

Научная статья

УДК 331.361; DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-42-55

**МОДЕЛЬ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОБУЧЕННОСТИ
РАСЧЁТОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ
АППАРАТАМИ В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ПРОТИВНИКА**

✉Привалов Андрей Андреевич;

Егоренков Сергей Александрович;

Антошкин Дмитрий Васильевич.

Военная ордена Жукова академия войск национальной гвардии

Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

✉apivalov@inbox.ru

Аннотация. Разработана модель для интегральной оценки обученности расчётов управления беспилотными летательными аппаратами в условиях противодействия противника посредством анализа процесса доставки грузов беспилотными летательными аппаратами в труднодоступные районы, позволяющая производить оценку эффективности применения беспилотных летательных аппаратов по значению вероятности успешной доставки груза за время не более заданного. Модель основана на применении метода топологического преобразования стохастических сетей. Процесс доставки груза представлен в виде стохастической сети с дальнейшим определением ее эквивалентной функции и применением разложения Хевисайда для определения функции распределения и математического ожидания времени доставки груза. Такое представление исследуемого процесса позволило учесть деструктивное воздействие на беспилотные летательные аппараты со стороны злоумышленника. В качестве исходных данных используются параметры, характеризующие свойства частных процессов, входящих в стохастическую сеть в виде ветвей и вычисляемые по методикам, опубликованным в материалах более ранних исследований. Показано, что полученная функция распределения времени выполнения полетного задания может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирована гамма-распределением. Предложенная модель может быть использована в образовательном процессе для обучения курсантов полетам на беспилотных летательных аппаратах по нормативам, приближенным к реальным.

Ключевые слова: эквивалентная функция, беспилотный летательный аппарат, противник, подсистема обнаружения и перехвата беспилотного летательного аппарата, полетное задание, боевая задача, математическая модель

Для цитирования: Привалов А.А., Егоренков С.А., Антошкин Д.В. Модель для интегральной оценки обученности расчётов управления беспилотными летательными аппаратами в условиях противодействия противника // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2025. № 1. С. 42–55. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-42-55.

Scientific article

A MODEL FOR THE INTEGRAL ASSESSMENT OF THE TRAINING OF UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL CALCULATIONS IN THE CONDITIONS OF ENEMY COUNTERACTION

✉ Privalov Andrey A.;

Egorenkov Sergey A.;

Antoshkin Dmitriy V.

Military order of Zhukov academy of the National guard troops of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

✉ aprivalov@inbox.ru

Abstract. A model has been developed for the integral assessment of the training of unmanned aerial vehicle control calculations in the face of enemy counteraction by analyzing the process of delivering unmanned aerial vehicle cargo to hard-to-reach areas, which makes it possible to evaluate the effectiveness of unmanned aerial vehicle use based on the probability of successful cargo delivery in a time not exceeding a given time. The model is based on the application of the method of topological transformation of stochastic networks. The cargo delivery process is presented as a stochastic network with further definition of its equivalent function and application of Heaviside decomposition to determine the distribution function and mathematical expectation of the cargo delivery time. This representation of the process under study made it possible to take into account the destructive effect on the unmanned aerial vehicle from the attacker. The initial data are parameters characterizing the properties of particular processes included in the stochastic network in the form of branches and calculated using methods published in the materials of earlier studies.

Keywords: equivalent function, unmanned aerial vehicle, enemy, subsystem of detection and interception of an unmanned aerial vehicle, flight mission, combat mission, mathematical model

For citation: Privalov A.A., Egorenkov S.A., Antoshkin D.V. A model for the integral assessment of the training of unmanned aerial vehicle control calculations in the conditions of enemy counteraction // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 1. P. 42–55. DOI: 10.61260/2218-13X-2025-1-42-55.

Введение

В настоящее время наблюдается бурное развитие и совершенствование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что объясняется их относительной дешевизной, технологичностью и многогранностью области решаемых с их помощью задач. К таким задачам можно отнести: проведение разведывательных мероприятий, мониторинг оперативной обстановки, контроль технического состояния и безопасности объектов, фото- и видеосъемка объектов и мест. В условиях специальной военной операции приобрела свою актуальность задача доставки различных грузов в различные опасные районы [1–3]. Для успешного выполнения подобных задач немаловажным является уровень подготовки расчётов управления БПЛА в условиях противодействия противника, что в большей мере необходимо выпускникам военных образовательных организаций высшего образования.

