов работоспособности ЛА очевидно, что число  $N$  ЛА должно быть увеличено, и это число непосредственно связано с вероятностью гибели  $P_T$ , которую нужно рассчитать. Искомое значение  $P_T$  определяется как надежностью бортового оборудования, а точнее, его отказоустойчивостью, так и потерей живучести при действии внешних негативных факторов, прежде всего радиопомех.

Поэтому потерю живучести можно трактовать как результат противодействия двух сторон [26—29], при котором рациональное поведение соответствует известному минимаксному критерию [26]. Для этого нужно проанализировать динамику потерь в различных случаях и, создав модель потерь живучести, найти значение  $P_T$  с помощью компьютерного моделирования. При этом будем понимать, что  $P_T$  — это средняя вероятность потери живучести одного ЛА при обслуживании одного наземного объекта на одном шаге  $m$  перелета ЛА к этому объекту.

Остановимся на последнем параметре более подробно. Считается, что потеря живучести  $x_m$  растет как при увеличении времени  $\Delta t$  действия негативных факторов, так и в зависимости от разницы противодействующих сил, что упрощенно можно представить в виде следующей экспоненциальной зависимости:

$$x_{m+1} = x_m e^{-P_T(\Delta t)}, \quad (8)$$

где  $x_m$  и  $x_{m+1}$  — начальное и конечное значение живучести ЛА.

Тогда процесс противодействия можно описать с помощью двух нелинейных дифференциальных уравнений (типа Риккати) [30—32], аналитическое решение которых не существует:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -xy[k_1 + k_0(y - x)], \\ \dot{y} &= -xy[k_2 - k_0(y - x)], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $y$  — текущее значение живучести противодействующих сил, которое снижается, и после ее нормирования это соответствует неравенству

$$0 \leq y_j \leq 1; \quad (10)$$

$x$  — значение живучести одного конкретного ЛА, которое тоже снижается, а после нормирования также соблюдается неравенство

$$0 \leq x_j \leq 1; \quad (11)$$

$k_0, k_1, k_2$  — заданные нормированные коэффициенты скорости потерь живучести.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования потерь живучести для трех случаев: 1 — при слабом действии помех; 2 — при равенстве противодействующих сил; 3 — при сильном противодействии.

Из рис. 5 видно, что наиболее приемлемым является вариант 2, когда возможна полная финальная потеря живучести  $x(t) \rightarrow 0$ , если в системе уравнений (9) принять условие  $k_1 = k_2$ ,  $x(0) = y(0)$ , и тогда  $x(t) = y(t)$ , что превращает систему уравнений (9) в одно дифференциальное уравнение Бернулли:

$$\dot{x} = -k_1 x^2. \quad (12)$$

Полученное уравнение (12) имеет строгое аналитическое решение вида

$$x(t) = \frac{1}{\frac{1}{x(0)} + k_1 t}. \quad (13)$$

Сравнение найденного поведения (13) с экспоненциальной моделью (8), содержащей в качестве параметра вероятность гибели  $P_T$ , позволяет получить следующую приближенную оценку:

$$P_T \approx 0,1k_1 \Delta t. \quad (14)$$

Результаты компьютерного моделирования показывают, что реальные значения вероятности гибели ЛА в полете лежат в пределах  $P_T < 0,1$ . В частности, при  $x_m < 0,1x$  и  $\Delta t = 0,5$  ч получим, что вероятность гибели окажется равной  $P_T = 0,05$  при  $k_1 = 1$ . В этой ситуации, если считать значение  $P_T$  заданным, то можно приближенно оценить среднее число  $K$  потерянных ЛА:

$$K = 1 - (1 - P_T)^n \cong nP_T. \quad (15)$$

Указанное значение  $K$  определяет требуемое число  $\Delta N_2$  дополнительных ЛА. Наличие заранее сформированных запасных планов перед вылетом, полученных при уменьшении числа ЛА на один, два и т. д., позволит уже в самом полете без потерь времени перейти на новый

