

Динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса

Ананьев А.В.^{1,2*}, Рыбалко А.Г.^{1}, Иванников К.С.^{3*}, Клевцов Р.П.^{4***}**

¹*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54 А, Воронеж, 394064, Россия*

²*АО «НПП «Полет», пл. Комсомольская, 1, Нижний Новгород, 603950, Россия*

³*Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», ул. Новосельковская, 37 лит. А, Санкт-Петербург, 197375, Россия*

⁴*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», (филиал, г. Челябинск), Городок-11, 40, Челябинск, 454015, Россия*

**e-mail: sasha303_75@mail.ru*

***e-mail: rybalkovvs@yandex.ru*

****e-mail: ronin0877@mail.ru*

Статья поступила 30.11.2020

Аннотация

На основе графоаналитического метода с использованием математического аппарата марковских случайных процессов разработана динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса, позволяющая производить оценку эффективности разведывательно-ударных действий в составе групп.

В отличие от известных, модель дополнительно включает два блока, первый из которых реализует расчет вероятностных параметров ветровых возмущений за счет специального маневра – «полетов по кругу в районе объекта удара», второй –

циклы полетов по маршруту: «точка захода (разворота) на цель – точка сброса неуправляемого боеприпаса» в которой учтен вероятностный выход в «створ допустимого сброса боеприпаса».

Учет введенных блоков в модели позволяет исследовать противоречивые варьируемые параметры боевого маневрирования бесплотных летательных аппаратов малого класса. Так, с одной стороны, предложенные дополнительные маневры повышают точность сброса за счет компенсации несовершенства бортового радиоэлектронного оборудования беспилотных летательных аппаратов малого класса и как следствие – рациональный расход средств поражения. С другой же стороны дополнительное маневрирование может существенно увеличивать время процесса поражения цели, что особенно критично для временно неподвижных целей, которые могут быть выведены из-под удара. Кроме того, за счет увеличения продолжительности процесса поражения противник получает преимущество в реализации огневого и радиоэлектронного противодействия ударным действиям беспилотных летательных аппаратов малого класса.

Приведен пример расчета времени нанесения удара и реализуемой вероятности поражения при действиях по тактическим истребителям на открытых стоянках аэродромных участков дорог.

Ключевые слова: ударный беспилотный летательный аппарат, малый класс, марковский случайный процесс, пуассоновский поток, время реакции, поражение наземных целей.

Введение

В настоящее время де-факто появился новый класс ударных летательных аппаратов – беспилотные летательные аппараты (БПЛА) малого класса (МК) [1-3]. Несмотря на малую мощность ударных нагрузок БПЛА МК, в случае прямого попадания в цель, они способны нанести высокий ущерб, о чем свидетельствует практика боевого применения [4] и экспериментальные исследования [5]. Поэтому использование БПЛА МК в качестве высокоточных средств поражения представляет интерес по целой группе причин. Во-первых, тактико-технические характеристики БПЛА МК, прежде всего дальность управления и время барражирования, позволяют использовать их совместно с пилотируемой авиацией [5]. Во-вторых, БПЛА МК, объединенные в тактические группы, способны самостоятельно действовать на больших удалениях, поражая легко уязвимые объекты, например, тактические истребители (ТИ) на открытых стоянках [6]. Однако, как таковую практику их применения, на примере известных случаев [7], можно характеризовать как поражение «площадных целей», при этом сам факт «высокоточного поражения» отсутствует.

Следует отметить, что на пути к высокоточному поражению наземных целей с использованием БПЛА МК в ударном варианте существует ряд препятствий, связанных с информационным обеспечением их групповых ударных действий.

Во-первых, до определенного момента отсутствовали статистические данные о законах рассеивания габаритно-массовых макетов свободнопадающих неуправляемых контейнеров (СНК) БПЛА МК, что было восполнено по итогам

работ [1, 8]. В дополнение, в работе [9] представлены результаты разработки специального программного обеспечения «Пересвет» [10] с интегрированными в него способами полигонного обмера [11], а также результирующие законы рассеивания.

Планирование применения БпЛА различного назначения, в том числе ударных, освещено в ряде работ [12-24], в том числе дуального типа [25], однако особенности информационного обеспечения применения ударных БпЛА МК для высокоточного поражения временно неподвижных наземных целей остались не учтены. Во-первых, представляет интерес реализации блока расчета вероятностных параметров ветровых возмущений за счет специального маневра – полетов по кругу в районе объекта удара [3]. Такой маневр необходим для компенсации несовершенства бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) БпЛА МК, не позволяющего осуществлять измерение параметров ветра для корректировки оператором наземной станции управления БпЛА МК положения точки прицеливания и последующего учета при расчете в баллистическом вычислителе БпЛА МК точки сброса (относа) СНК, как это реализовано в пилотируемых авиационных комплексах [26, 27]. Во-вторых, ударные нагрузки БпЛА МК обладают недостаточной боевой мощностью, которая в совокупности с низкой точностью не позволяет обеспечить высокие вероятности поражения, равные 0,7–0,8. Тем не менее, достижение таких значений возможно за счет реализации циклов полетов по маршруту: точка захода (разворота) на цель (ТРЦ) – точка сброса неуправляемого боеприпаса (ТСБ).

И, наконец, следует понимать, что действия БпЛА МК не останутся незамеченными и дополнительное маневрирование может существенно увеличивать

время процесса поражения цели, что особенно критично для временно неподвижных целей, которые могут быть выведены из-под удара, и при этом противник получит преимущество в огневом и радиоэлектронном противодействии ударным действиям БпЛА МК.

Целью статьи является разработка динамической модели процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БпЛА МК, учитывающей маневры для компенсации несовершенства БРЭО БпЛА МК и определения с ее использованием потребного времени группового удара при достижении вероятности поражения не менее заданной.