Основные положения

Рассматривая вопрос подготовки расчётов БПЛА следует учитывать, что необходимость обоснования целесообразности и принятия решений о доставке грузов с использованием БПЛА конкретному адресату (получателю), находящемуся в труднодоступной для других транспортных систем зоне [4–6], приводит к необходимости

обязательной оценки обстановки, одной из важнейших составляющих которой является вычисление времени и надежности доставки груза БПЛА. Стоит отметить, что на значение указанных показателей эффективности использования БПЛА, существенное влияние оказывают не только случайные факторы, характеризующие физико-географические и метеорологические условия, но и возможные случаи хищения доставляемых грузов противником. Поэтому задача подготовки расчетов управления БПЛА для повышения эффективности их применения в неблагоприятных природных и антагонистических условиях воздействия противника является актуальной, что обуславливает большое количество публикаций, посвященных указанным научно-прикладным задачам.

Основными трудами, посвященными вопросам исследования различных аспектов эффективности применения БПЛА, являются фундаментальные работы: член-корреспондента Российской академии наук, профессора М.В. Сильникова [6], профессоров Г.И. Горчица [5], В.С. Моисеева [7], С.И. Макаренко [8] и др. Методы расчета частных показателей эффективности опубликованы в работах [9–14]. Однако, несмотря на высокую научную и практическую значимость указанных работ, представленные в них результаты не позволяют вычислить важные для выполнения такого полётного задания, как доставка грузов, показатели, такие как среднее время полёта и вероятность успешного выполнения задачи расчётом БПЛА за заданное время. В свою очередь, в работе [15] выработаны рекомендации по расчету времени доставки грузов в предположении экспоненциального распределения случайной составляющей продолжительности доставки и отсутствии поиска удобного для получателя места в заданной зоне доставки груза. Кроме того, предложенный в работе [15] подход не учитывает возможности перехвата и/или уничтожения груза системой воздушного перехвата противника.

В настоящей статье в целях интегральной оценки обученности расчетов управления БПЛА на основе метода топологического преобразования стохастических сетей авторами был смоделирован процесс выполнения задачи БПЛА в условиях противодействия противника. Возможности системы воздушного перехвата противника характеризуются значением вероятностей обнаружения, идентификации и уничтожения БПЛА, определяемых с использованием результатов, приведенных в работах [11–14]. Метеорологическая и топогеодезическая обстановка в районе выполнения задач, а также траектория полета учитывается при определении значений характеристик соответствующих случайных величин с использованием методов, описанных в работах [13, 14]. Параметры, характеризующие навыки обучаемых и используемые тактические приемы применения БПЛА, соответствуют установленным нормативам и рекомендациям, приведенным в работах [6, 7].

Постановка задачи.

Пусть в рамках выполнения полётного задания обучаемому необходимо обнаружить получателя и доставить ему груз в заранее определенном труднодоступном районе, находящемся на удалении R км от стартовой позиции БПЛА (рис. 1).

Предположим, что подготовку к полету и запуск БПЛА обучаемые осуществляют за случайное время t_z с функцией распределения $Z(t)$, а скорость полета БПЛА составляет V км/час. С целью более полного использования возможностей БПЛА поиск получателя в зоне доставки груза ведется с использованием тактического приема «Поиск с несколькими проходами» [6], при этом время одного облета (прохода) t_n зоны расположения получателя является случайной величиной с функцией распределения $B(t)$, а вероятность успешного обнаружения получателя и получения им груза в месте доставки равна $P_{уц}$.

На протяжении всего времени выполнения задачи БПЛА может быть обнаружен противником с вероятностью P_o , идентифицирован за случайное время t_n с функцией распределения $I(t)$ и уничтожен (перехвачен) с вероятностью $P_{убп}$. Если БПЛА не был перехвачен или уничтожен, то система воздушного перехвата противника осуществляет его повторный поиск, а БПЛА выполняет маневр уклонения от средств обнаружения и перехвата в течение некоторого времени $t_{по}$ с функцией распределения $N(t)$.