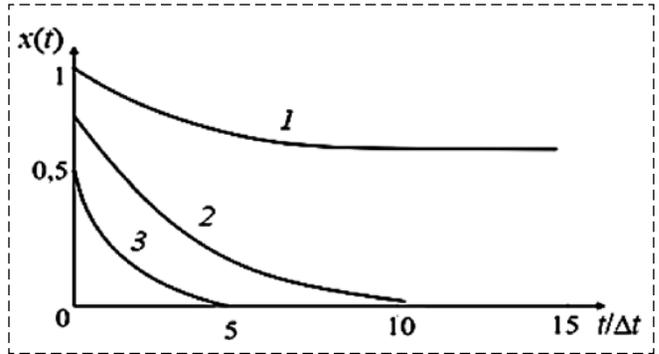


Рис. 5. Графики снижения живучести в зависимости от длительности наблюдений

Fig. 5. The decrease in survivability graphs depending on duration of observations

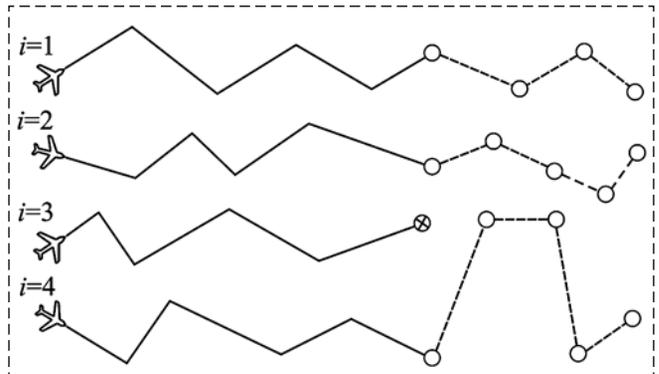


Рис. 6. Схема группового полета четырех ЛА с учетом отказа одного из них

Fig. 6. Four aircraft group flight scheme in case of one of them failure

режим группового полета. Число  $L$  запасных планов предполетного планирования определяется формулой

$$L = 0,5[N(N+1) - K(K+1)]. \quad (16)$$

Схема переключения работы группы ЛА с основного плана на запасной при потере одного ЛА показана на рис. 6.

### Назначение общего числа ЛА в одном вылете

Задача обоснования рационального назначения числа ЛА в одном вылете занимает важное место в повышении качества планирования группового полета ЛА. С учетом случайного характера динамической обстановки эта задача решается с помощью теории массового обслуживания [23], согласно которой возможны три полетных ситуации:

- штатный режим, когда все ЛА заняты обслуживанием;

- "пиковый" режим перегрузки в работе, что приводит к задержкам в обслуживании и нежелательному увеличению времени  $\tau_j$  ожидания заявок в очереди;
- режим "простоя" в обслуживании", когда ряд ЛА ожидает вылета на стоянке в течение времени  $\Delta t_i$ , что приводит к дополнительным эксплуатационным затратам.

В двух названных последних режимах в виде средних значений параметров имеются свои штрафные функции — *время ожидания*  $\tau_{cp}$  для новых заявок и *время простоя*  $\Delta t_{cp}$  для свободных от обслуживания ЛА. Значение  $\tau_{cp}$  определяет *первую штрафную функцию* несовершенства системы, которая, как показывают расчеты, снижается при увеличении числа  $N$ , т. е. при  $d\tau_{cp}/dN < 0$ .

Вместе с тем, увеличение числа используемых ЛА приведет к росту прочих эксплуатационных затрат, связанных с увеличением числа свободных каналов системы с ростом среднего времени  $T$  "простоя" ЛА:

$$T = \frac{S_{cp}(N)}{VN}. \quad (17)$$

В итоге эксплуатационные затраты  $\Theta$  образуют *вторую штрафную функцию* в виде суммы затрат за среднее время перелета и за время "простоя", которая равна

$$\Theta_{cp} = \frac{1}{qV} + \frac{S_{cp}(N)}{VN} \delta, \quad (18)$$

где  $\delta$  — коэффициент отношения затрат во время "простоя" к затратам во время полета.