Разработка модели

С учетом специфики рассматриваемой задачи и ее содержания представляет интерес использование графоаналитического метода и математического аппарата марковских случайных процессов [24, 25, 28]. В качестве исходных данных для разработки графоаналитической модели используем пространственно-временную модель действий разведывательно-ударных групп (РУГ) БпЛА МК самолетного типа при поражении ТИ противовоздушной обороны на открытых стоянках аэродромных участков дорог (АУД), разработанную в [29] и схематично представленную на рис. 1.

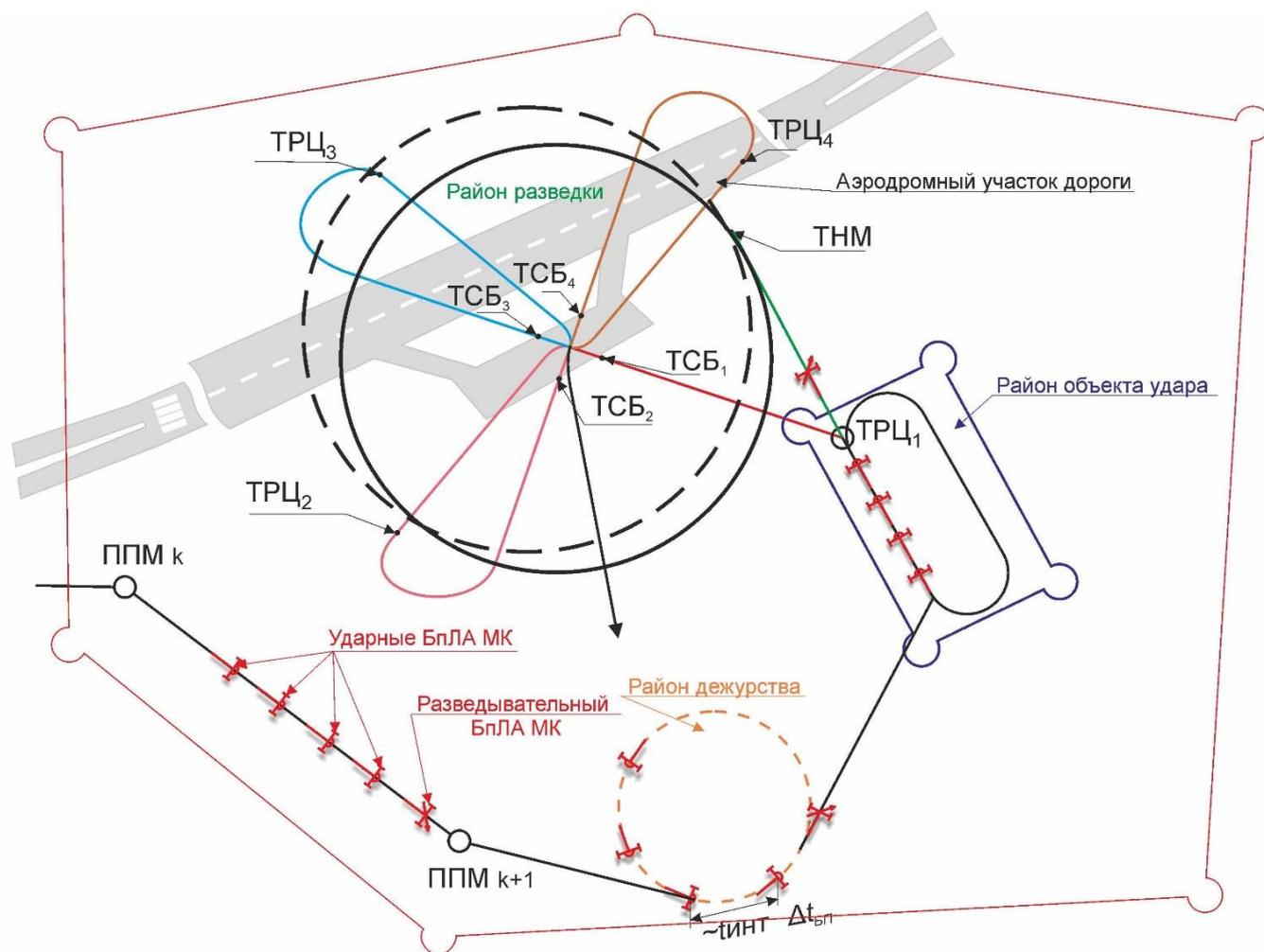


Рис. 1 Пространственно-временная модель действий разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса при поражении тактических истребителей на аэродромных участках дорог

На рис. 1 детализированы этапы действий РУГ БпЛА МК, в результате реализации которых предполагается вскрытие противником факта начала ударных действий РУГ БпЛА МК и последующий вывод из-под удара наземной цели.

Так, начальный этап разведывательно-ударных действий РУГ БпЛА МК включает полет по маршруту одного разведывательного и четырех ударных

БпЛА МК от k -го поворотного пункта маршрута (ППМ $_k$) до ППМ $_{k+1}$ (черная сплошная линия), с последующим выходом в район дежурства. Четыре ударных БпЛА МК включены в РУГ из соображений обеспечения вероятности поражения одного типового ТИ с вероятностью не менее 0,7–0,8 [29] из состава дежурных сил, временно размещаемых на АУД.

Полет БпЛА в группе осуществляется на интервале времени ($t_{умт}$), которое определяет общее время боевого порядка $\Delta t_{БП} = \sum_{n=1}^{N-1} t_{умт}$, где N – количество БпЛА МК в группе и обеспечивает достижение минимального времени между сбросами СНК отдельных БпЛА МК при условии распределения всей группы на траектории ТСБ-ТРЦ-ТСБ тактического приема «лепесток» [29] с рациональными параметрами полета (скорость полета, величина крена на разворотах), а также длины участка прямолинейного движения, необходимой для стабилизации БпЛА МК при сбросе СНК с горизонтального полета.