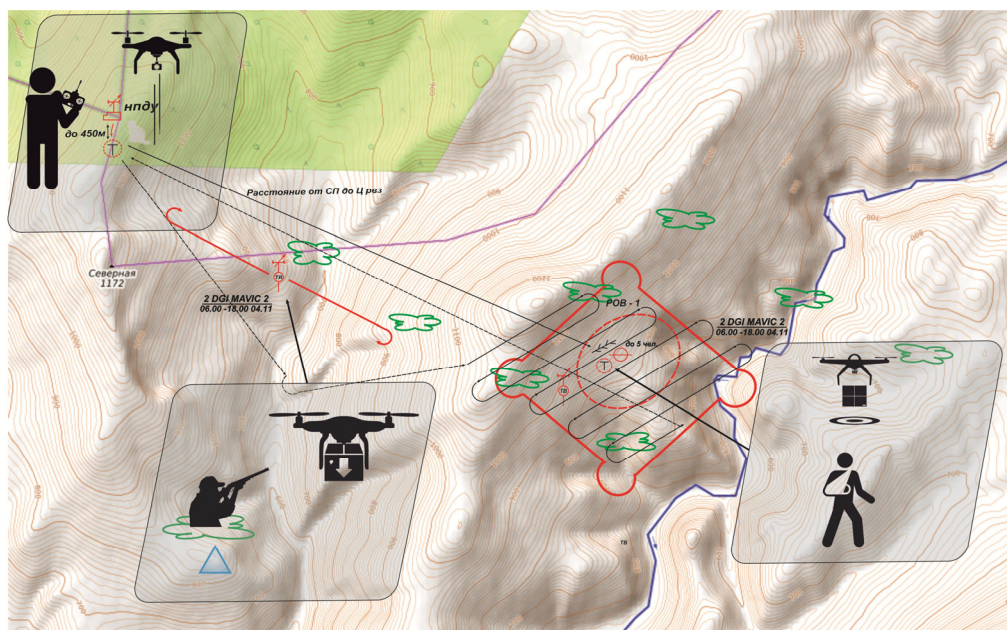


Рис. 1. Схема доставки грузов БПЛА в условиях противодействия противника (вариант)

Допущения и ограничения:

1. Подлежащий запуску БПЛА и вспомогательное оборудование исправны и не подвержены воздействию противника до выполнения полетного задания.
2. Район выполнения полетного задания назначается преподавателем в соответствии с тактико-техническими данными БПЛА [16] и рекомендациями [7].
3. Обучаемые прошли предварительное обучение и уверенно выполняют задачи управления БПЛА в соответствии с установленными учебными нормативами [6, 7].
4. Так как сведения, указанные в работах [6, 7], характеризуют только среднее время выполнения учебных задач расчетом управления БПЛА, допускается, что функции распределения указанных в постановке задачи случайных величин относятся к классу экспоненциальных.

5. Расчет вероятностей обнаружения и уничтожения (перехвата) БПЛА, а также обнаружения получателя производится по известным методикам [6, 7, 9, 10, 13].

Требуется определить математическое ожидание T и функцию распределения $F(t)$ времени успешной доставки груза получателю с использованием БПЛА.

Решение.

Представим процесс выполнения задачи по доставке груза расчетом управления БПЛА в виде стохастической сети (рис. 2).