В отличие от первой штрафной функции величина  $\Theta$  при увеличении числа  $N$  растет, т. е.  $d\Theta/dN > 0$ . Поэтому существует некий оптимум при выборе числа  $N$ , значение которого зависит от сформированного единого критерия, учитывающего обе штрафные функции одновременно. В данной работе для этого предлагается использовать хорошо зарекомендовавшую себя мультипликативную форму критерия  $I_0$ , содержащего как аддитивные слагаемые, так и их произведения [16, 18]:

$$I_0 = \min[(\tau_{cp} + m_5)(\Theta_{cp} + m_6)] = \min \Pi_1 \Pi_2, \quad (19)$$

где  $m_5, m_6$  — масштабные коэффициенты значимости  $\tau_{cp}$  и  $\Theta_{cp}$ , отличающиеся тем, что если  $m_5 < m_6$ , то второй множитель имеет пониженную важность и, наоборот, при  $m_5 > m_6$

значимость первого множителя минимальна. Применение критерия (19) обеспечивает сбалансированность системы и позволяет избежать "узких мест" из-за того, что если один из множителей  $\Pi_1$  или  $\Pi_2$  слишком велик, то сразу резко возрастает значение  $I_0$  интегральной штрафной функции. Если же исходить из общепринятой концепции баланса спроса (числа новых заявок) и предложения (числа свободных ЛА), то можно принять равным друг другу значения  $m_5 = m_6$ , назначаемые до полета экспертным путем.

В результате использования формулы (19) по результатам компьютерного моделирования оказалось, что потребное число  $\Delta N_0$  ЛА для обслуживания заявок, появившихся до полета, в среднем равно

$$\Delta N_0 = \frac{n(r_{cp} + V\Delta t)}{VT}, \quad (20)$$

где  $VT/(r_{cp} + V\Delta t)$  — среднее число заявок до полета, обслуженных в полете одним ЛА.

Тогда общая формула оценки числа  $N$ , потребного для успешного обслуживания, принимает вид

$$N = \Delta N_0 + \Delta N_1 + \Delta N_2 = \frac{n(r_{cp} + \Delta t)}{VT} + \frac{\lambda r_{cp}}{V} + nP_r. \quad (21)$$

Первое слагаемое содержит оценку числа  $\Delta N_0$  для выполнения предполетного задания. Второе слагаемое предполагает качественное обслуживание новых заявок, поступивших в самом полете. Третье слагаемое учитывает необходимый резерв для пополнения авиационной группировки при частичном выходе ЛА из строя. В целом величина  $N$  зависит от семи параметров, указанных в исходных данных.

В качестве примера проведен расчет числа ЛА при следующих данных:  $n = 100$ ;  $T = 220$  мин;  $V = 2$  км/мин;  $\Delta t = 1$  мин;  $r_{cp} = 20$  км;  $\lambda = 0,1$  мин<sup>-1</sup>;  $P_r = 0,02$ . В результате расчета получено  $N = 5 + 2 + 1 = 8$ . Таким образом, найденное число  $N$  обеспечивает успешное обслуживание процесса наблюдений.

## Заключение

1. Сформулирована постановка задачи рационального назначения числа ЛА до полета и допустимой длительности наблюдения назем-

ных объектов в самом полете в динамической обстановке.

2. Определен состав негативных факторов, влияющих на выбор длительности наблюдений, и на основе нечеткой логики предложен облик экспертной системы, формирующей на своем выходе в реальном времени коэффициент уверенности в продолжении обслуживания очередного наземного объекта.

3. Разработанная математическая модель потери живучести ЛА основана на уравнении Бернулли и позволяет оценить дополнительное число резервных ЛА в одном вылете.