Во время дежурства в зонах интереса поступает команда расчетам БпЛА МК к началу выполнения разведывательно-ударных действий. Далее осуществляется вывод РУГ БпЛА МК в район объекта удара. Боевой порядок строится таким образом, что первым в группе следует разведывательный БпЛА МК (БпЛА-Р) который после выхода РУГ БпЛА МК в район удара осуществляет полет в точку начала маневра (ТНМ) для разведывательного полета. **В модели зададимся условием**, что с момента выхода БпЛА-Р осуществляется факт вскрытия атаки обороняющейся стороной, следовательно, начинается отсчет времени по проведению противником мероприятий по выводу из-под удара ТИ, начиная с выруливания с места стоянок и заканчивая

взлетом. Таким образом, существует некоторое время (T_r), которым располагают расчеты БПЛА МК для реализации задачи поражения ТИ на открытой стоянке, включая этапы доразведки и измерения параметров ветра, нанесения ударов одиночными БПЛА МК и контроля результатов удара.

Разведывательный полет БПЛА-Р осуществляется в целях доразведки фоноцелевой обстановки на стоянках авиационной техники и в целом на АУД. В ходе разведывательного полета уточняется количество ТИ, их координаты и стояночный курс. Кроме того, важной задачей является определение параметров ветра для учета сноса СНК при расчете ТСБ. На рис. 1 сплошной линией обозначена расчетная траектория полета БПЛА МК по кругу, а пунктиром – фактическая траектория движения. Несовпадение траекторий обусловлено влиянием ветра и используется для вычисления параметров ветра.

Успешное завершение разведывательного полета носит вероятностный характер и заключается в формировании автоматизированного целеуказания (АЦУ) передаваемого расчетам ударных БПЛА МК. После выдачи АЦУ при сохранении интервала следования ($t_{ум}$) группа в составе четырех БПЛА МК выполняет полет из района удара в ТСБ.

Для исключения заведомо высоковероятных промахов при сбросе СНК по причине нестабильного полета БПЛА МК по заданной траектории перед выходом в ТСБ, в том числе из-за влияния ветровых возмущений на высоте полета, устанавливаются допустимое отклонение в выходе БПЛА МК по направлению в ТСБ. Подверженность существенным отклонениям в ТСБ по направлению обусловлена несовершенством навигационной системы БПЛА МК, а именно в определении

текущих координат летательного аппарата с помощью спутниковой навигационной системы. Задание «створа» допустимых отклонений с одной стороны ведет к повышению вероятности поражения и более рациональному расходу СНК, а с другой стороны с каждым выходом за его пределы увеличивает время нанесения удара на $t_{умт}$ за счет пропуска сброса СНК при заходе на цель. В случае успешного попадания в допустимый створ по результатам сброса СНК возможны два взаимоисключающих события: поражение ТИ или промах.

После каждого сброса СНК в течении $t_{умт}$ осуществляется контроль результатов удара с использованием БПЛА-Р. В целом циклы ударов продолжаются до поражения всех ТИ путем последовательного переноса огня от цели к цели или до полного израсходования СНК всех ударных БПЛА МК [30].

Процесс нанесения группового удара БПЛА МК по ТИ на открытой стоянке АУД можно представить в виде графа состояний, отображенного на рис. 2.

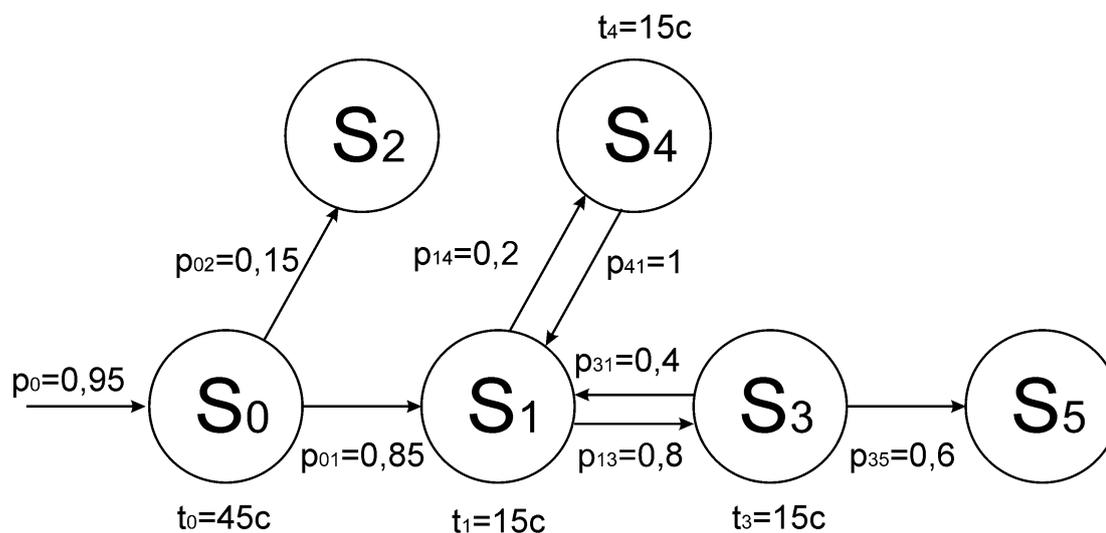


Рис. 2 Структурный граф процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса

Состояния графа имеют следующее описание.

1. S_0 – выход разведывательного БПЛА-Р в ТНМ и начало разведывательного полета с целью уточнения координат ТИ и измерения параметров ветра.
2. S_1 – возврат БПЛА-Р в ТНМ и передача АЦУ с коррекцией на ветер расчетам ударных БПЛА, полет n -го ударного БПЛА МК по маршруту ТРЦ-ТСБ.
3. S_2 – не возврат БПЛА-Р в ТНМ и не передача АЦУ с коррекцией на ветер расчетам ударных БПЛА МК, срыв разведывательно-ударных действий.
4. S_3 – выход очередного n -го ударного БПЛА МК в ТСБ с допустимым отклонением по направлению, сброс СНК, выполнение разведывательного полета для контроля результатов удара расчетом БПЛА-Р с последующей дешифрацией изображения и одновременный полет n -го ударного БПЛА МК из ТСБ в ТРЦ.
5. S_4 – выход n -го ударного БПЛА в ТСБ с недопустимым отклонением по направлению, не сброс СНК, полет n -го ударного БПЛА МК в ТРЦ по маршруту ТСБ-ТРЦ.
6. S_5 – поражение ТИ n -м ударным БПЛА МК.