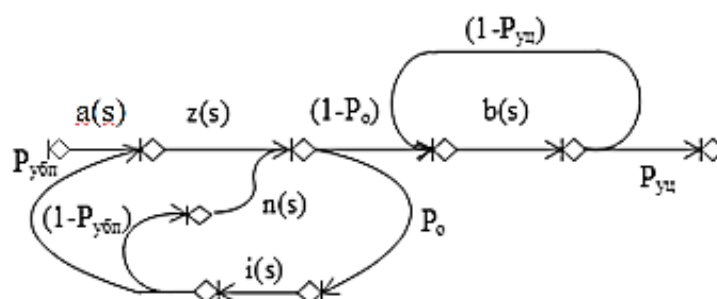


Рис. 2. Стохастическая сеть процесса выполнения полетного задания БПЛА
 $a(s)$, $z(s)$, $b(s)$, $i(s)$, $n(s)$ – преобразование Лапласа-Стилтьеса функций распределения вероятностей случайного времени подготовки и запуска БПЛА, одного прохода назначенного района выполнения задачи, идентификации БПЛА подсистемой обнаружения и перехвата противника, маневрирования БПЛА с целью уклонения от средств воздушного перехвата противника, соответственно)

В соответствии с допущением 4 указанные изображения имеют вид:

$$\begin{aligned} a(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d[A(t)] = \frac{a}{a+s}; \\ z(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d[Z(t)] = \frac{z}{z+s}; \\ b(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d[D(t)] = \frac{b}{b+s}; \\ i(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d[I(t)] = \frac{i}{i+s}; \\ n(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} d[N(t)] = \frac{n}{n+s}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a = 1/t_a$; $z = 1/(\bar{t}_3 + \frac{R}{V})$; $b = 1/\bar{t}_n$; $i = 1/\bar{t}_i$; $n = 1/\bar{t}_{п0}$; \bar{t}_a , \bar{t}_3 , \bar{t}_n , \bar{t}_i и $\bar{t}_{п0}$ – среднее время предполетной подготовки, сборки и запуска БПЛА, одного пролета БПЛА по установленному маршруту в районе выполнения задачи, идентификации и уклонения БПЛА от обнаружения системой противовоздушной обороны (ПВО) противника.

Эквивалентную функцию стохастической сети получим с использованием топологического уравнения Мейсона для замкнутых графов [17–19]:

$$1 + \sum_{k=1}^K (-1)^k L_k^{(i)}(s) = 0, \quad (2)$$

где $L_k^{(i)}(s)$ – i эквивалентная функции петли k -го порядка; K – максимальный порядок петель, входящих в стохастическую сеть.

С этой целью замкнем стохастическую сеть фиктивной $(i+1)$ -ветвью первого порядка $L_1^{(i+1)}(s) = 1/Q(s)$ ($Q(s)$ – искомая эквивалентная функция) и определим все петли порядка k :

– петли первого порядка, $k=1$:

$$\begin{aligned} L_1^{(1)} &= P_o P_{y6n} i(s) z(s); \\ L_1^{(2)} &= P_o i(s) n(s) (1 - P_{y6n}); \\ L_1^{(3)} &= b(s) (1 - P_{yц}); \end{aligned}$$

– петли второго порядка, $k=2$:

$$\begin{aligned} L_2^{(1)} &= P_o P_{y6n} i(s) z(s) P_o i(s) n(s) (1 - P_{y6n}); \\ L_2^{(2)} &= P_o i(s) n(s) (1 - P_{y6n}) b(s) (1 - P_{yц}); \\ L_2^{(3)} &= P_o P_{y6n} i(s) z(s) b(s) (1 - P_{yц}); \end{aligned}$$

– петель третьего и более высоких порядков нет.

Решая уравнение (2) относительно $Q(s)$, получим эквивалентную функцию стохастической сети (рис. 2):

$$Q(s) = \frac{a(s) z(s) (1 - P_o) b(s) P_{yц}}{1 - L_1^{(1)}(s) - L_1^{(2)}(s) - L_1^{(3)}(s) + L_2^{(1)}(s) + L_2^{(2)}(s) + L_2^{(3)}(s)}. \quad (3)$$

Введя обозначение $r = P_{\text{уц}}b$ и подставив частные изображения (1) в (3), получим:

$$Q(s) = \frac{\text{arz}(1-P_o)(i+s)(n+s)}{s^5 + s^4 A + s^3 B + s^2 C + sD + E}, \quad (4)$$

где $A = a + i + n + r + z$; $Ba(i + n + r + z) + i(r + n + z) + z(i + n + r) - P_o P_{\text{убп}} iz + P_o \in (1 - P_{\text{убп}})$; $C = ai(n + r + z) + z(a(n + r) + i(n + r + z)) + nr(i + a) - P_o \in (a + r + z) + P_o P_{\text{убп}} i(a(n - r) + r(n - z))$; $D = (1 - P_o)(a(r + z) + rz) + (1 - P_o P_{\text{убп}})\text{arz}(i + n)$; $E = ainrz(1 - P_o) -$ коэффициенты разложения знаменателя эквивалентной функции.