4. Принципиально новым результатом, в отличие от известных подходов к решению задачи целераспределения объектов между ЛА при групповом полете, является совместное использование в минимаксном алгоритме двух динамических приоритетов для выбора объектов наблюдения и для назначения обслуживающих ЛА. На основе компьютерного моделирования установлено, что предложенный подход в среднем повышает скорость обслуживания на 15...20 %.

5. Получена общая формула определения числа ЛА в одном вылете, состоящего из трех слагаемых — числа ЛА для выполнения предполетного задания, для обслуживания заявок, поступивших в полете, и для пополнения резерва с учетом потерь живучести ЛА, что в целом обеспечивает успешное обслуживание процесса наблюдений.

#### Список литературы

1. **Ким Н. В., Крылов И. Г.** Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62.
2. **Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Kozorez D. A.** Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups // INCAS Bulletin. 2019. Vol. 11, N. 1. P. 75—88.
3. **Мелехин В. Б., Хачумов М. В.** Планирование автономным беспилотным летательным аппаратом эффективных маршрутов облета целей // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 4. С. 3—14.
4. **Ozlem Sahin Meric.** Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. N. 3. P. 449—452.
5. **Патент 02321954 США** МПК8 В 61 L 3/12 3/22, Н 04 L1/00, Н 04 Q 7/38 7/20. Интеллектуальная система связи, управления, и контроля для наземных транспортных средств / Пелтц Д. М., Смит Ю. А., Краелинг М., Фой Р. Д., Пелтонен Г. П., Келлнер С. Э., Браунт Р. Ф., Джонсон Д. К., Деларуэль Д. Г.; заявитель и патентообладатель Дженерал Электрик Компани. — № 2004136603/09; заявл. от 01.04.2003; опубл. 10.04.2008.

6. **Rebrov V. A., Rudel'son L. E., Chernikova M. A.** A model of flight request collection and processing in the flight scheduling problem // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2007. Vol. 46, N. 3. P. 429—443.

7. **Себряков Г. Г., Красильщиков М. Н., Евдокименков В. Н.** Алгоритмическое и программно-математическое обеспечение предполетного планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов // Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов: материалы отчетного мероприятия РФФИ по конкурсу "офи-м" (тема 604) в рамках международной научно-практической конференции. Волгоград. 2018. С. 30—32.

8. **Николаев С. В.** Определение в испытаниях вероятности обнаружения наземных объектов с борта летательного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 131—144.

9. **Фомин А. Н., Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д. и др.** Теоретические и физические основы радиолокации и специального мониторинга / Под общ. ред. И. Н. Ищука. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. 292 с.

10. **Лебедев Г. Н., Мирзоян Л. А.** Нейросетевое планирование действий по облету наземных объектов группой летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 12. С. 34—40.

11. **Ивашова Н. Д., Михайлин Д. А., Чернякова М. Е., Шаныгин С. В.** Нейросетевое решение задачи оперативного планирования маршрутного полета беспилотных летательных аппаратов и назначение времени наблюдения наземных объектов с помощью нечеткой логики при отображении этих результатов на экране компьютера до вылета // Труды МАИ. 2019. № 104. С. 17.

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

13. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, N. 3. P. 338—353.

14. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.

15. **Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р., Косенко Е. Ю. и др.** Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М: ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2015. 305 с.

16. **Еремин А. И., Кульчак А. М., Лебедев Г. Н., Сельвесюк Н. И.** Двухуровневая интеллектуальная система предотвращения опасных полетных ситуаций в сложных условиях // Информатика и системы управления. 2020. № 3(65). С. 87—101.

17. **Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Оркин С. Д.** Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. М: МАИ, 2015. 272 с.

18. **Goncharenko V. I., Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A., Tsareva O. Yu.** Intelligent System for Planning Group Actions of Unmanned Aircraft in Observing Mobile Objects on the Ground in the Specified Area // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2021. Vol. 60, N. 3. P. 379—395. DOI: 10.1134/S1064230721030047.