Вероятности переходов из одного состояния, в другое следующие.

1. $p_0 = 0,95$ – вероятность выхода разведывательного БПЛА-Р в ТНМ и начало разведывательного полета с целью уточнения координат ТИ и измерения параметров ветра.
2. $p_{01} = 0,85$ – вероятность передачи АЦУ с коррекцией на ветер расчетам ударных БПЛА МК для обеспечения выхода n -го ударного БПЛА МК в ТРЦ по

результатам разведывательного полета.

3. $p_{02} = 0,15$ – вероятность непередачи АЦУ с коррекцией на ветер расчетам ударных БпЛА МК для обеспечения выхода n -го ударного БпЛА МК в ТРЦ по результатам разведывательного полета.

4. $p_{13} = 0,8$ – вероятность выхода n -го ударного БпЛА МК в ТСБ с допустимым отклонением по направлению после выполнения полета по маршруту ТРЦ-ТСБ и сброс СНК.

5. $p_{14} = 0,2$ – вероятность выхода n -го ударного БпЛА МК в ТСБ с недопустимым отклонением по направлению после выполнения полета по маршруту ТРЦ-ТСБ и несброс СНК.

6. $p_{35} = 0,6$ – вероятность поражения ТИ одним ударным БпЛА МК при сбросе одного СНК.

7. $p_{31} = 0,4$ – вероятность непоражения ТИ одним ударным БпЛА МК при сбросе одного СНК.

Временные интервалы этапов процесса поражения следующие.

1. $t_0 = 45 c$ – среднее время разведывательного полета БпЛА-Р по одному кругу для измерения координат и формирования АЦУ.

2. $t_1 = 15 c$ – время подлета очередного ударного БпЛА МК по линии боевого пути из ТРЦ в ТСБ.

3. $t_3 = 15 c$ – время выполнения разведывательного полета для контроля результатов удара расчетом БпЛА-Р с последующей дешифрацией изображения,

которое принято равным времени полета ударного БпЛА МК в ТРЦ по маршруту ТСБ-ТРЦ.

4. $t_4 = 15 \text{ с}$ – время выполнения разведывательного полета для контроля результатов удара расчетом БпЛА-Р с последующей дешифрацией изображения, которое принято равным времени полета ударного БпЛА МК в ТРЦ по маршруту ТСБ-ТРЦ.

Составим сначала статическую модель задачи, которая позволит рассчитать основные вероятностные характеристики результата выполнения боевой задачи: поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БпЛА МК за 180 секунд. Для этого, в соответствии с рис. 2, можно сделать следующие заключения.

1. При идеальном раскладе и успешном прохождении этапов S_0 , S_1 и S_3 , задача будет выполнена за 75 секунд, а продолжительность этапов S_0 и S_1 равна 60 секунд.

2. Каждый переход в состояние S_4 увеличивает время выполнения задачи на 15 с, учитывая вероятность перехода в это состояние $p_{14}=0,2$, а также используя понятие математического ожидания времени нахождения в S_4 , в среднем на каждом цикле выхода из S_1 будет теряться $p_{14} t_1=3 \text{ с}$.

3. С учетом второго заключения, среднее время прохождения цикла через состояние S_3 , на которые отводятся 120 секунд, с учетом потерь времени на S_1 составит $15+3=18 \text{ с}$. Отсюда, среднее число циклов ($C_{\text{ср}}$) через состояние S_3 составит $C_{\text{ср}}=120/18=6,67$ единиц.

4. Если проводить операцию не до первого поражения цели, а по истечении времени, отведенного на задачу, и при этом, при поражении одной цели, продолжать

операцию по поражению других целей, то среднее число пораженных целей (N_{cp}) составит: $N_{cp} = C_{cp} p_{35} = 6,67 \cdot 0,6 = 4$.

Построим динамическую модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БПЛА МК. На том основании, что данный процесс является вероятностным, как по состояниям, так и по времени, динамическую модель рационально строить на основе теории марковских случайных процессов с непрерывным временем и дискретным состоянием [31, 32], на теоретической базе простейших потоков.

Для применения теории случайных марковских процессов необходимо требование того, чтобы выход системы из каждого, не конечного состояния S_i , $i = 0, 1, 3, 4$, осуществляется под управлением некоторого потока событий с интенсивностью λ_i , который связан со средним временем t_i нахождения системы в состоянии S_i перед переходом в другое состояние: $\lambda_i = 1/t_i$. При этом данный поток событий должен быть стационарным потоком Пуассона, то есть простейшим [32].

Как следует из [33], пуассоновские потоки событий часто используют при моделировании боевых действий. Это связано с тем, что смена обстановки при боевых действиях, чаще всего связана с происхождением событий различной природы, которые образуют множество независимых потоков событий. В результате, управляющие процессом потоки являются суммами таких потоков, которые согласно предельной теореме теории потоков [31] будут стремиться к потоку Пуассона. Это дает основание с высокой точностью использовать марковские процессы для динамического моделирования процесса боевых действий [28], в том числе и для

описания динамики поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БПЛА МК.

В дальнейшем будем считать, что интенсивности λ_i событий в переходных потоках не зависят от времени, то есть потоки являются стационарными. Если же нужно рассматривать нестационарный поток с интенсивностью $\lambda_i(t)$, то на временном интервале проведения военной операции от t_1 до t_2 , можно использовать среднюю интенсивность для этого временного интервала:

$$\lambda_i = \int_{t_1}^{t_2} t \cdot \lambda_i(t) dt. \quad (1)$$

На основании вышесказанного и учитывая структурную схему на рис. 2, а также то, что $p_{01}+p_{02}=1$, $p_{13}+p_{14}=1$, $p_{35}+p_{31}=1$, можно получить граф состояний марковского случайного процесса, который изображен на рис. 3. Вероятность p_0 в данной модели мы учитывать не будем, ее учет может быть произведен на окончательной стадии при получении итоговых результатов.