Представление эквивалентной функции в виде (4) упрощает определение оригинала $Q(s)$ за счет использования разложения Хевисайда [20], позволяющего при $s_i \neq s_j$ представить изображение (1) в виде суммы вычетов в полюсах s_i , с последующим определением оригинала по изображению (3), то есть:

$$f(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{\text{arz}(1-P_o)(i+s_i)(n+s_i)}{5s_i^4 + 4s_i^3 A + 3s_i^2 B + 2s_i C + D} \exp(s_i t),$$

где s_i – простые полюса эквивалентной функции $Q(s)$.

Полученное выражение является функцией плотности вероятностей, поэтому искомая функция распределения времени выполнения задачи БПЛА может быть определена как:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = \sum_{i=1}^5 \frac{\text{arz}(1-P_o)(i+s_i)(n+s_i)(1-\exp(ts_i))}{(5s_i^4 + 4s_i^3 A + 3s_i^2 B + 2s_i C + D)(-s_i)}. \quad (5)$$

В свою очередь, математическое ожидание времени выполнения задачи БПЛА равно:

$$T = \int_0^\infty t f(t) dt = \sum_{i=1}^5 \frac{\text{arz}(1-P_o)(i+s_i)(n+s_i)}{(5s_i^4 + 4s_i^3 A + 3s_i^2 B + 2s_i C + D)(-s_i)^2}. \quad (6)$$

По полученным соотношениям (5, 6) были произведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 3 в виде графиков.

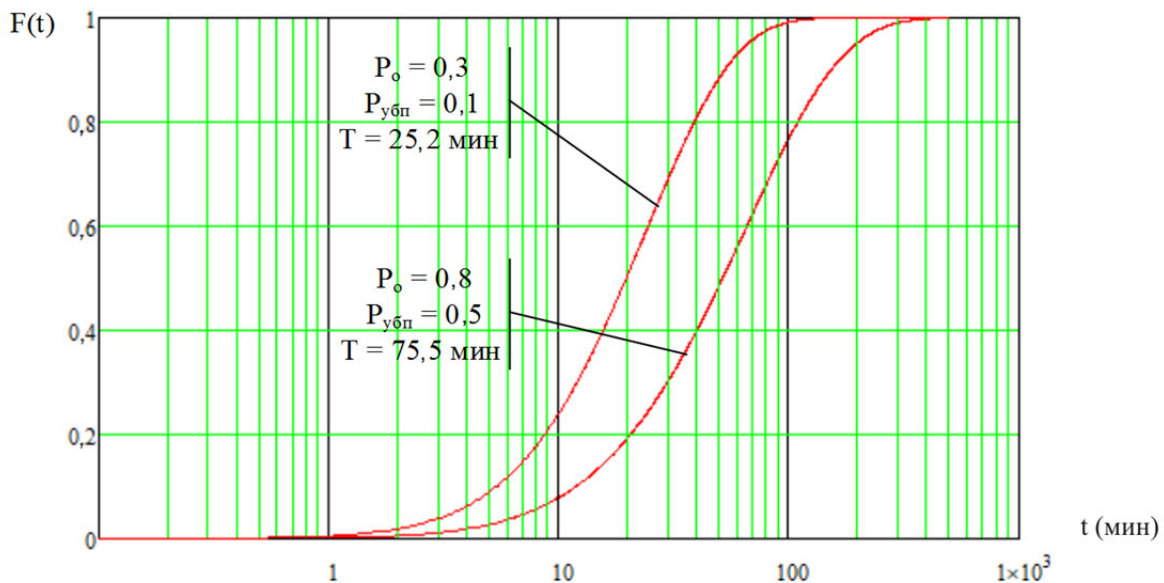


Рис. 3. Функции распределения времени выполнения задачи БПЛА с учетом противодействия системы воздушного перехвата противника