19. **Knyaz V., Zheltov S., Lebedev G., Mikhaylin D., Goncharenko V.** Intelligent mobile object monitoring by unmanned aerial vehicles // Proceedings of the 18<sup>th</sup> IEEE International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2019. 1—4 July. 2019 Novi Sad, Serbia. Publisher: IEEE, New York, USA. 2019. P. 1—6.

20. **Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А., Нечаев В. В.** Планирование съемки множества спортивных ме-

роприятий на обширной территории группой беспилотных летательных аппаратов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 3. С. 651–660.

21. **Медведов А. В.** Алгоритм оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов // Информация и космос. 2018. № 3. С. 167–171.

22. **Broeder G. G., Ellison G. G., Emerling R. E.** On Optimum Target Assignments // Operations Research. 1959. Vol. 7. P. 322–326.

23. **Саати Т. Л.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Под ред. И. Н. Коваленко и Р. Д. Когана. М.: Сов. радио, 1965. 510 с.

24. **Верба В. С., Гандурин В. А., Меркулов В. И.** Живучесть авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения // Эффективность систем радиоуправления. 2014. Кн. 2. С. 112–118.

25. **Моисеев В. С.** Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: РИЦ "Школа", 2017. 572 с.

26. **Айзекс Р.** Дифференциальные игры / Пер. с англ. В. И. Аркина и Э. Н. Симаковой. М.: Мир, 1967. —480 с.

27. **Корепанов В. О., Новиков Д. А.** Модели стратегического поведения в задаче о диффузной бомбе // Проблемы управления. 2015. № 2. С. 38–44.

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

29. **Gaiduk A. R., Martjanov O. V., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Hamdan N., Farhood A.** Neural Network Based Control System for Robots Group Operating in 2-d Uncertain Environment // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020. Vol. 21, N. 8. P. 470–479.

30. **Person J. D.** Approximation methods in optimal control // J. of Electronics and Control. 1962. Vol. 12. P. 453469.

31. **Mrasek C. P., Clouter J. R.** Control design for the nonlinear benchmark problem via sdre method // Int. J. of Robust and Nonlinear Control. 1998. Vol. 8. P. 401–433.

32. **Menon P. K., Ohlmeyer E. J.** Integrated Design of Angel Missile Guidance and Control Systems // Proc. 17<sup>th</sup> Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED99). Haifa, Israel, June 28–30. 1999. P. 1470–1494.

## Planning the Number of Aircraft in a Group Flight with their Survivability and the Required Observation Duration of Ground Objects

**V. I. Goncharenko**<sup>1</sup>, goncharenkovi@mai.ru, **G. N. Lebedev**<sup>1</sup>, kaf301@mai.ru,  
**D. A. Mikhaylin**<sup>1</sup>, tau\_301@mail.ru, **V. B. Malygin**<sup>2</sup>, mbv898@ya.ru,  
**A. V. Rumakina**<sup>1</sup>, a\_rumakina@mail.ru,

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,

<sup>2</sup> Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Goncharenko Vladimir I., Dr. of Eng. Sc., Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: goncharenkovi@mai.ru*