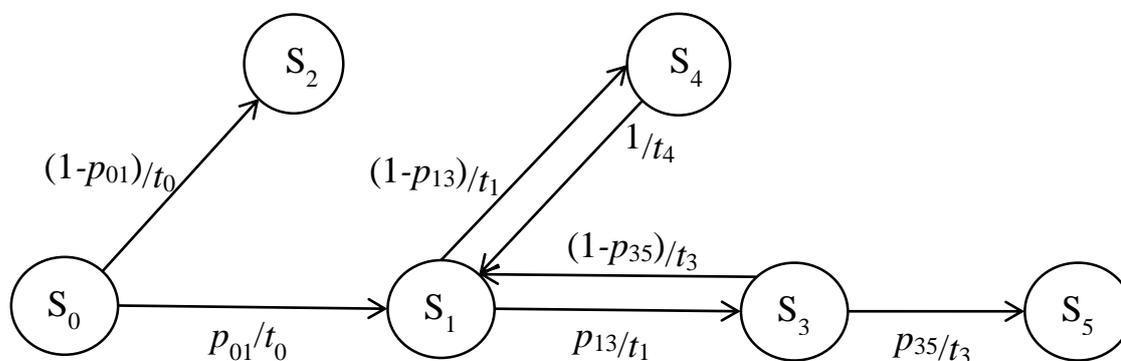


Рис. 3 Граф состояний случайного процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса

Для нахождения вероятностных характеристик случайного процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БПЛА МК и динамического анализа результатов проведения операции, необходимо вычислить временные зависимости вероятностей каждого состояния: $P_i(t), i = \overline{0, 5}$, которые имеют смысл вероятности того, что в момент времени t случайный процесс будет находиться в состоянии S_i . Для этого, в соответствии с графом состояний из рис. 3, а также учитывая то, что в начальный момент времени система находилась в состоянии S_0 , составляем систему дифференциальных уравнений Колмогорова [31] с начальными условиями вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\frac{P_0(t)}{t_0}; \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{p_{01}}{t_0} P_0(t) + \frac{1-p_{35}}{t_3} P_5(t) + \frac{P_4(t)}{t_4} - \frac{P_1(t)}{t_1}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{1-p_{01}}{t_0} P_0(t); \quad \frac{dP_3(t)}{dt} = \frac{p_{13}}{t_1} P_1(t) - \frac{P_3(t)}{t_3}; \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \frac{1-p_{13}}{t_1} P_1(t) - \frac{P_4(t)}{t_4}; \quad \sum_{i=0}^5 P_i(t) = 1, \\ P_0(0) = 1; P_i(0) = 0; i = \overline{1, 5}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Выражения (2) представляют собой систему линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [34], которую можно

решать методом собственных значений и собственных векторов [35], либо численными методами.

Проанализируем полученные решения. Наибольший интерес представляют временные зависимости конечных состояний S_2 и S_5 , вероятностные характеристики которых $P_2(t)$ и $P_5(t)$, соответственно имеют смысл вероятности неуспешного и успешного выполнения боевой задачи в момент времени t . На рис. 4 изображены графики этих зависимостей в интервале времени от 0 до 300 секунд, вертикальная пунктирная линия указывает максимально допустимое время на операцию – 180 секунд.

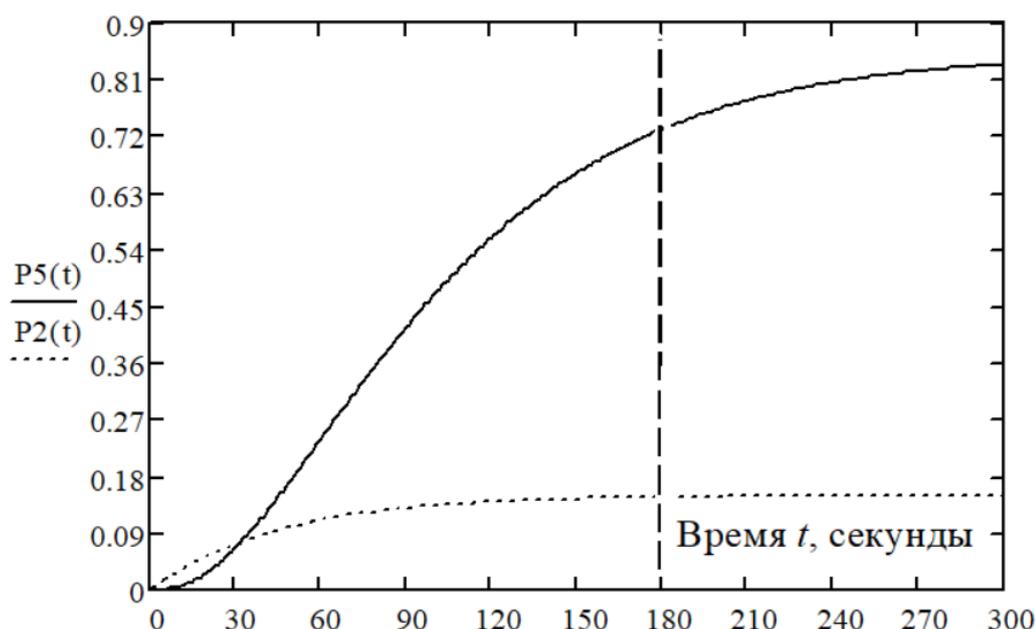


Рис. 4 Временные зависимости вероятностей успешного выполнения задачи и ее срыва

Из рис. 4 видно, что в момент времени $t=180$ с. вероятность успешного завершения операции составит 0,73, а вероятность срыва операции асимптотически приблизилась к вероятности p_{02} .

Также приведем временные зависимости промежуточных состояний S_1 , S_3 , и S_4 , вероятностные характеристики которых в зависимости от времени приведены на рис. 5.