Расчеты производились в предположении, что для выполнения задачи использовался квадрокоптер семейства DJI MAVIC 2 PRO при следующих исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для расчётов

№ п/п	Обозначение и значение	Название величины	Единицы измерения
1	R=20	Расстояние от стартовой позиции до центра района выполнения задачи	км
2	V=70	Скорость полета БПЛА	км/ч
3	$\overline{t_a} = 0,01$	Среднее время предполетной подготовки и сборки БПЛА	мин
4	$\overline{t_3} = 1$	Среднее время запуска БПЛА (без учета времени сборки)	мин
5	$\overline{t_{\pi}} = 3$	Среднее время одного пролета по заданному маршруту в районе выполнения задачи	мин
6	$\overline{t_{\text{и}}} = 15$	Среднее время идентификации БПЛА подсистемой ПВО противника	с
7	$\overline{t_{\text{по}}} = 10$	Среднее время выполнения маневра уклонения БПЛА от системы ПВО противника	мин
8	$P_o = 0,3 \dots 0,5$	Вероятность обнаружения БПЛА подсистемой ПВО противника	
9	$P_{\text{убп}} = 0,1 \dots 0,3$	Вероятность уничтожения обнаруженного БПЛА противником	
10	$P_{\text{уц}} = 0,85$	Вероятность обнаружения и уничтожения цели БПЛА в районе выполнения задачи	
11	$T_{\text{max}} = 30$	Максимальная продолжительность полета	мин

Результаты.

1. Вероятность успешного выполнения полетного задания за время, меньшее 2/3 максимальной продолжительности полета, не может превышать:

$$\begin{aligned}
 P\left(t \leq \frac{2T_{\text{max}}}{3}\right) &\leq \lim_{\substack{P_o \rightarrow 0 \\ P_{\text{убп}} \rightarrow 0 \\ P_{\text{уц}} \rightarrow 1}} F\left(t = \frac{2T_{\text{max}}}{3}\right) = \\
 &= \frac{ar}{(r-z)(a-z)} \left(1 - e^{-\frac{z*2T_{\text{max}}}{3}}\right) - \frac{az}{(r-z)(a-r)} \left(1 - e^{-\frac{r*2T_{\text{max}}}{3}}\right) \\
 &+ \frac{rz}{(a-z)(a-r)} \left(1 - e^{-\frac{a*2T_{\text{max}}}{3}}\right)
 \end{aligned}$$

и определяется скоростью полета, удаленностью и размерами района выполнения задачи, а также степенью подготовленности обучаемых, осуществляющих различные этапы запуска и пилотирования БПЛА.

Графики предельно достижимых функций распределения $F(t)$ времени успешного выполнения боевой задачи при различной удаленности района выполнения задачи от стартовой позиции приведены на рис. 4.

Не сложно увидеть, что минимальное среднее время выполнения задачи численно равно $T_{\text{min}} = \overline{t_a} + \overline{t_3} + \overline{t_{\pi}} + \frac{R*60}{V}$, что согласуется с результатами, представленными в работе [15].