*Accepted on February 24, 2022*

### Abstract

*In the interests of improving the quality of a group aircraft flight planning, the developing algorithms problem formulation for the operational determination of the permissible observation duration for ground objects is formulated. An algorithm for determining the observation duration when servicing the next request to be described in the form of a fuzzy logic procedure is proposed. To implement the algorithm for determining the duration of observation, a specialized expert system has been developed. The input of the expert system receives values that describe the influence of the factors in assessing the priority of servicing the next object. At the output of the expert system, an alternative is formed to continue searching for an object or to stop. A new approach to solving the target distribution problem between aircraft in a group flight is proposed. It is based on the joint use of two dynamic priorities in the minimax algorithm for selecting observation objects and for assigning service aircraft. An original approach to determine the rational aircrafts composition in one flight is proposed. This is done with the help of the queuing theory apparatus, which takes into account the random nature of the dynamic situation. To estimate the required aircrafts composition when servicing the flow of requests, the countermeasures process is described using two nonlinear differential equations (of the Riccati type). A general formula for determining aircrafts composition in one flight has been obtained. Mathematical model of the aircraft survivability loss in the form of the Bernoulli equation is formed. Computer simulation of the aircraft survivability losses in one flight was carried out for three cases: with weak interference, with equal opposing forces, with strong counteraction.*

**Keywords:** objects of observation, unmanned aerial vehicle, flow of applications, survivability

**Acknowledgements:** The article was prepared with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 20-08-00652.

For citation:

**Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A., Malygin V. B., Rumakina A. V.** Planning the Number of Aircraft in a Group Flight with their Survivability and the Required Observation Duration of Ground Objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 8, pp. 430–439.