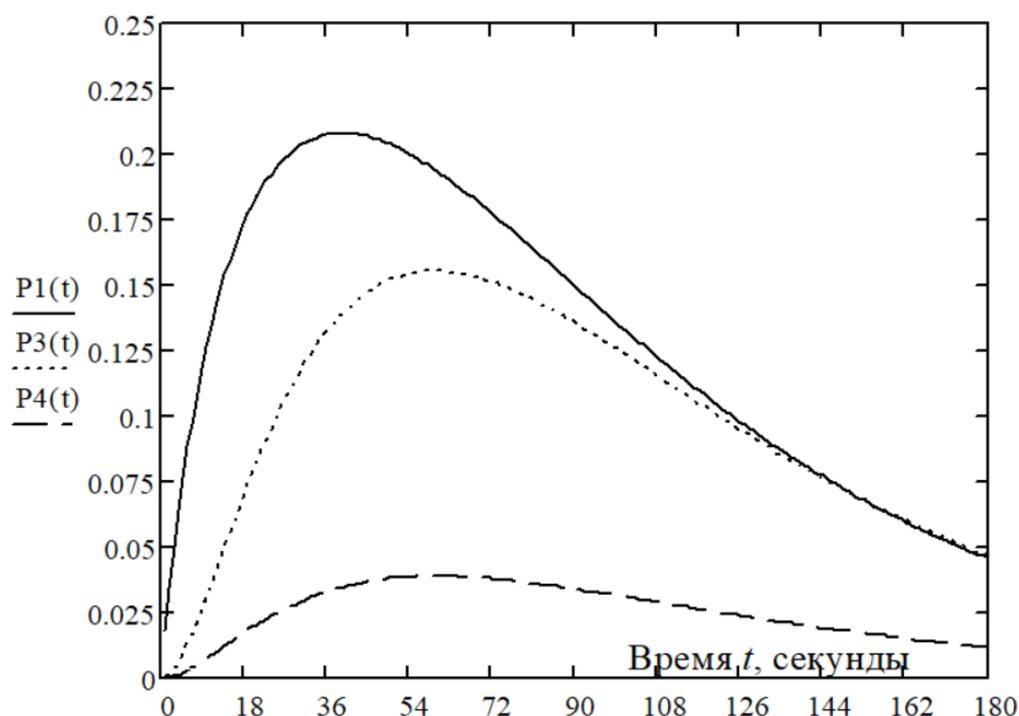


Рис. 5 Временные зависимости вероятностей нахождения системы в промежуточных состояниях

Видно, что вероятности промежуточных состояний имеют максимумы, которые соответствуют наиболее вероятному времени нахождения системы в этих состояниях.

Авторами был рассмотрен вопрос о том, как влияют параметры состояний случайного процесса на вероятности этих состояний. Временные параметры состояний t_i , $i = 0, 1, 3, 4$, определены пространственно-временной схемой ведения боевой операции, изображенной на рис. 1, и ими невозможно варьировать в широком диапазоне, поэтому основное внимание было уделено влиянию вероятностных параметров состояний случайного процесса.

В результате организации вычислительных экспериментов, моделирующих влияние вероятностных параметров p_{01} , p_{13} , и p_{35} на вероятность выполнения задачи $P_5(t)$ в разные моменты времени, было доказано, что сильнее всего на вероятность выполнения боевой задачи влияет параметр p_{01} , влияние параметров p_{13} , и p_{35} в несколько раз меньше. Таким образом, при планировании действий, в первую очередь необходимо проводить мероприятия, направленные на увеличение данной вероятности.

Выводы

На основе марковских случайных процессов разработана динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных БпЛА МК, учитывающая маневрирование для компенсации несовершенства БРЭО БпЛА МК, а также циклы полетов ударных БпЛА МК с выходом в точку сброса боеприпасов с допустимым отклонением по направлению, носящий вероятностных характер. Данная модель позволяет обосновать применение ударных БпЛА МК для высокоточного поражения тактических истребителей с требуемой вероятностью за время не превышающее необходимого для их вывода из-под удара.

С использованием разработанной модели получен частный научный результат: вероятность успешного поражения тактического истребителя не менее 0,7 за условное время выполнения процедур запуска двигателей и начала выруливания – 180 с, при этом наибольшее влияние на успешное решение боевой задачи оказывает вероятность своевременного формирования автоматизированного целеуказания расчетами группы ударных БПЛА МК, учитывающее параметры ветровых возмущений.

Детальное рассмотрение этапов выполнения полета БПЛА МК с использованием разработанной модели также позволяет обосновать требования к летным характеристикам планера, качеству функционирования бортовых систем и в целом эффективно управлять процессом поражения временно неподвижных целей с использованием групп ударных БПЛА МК.

Библиографический список

1. Ананьев А.В., Филатов С.В., Рыбалко А.Г. Статистическая оценка ударных возможностей беспилотных летательных аппаратов малой дальности при решении задач пилотируемой авиации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 455 - 460.
2. Карпенко А.В. Беспилотный летательный аппарат «Феникс» // Военно-технический сборник «Бастион» (журнал оборонно-промышленного комплекса). 2019. № 11. URL: <http://bastion-karpenko.ru/phoenix-bla>
3. Ананьев А.В., Филатов С.В., Петренко С.П., Рыбалко А.Г. Экспериментальная апробация применения свободнопадающих неуправляемых контейнеров с

использованием беспилотных летательных аппаратов ближнего действия // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 166 -173.

4. Зубов В.Н. Современные террористические и асимметричные угрозы // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 5-6 (119-120). С. 47 – 57.

5. Ананьев А.В., Филатов С.В., Рыбалко А.Г. Совместное применение пилотируемой авиации и разведывательно-ударных беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Военная мысль. 2019. № 4. С. 26 – 31.

6. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Рязанцев Л.Б., Клевцов Р.П. Применение разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса по объектам аэродромных участков дорог // Военная мысль. 2020. № 1. С. 85 – 97.

7. Атаковавшие базу в Хмеймим беспилотники, технический разбор. URL: <https://ilipin.livejournal.com/162716.html>.

8. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Гончаренко В.И., Клевцов Р.П. Оперативная оценка ошибок попадания в цель свободнопадающих неуправляемых контейнеров беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=107869>

9. Рыбалко А.Г., Ананьев А.В., Лазорак А.В., Клевцов Р.П. Программное обеспечение определения потребных нарядов ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса для поражения наземных целей // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2019. № 3 (30). С. 83 – 98.

10. Рыбалко А.Г., Ананьев А.В., Клевцов Р.П., Карбышева К.М. Специальное

программное обеспечение «Система поддержки принятия решения ударных беспилотных летательных аппаратов «Пересвет». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619663, 22.07.2019.

11. Рыбалко А.Г., Ананьев А.В., Клевцов Р.П. Способ определения координат точки падения макета боеприпаса лазерным измерительным устройством. Патент 2708705 РФ, МПК F41J 5/00. Бюл. № 35, 11.12.19.

12. Халимов Н.Р., Мефедов А.В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1 - 13. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10301](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10301).

13. 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. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102223>

14. Меркулов В.И., Миляков Д.А., Самодов И.О. Оптимизация алгоритма группового управления беспилотными летательными аппаратами в составе локальной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 157 - 166.

15. Лебедев Г.Н., Мирзоян Л.А., Ефимов А.В. Выбор многоальтернативных маршрутов полета беспилотного летательного аппарата при наблюдении трассы и наземных точечных объектов на этапе планирования полета // Труды МАИ. 2011. №

48. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26972>

16. Балык В.М., Зенков Д.Н. Статистические оценки полноты летных испытаний летательных аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28043>

17. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Распределенная интеллектуальная система управления группой беспилотных летательных аппаратов: архитектура и программно-математическое обеспечение // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 29 – 44.

18. Лебедев Г.Н., Румакина А.В. Система логического управления обхода препятствий беспилотным летательным аппаратом при маршрутном полете // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=61905>

19. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35503>

20. Дмитриев В.И., Звонарев В.В., Лисицын Ю.Е. Методика обоснования рациональных способов управления беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116566>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16)

21. Медынский М.М. Аналитическое моделирование боевых действий и оценка эффективности боевого вертолетного комплекса в объеме боевого вылета // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35501>

22. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными

аппаратами. В 2-х кн.: Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: монография. – М.: Радиотехника, 2016. Кн. 1. - 512 с.

23. Новак К.В., Горохова Е.А., Тофоров М.С. Оценка боевых возможностей беспилотных летательных аппаратов гражданского назначения, применяемых в террористических целях // Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации: сборник трудов II Военно-научной конференции. - М.: ГНИИЦРТ, 2017. С. 187 – 195.

24. Панов С.А., Халезов М.В., Шмаров А.Н. Модель живучести сложного объекта в условиях нанесения массированного авиационного удара // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 3. С. 423 – 434.

25. Донцов А.А., Калачев В.В., Козирацкий Ю.Л., Левшин Е.А. Способ радиоэлектронной защиты стационарного объекта от высокоточного оружия // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 259 – 268. URL: <http://академия-ввс.рф/images/docs/vks/13-2020/259-268.pdf>.

26. Краснов А.М. Управление поражением цели в комплексе авиационного вооружения со случайным изменением структуры // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=27946>

27. Пикалов С.А. Исследование дальномерного способа оперативного определения координат наземной цели на борту авиационных комплексов // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29148>

28. Козлитин С.Н., Козирацкий Ю.Л., Будников С.А. Моделирование совместного применения средств радиоэлектронной борьбы и огневого поражения в интересах повышения эффективности борьбы за превосходство в управлении // Системы

управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 49 - 73. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-00001](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-00001).

29. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г. Модель действий разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса самолетного типа при поражении тактических истребителей противовоздушной обороны на открытых стоянках аэродромных участков дорог // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 11. С. 58 – 68. URL: <http://академия-ввс.рф/images/docs/vks/11-2019/58-68.pdf>.
30. Ананьев А.В., Козирацкий Ю.Л. и др. Способ высокоточного поражения объектов. Патент 2334937 РФ, МПК F41G 7/30. Бюл. № 27. 27.09.08.
31. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 1998. – 354 с.
32. Матальцкий М.А. Элементы теории случайных процессов. - Гродно: ГрГУ, 2004. – 326 с.
33. Алексеев О.Г., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г. Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.
34. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: МЦНМО, 2012. – 344 с.
35. Агафонов С.А. Дифференциальные уравнения. - М.: МГТУ, 2011. – 347 с.

Dynamic model of temporarily fixed ground targets hitting process by a group of small-class attack unmanned aerial vehicles

Ananov A.V.^{1,2*}, Rybalko A.G.^{1}, Ivannikov K.S.^{3*}, Klevcov R.P.^{4***}**

¹ *MESC Air Force “Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin”, 54a, Starykh bol'shevikov, Voronezh, 394064, Russia*

² *PC SPE “Polet”, 1, Komsomolskaya sq., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

³ *Joint-stock company “Scientific and production enterprise “Radar-mms”, 37, Novosel'kovskaya str., lit. A, Sankt-Peterburg, 197375, Russia*

⁴ *MESC Air Force “Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin” (branch in the city of Chelybinsk), 40, Gorodok-11, Chelybinsk, 454015, Russia*

**e-mail: sasha303_75@mail.ru*

***e-mail: rybalkovvs@yandex.ru*

****e-mail: ronin0877@mail.ru*

Abstract

The article presents the dynamic model of the fixed ground targets hitting process by the by group of small-class attack unmanned aerial vehicles. Considering the said process is probabilistic both in states and in time, the dynamic model is based on the Markov's random processes theory with continuous time and discrete state, and on the theoretic basis of the simplest flows.

A scenario for groups of small-class unmanned aerial vehicles application for hitting temporarily fixed ground targets, revealing the order of actions at each stage of the process under study, was employed as initial data for determining states of the dynamic model.