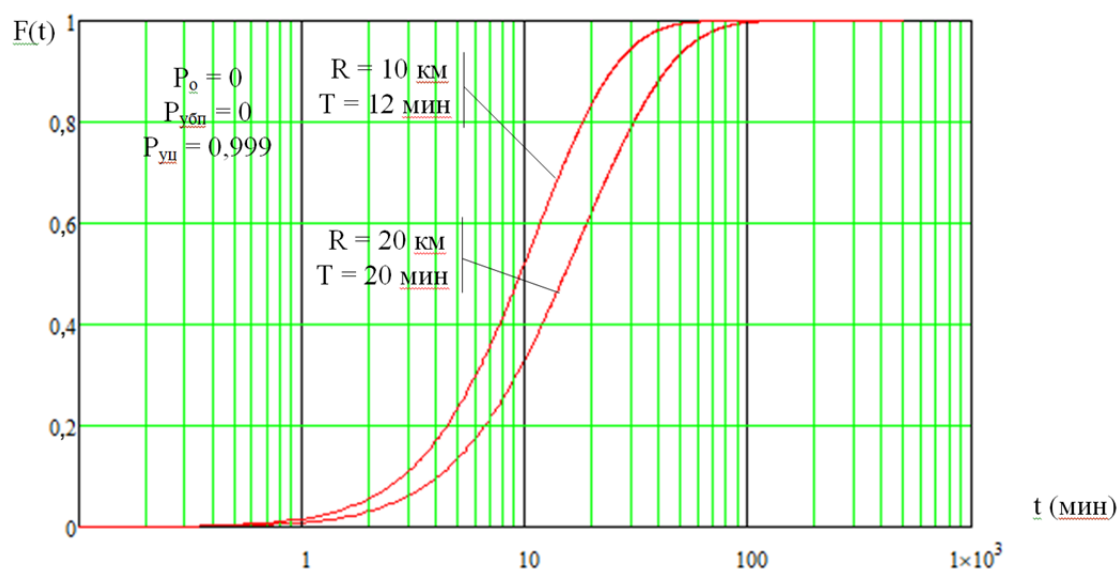


Рис. 4. Графики функций распределения времени выполнения задачи при отсутствии противодействия со стороны противника и гарантированном уничтожении цели и различной удаленности района выполнения задачи

2. Вероятность успешного выполнения задачи зависит не только от поисковых возможностей БПЛА, но и его разведзащищенности. При оснащении БПЛА средствами поиска, способными практически гарантированно обнаружить получателя и обеспечить получение им груза, время и вероятность выполнения задачи существенно зависят от вероятности обнаружения БПЛА средствами воздушного перехвата противника. При этом возможности подсистемы уничтожения у противника могут быть весьма скромными. Так, например, при вероятности обнаружения БПЛА $P_o=0,9$ и его уничтожении противника с вероятностью $P_{убп}=0,1$, вероятность успешного выполнения задачи за время, меньшее $2/3$ максимальной продолжительности полета, не превышает $P\left(t \leq \frac{2T_{max}}{3}\right) \leq 0,11$, а среднее время успешного выполнения задачи увеличивается до $T=119$ мин. Это показывает на необходимость разработки технологий защиты БПЛА от видовой и радиотехнической разведок противника (рис. 5).