DOI: 10.17587/mau.23.430-439

## References

1. **Kim N. V., Krylov I. G.** Group use of an unmanned aerial vehicle in observation tasks, *Proceedings of the MAI*, 2012, no. 62, available at: <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/gruppovoe-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf> (date of access: 03.02.2021) (in Russian).
2. **Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Kozorez D. A.** Development of pre-flight planning algorithms for the functional-program prototype of a distributed intellectual control system of unmanned flying vehicle groups, *INCAS Bulletin*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 75–88.
3. **Melekhin V. B., Khachumov M. V.** Effective routes planning by an autonomous unmanned aerial vehicle of targets overflights, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2020, no. 4, pp. 3–14 (in Russian).
4. **Ozlem Sahin Meric.** Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2015, no. 3, pp. 449–452.
5. **Patent 02321954 USA MPK8 B 61 L 3/12 3/22, H 04 L1 / 00, H 04 Q 7/38 7/20.** Intelligent communication, control, and monitoring system for land vehicles / Peltz D. M., Smith Yu.A., Kraeling M., Foy R. D., Peltonen G. P., Kellner S. E., Bryant R. F., Johnson DK, Delaruel DG; applicant and patentee General Electric Company. — no. 2004136603/09; declared from 01.04.2003; publ. 10.04.2008.
6. **Rebrov V. A., Rudelson L. E., Chernikova M. A.** A model of flight request collection and processing in the flight scheduling problem, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2007, vol. 46, no. 3, pp. 429–443.
7. **Sebryakov G. G., Krasilshchikov M. N., Evdokimenkov V. N.** Algorithmic and software-mathematical support for pre-flight planning of unmanned aerial vehicles group actions, *Fundamental problems of group interaction of robots: materials of the RFBF reporting event for the "ofi-m" competition (topic 604) within the framework of an international scientific and practical conference, Volgograd*, 2018, pp. 30–32 (in Russian).
8. **Nikolaev S. V.** Determination in tests of detecting ground objects probability from the aircraft board, *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 131–144 (in Russian).
9. **Fomin A. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. et al.** Theoretical and physical foundations of radar and special monitoring, Krasnoyarsk, Sib. Fed. un-ty, 2016, 292 p. (in Russian).
10. **Lebedev G. N., Mirzoyan L. A.** Neural network actions planning to fly over ground objects by a group of aircraft, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2005, no. 12, pp. 34–40 (in Russian).
11. **Ivashova N. D., Mikhaylin D. A., Chernyakova M. E., Shanygin S. V.** A neural network solution to the problem of operational route flight planning of unmanned aerial vehicles and the observation time ground objects appointment using fuzzy logic when displaying these results on a computer screen before departure, *Proceedings of the MAI*, 2019, no. 104, pp. 17 (in Russian).
12. **Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Martynkevich D. S., Rumakina A. V.** Formulation of the problem of planning the routes of aircraft when servicing a random flow of incoming requests in flight, *Bulletin of computer and information technologies*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 17–27 (in Russian).
13. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338–353.
14. **Zade L.** The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions, Moscow, Mir, 1976, 166 p. (in Russian).
15. **Beloglazov D. A., Gaiduk A. R., Kosenko E. Yu. et al.** Group control of mobile objects in uncertain environments, Moscow, Publishing company "Physical and mathematical literature" LLC, 2015, 305 p. (in Russian).
16. **Eremin A. I., Kulchak A. M., Lebedev G. N., Selvesyuk N. I.** Two-level intelligent system for preventing dangerous flight situations in difficult conditions, *Informatics and Control Systems*, 2020, no. 3 (65), pp. 87–101.
17. **Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Orkin S. D.** Mixed groups of manned and unmanned aerial vehicles control in a single information and control field, Moscow, MAI, 2015, 272 p. (in Russian).
18. **Goncharenko V. I., Zheltov S. Yu., Knyaz V. A., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A., Tsareva O. Yu.** Intelligent System for Planning Group Actions of Unmanned Aircraft in Observing Mobile Objects on the Ground in the Specified Area, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 3, pp. 379–395.
19. **Knyaz V., Zheltov S., Lebedev G., Mikhaylin D., Goncharenko V.** Intelligent mobile object monitoring by unmanned aerial vehicles, *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Smart Technologies*, EUROCON 2019, 1–4 July, 2019 Novi Sad, Serbia, Publisher IEEE, New York, USA, 2019, pp. 1–6.
20. **Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Mikhaylin D. A., Nechaev V. V.** The many sporting events shooting planning in a vast territory by a group of unmanned aerial vehicles, *Modern information technologies and IT education*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 651–660 (in Russian).
21. **Mefyodov A. V.** Algorithm for optimal target allocation of an autonomous attack unmanned aerial vehicles group, *Information and Space*, 2018, no. 3, pp. 167–171 (in Russian).
22. **Broeder G. G., Ellison G. G., Emerling R. E.** On Optimum Target Assignments, *Operations Research*, 1959, vol. 7, pp. 322–326.
23. **Saati T. L.** Elements of queuing theory and its applications, Moscow, Sov. radio, 1965, 510 p. (in Russian).
24. **Verba V. S., Gandurin V. A., Merkulov V. I.** Survivability of aviation complexes of radar patrol and guidance, *Efficiency of radio control systems 2014*, Book 2, pp. 112–118 (in Russian).
25. **Moiseev V. S.** Group application of unmanned aerial, Kazan, Shkola Editorial and Publishing Center, 2017, 572 p. (in Russian).
26. **Isaacs R.** Differential games, Moscow, Mir, 1967, 480 p. (in Russian).
27. **Korepanov V. O., Novikov D. A.** Strategic behavior models in the diffuse bomb problem, *Control Problems*, 2015, no. 2, pp. 38–44 (in Russian).
28. **Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G.** Collective control models and algorithms in groups of robot, Moscow, Publishing company "Physics and Mathematics Literature" LLC, 2009, 280 p. (in Russian).
29. **Gaiduk A. R., Martjanov O. V., Medvedev M. Yu., Pshikhopov V. Kh., Hamdan N., Farhood A.** Neural Network Based Control System for Robots Group Operating in 2-d Uncertain Environment, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 8, pp. 470–479.
30. **Person J. D.** Approximation methods in optimal control, *J. of Electronics and Control*, 1962, vol. 12, pp. 453–469.
31. **Mrasek C. P., Clouter J. R.** Control design for the non-linear benchmark problem via sdre method, *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, 1998, vol. 8, pp. 401–433.
32. **Menon P. K., Ohlmeyer E. J.** Integrated Design of Angel Missile Guidance and Control Systems, *Proc. 17th Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED99)*. Haifa, Israel, June 28–30, 1999, pp. 1470–1494.