New dynamic model differs from the known ones by inclusion of the additional blocks. The first one realizes probabilistic parameters computing of wind disturbances due

to the special maneuver, and the second computes the cycles of the unmanned aerial vehicles groups' flights from the U-turn point to the target to the ammunition discharge point with account for its hitting probability with acceptable direction deviation.

Studying the model allows determine conflicting variable parameters of small-class unmanned aerial vehicles' combat maneuvering and calculate their rational values. On the one hand, these parameters affect the discharge accuracy and, consequently, rational ammunition consumption. On the other hand, extra maneuvering may significantly increase the hitting time, which is utterly critical for the temporary fixed targets, which can be removed out of strike.

A statistical model was being studied initially in this work to solve the set problem on hitting temporary fixed targets in a specified time. Further, having solved numerically the system of linear inhomogeneous differential equations with constant coefficients, developed for the dynamic model, the authors obtained time dependencies for various states of the process under study.

The conclusion to the article presents the result of the impact estimation of the sought probabilistic parameters of a group of strike unmanned aerial vehicles combat maneuvering on the probability of the task accomplishment at various time instants. The most significant probabilistic parameter, which increasing requires extra operations while actions planning, was defined.

The most significant probabilistic parameter, which is to be additionally increased during the stage of operation planning, is detected.

Keywords: attack unmanned aerial vehicle, small class, Markov random process, Poisson flow, reaction time, ground targets hitting.

References

1. Anan'ev A.V., Filatov S.V., Rybalko A.G. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 12, pp. 455 - 460.
2. Karpenko A.V. *Voенно-tekhnicheskii sbornik "Bastion" (zhurnal oboronno-promyshlennogo kompleksa)*, 2019, no. 11. URL: <http://bastion-karpenko.ru/phoenix-bla>
3. Anan'ev A.V., Filatov S.V., Petrenko S.P., Rybalko A.G. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 166 – 173.
4. Zubov V.N. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*, 2018, no. 5-6 (119-120), pp. 47 – 57.
5. Anan'ev A.V., Filatov S.V., Rybalko A.G. *Voennaya mysl'*, 2019, no. 4, pp. 26 – 31.
6. Anan'ev A.V., Rybalko A.G., Ryazantsev L.B., Klevtsov R.P. *Voennaya mysl'*, 2020, no. 1, pp. 85 – 97.
7. *Atakovavshie bazu v Khmeimim bespilotniki, tekhnicheskii razbor*. URL: <https://ilipin.livejournal.com/162716.html>
8. Anan'ev A.V., Rybalko A.G., Goncharenko V.I., Klevtsov R.P. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107869>
9. Rybalko A.G., Anan'ev A.V., Lazorak A.V., Klevtsov R.P. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz-Antei"*, 2019, no. 3 (30), pp. 83 – 98.

10. Rybalko A.G., Anan'ev A.V., Klevtsov R.P., Karbysheva K.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2019619663*, 22.07.2019.
11. Rybalko A.G., Anan'ev A.V., Klevtsov R.P. *Patent 2708705 RF, MPK F41J 5/00*, 11.12.19.
12. Khalimov N.R., Mefedov A.V. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2019, no. 3, pp. 1 - 13. DOI: [10.24411/2410-9916-2019-10301](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10301)
13. Ivashova N.D., Mikhailin D.A., Chernyakova M.E., Shanygin S.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102223>
14. Merkulov V.I., Milyakov D.A., Samodov I.O. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2014, no. 12 (161), pp. 157 - 166.
15. Lebedev G.N., Mirzoyan L.A., Efimov A.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 48. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26972>
16. Balyk V.M., Zenkov D.N. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28043>
17. Evdokimenkov V.N., Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 1 (174), pp. 29 – 44.
18. Lebedev G.N., Rumakina A.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=61905>
19. Kim N.V., Krylov I.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35503>
20. Dmitriev V.I., Zvonarev V.V., Lisitsyn Yu.E. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116566>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16)

21. Medynskii M.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 61. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35501>
22. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. V 2-kh kn.: Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA* (Unmanned aerial systems. Principles of development and of application specifics of complexes with UAV), Moscow, Radiotekhnika, 2016, vol. 1, 512 p.
23. Novak K.V., Gorokhova E.A., Toforov M.S. *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiiskoi Federatsii: sbornik trudov II Voенno-nauchnoi konferentsii*, Moscow, GNIITsRT, 2017, pp. 187 – 195.
24. Panov S.A., Khalezov M.V., Shmarov A.N. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 423 – 434.
25. Dontsov A.A., Kalachev V.V., Koziratskii Yu.L., Levshin E.A. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2020, no. 13, pp. 259 – 268. URL: <http://akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/13-2020/259-268.pdf>.
26. Krasnov A.M. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=27946>
27. Pikalov S.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29148>
28. Kozlitin S.N., Koziratskii Yu.L., Budnikov S.A. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 1, pp. 49 - 73. DOI: [10.24411/2410-9916-2020-00001](https://doi.org/10.24411/2410-9916-2020-00001).
29. Anan'ev A.V., Rybalko A.G. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2019, no. 11, pp. 58 – 68. URL: <http://akademiya-vvs.rf/images/docs/vks/11-2019/58-68.pdf>.

30. Anan'ev A.V., Koziratskii Yu.L. et al. *Patent 2334937 RF, MPK F41G 7/30*, 27.09.08.
31. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* (Random process theory and its engineering applications), Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 354 p.
32. Matalytskii M.A. *Elementy teorii sluchainykh protsessov* (Elements of Random Process Theory), Grodno, GrGU, 2004, 326 p.
33. Alekseev O.G., Anisimov V.G., Anisimov E.G. *Markovskie modeli boya* (Markov combat models), Moscow, Voenizdat, 1985, 85 p.
34. Arnol'd V.I. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniya* (Ordinary differential equations), Moscow, MTsNMO, 2012, 344. p.
35. Agafonov S.A. *Differentsial'nye uravneniya* (Differential equations), Moscow, MGTU, 2011, vol. VIII, 347 p.