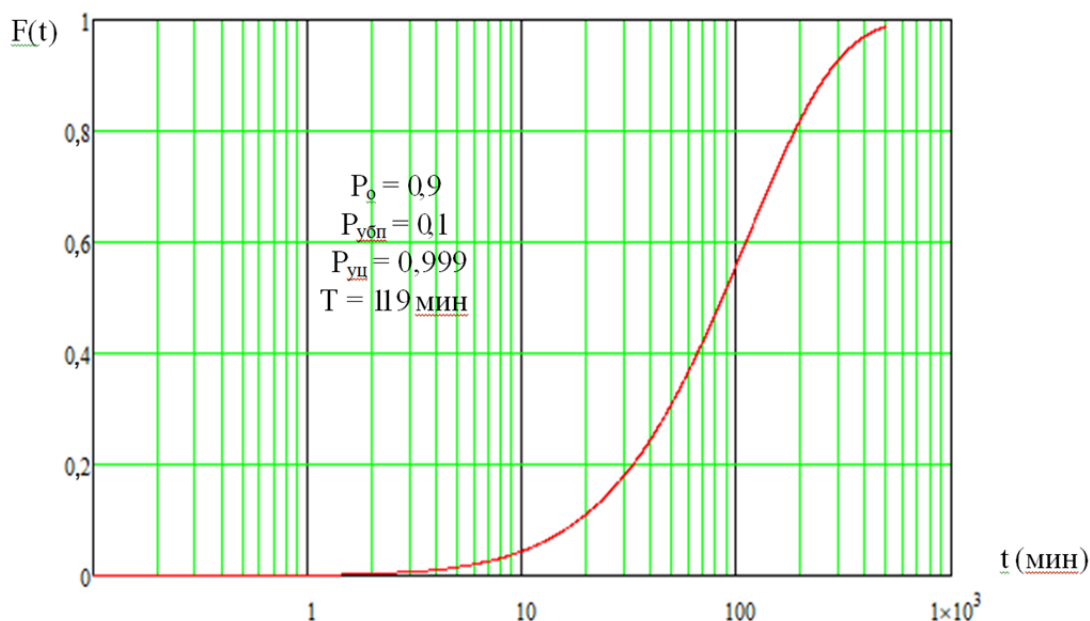


Рис. 5. График функции распределения времени выполнения задачи при развитой системе обнаружения и ограниченных возможностях подсистемы уничтожения БПЛА противником

3. Расчеты показывают, что среднее время выполнения задачи существенно зависит от уровня подготовки обучаемых, управляющих БПЛА (рис. 6).

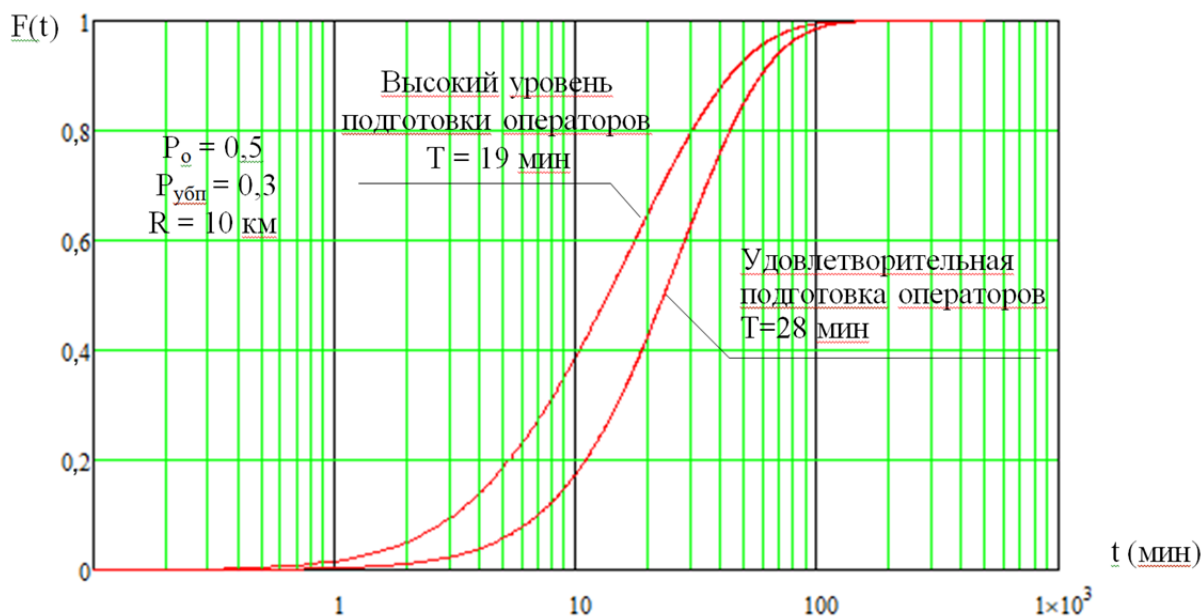


Рис. 6. Графики функций распределения времени выполнения задачи при различных уровнях подготовки обучаемых

В частности, при высоком уровне подготовки среднее время успешного выполнения задачи составляет $T=19$ мин, а при удовлетворительном уровне подготовки обучаемых оно увеличивается до $T=28$ мин. При этом вероятность успешного выполнения задачи за время, меньшее $2/3$ максимальной продолжительности полета, составит $P\left(t \leq \frac{2T_{max}}{3}\right) = 0,8$ и $P\left(t \leq \frac{2T_{max}}{3}\right) = 0,63$, соответственно. Таким образом, использование предложенного метода позволяет производить оценку действий обучаемых расчетов управления БПЛА не по отдельным нормативам, а по комплексному показателю – времени выполнения полетного задания в условиях противодействия противником. Тогда оценке «хорошо» будет соответствовать время, равное 23 мин 30 сек. и рассчитанное как среднее арифметическое.

Однако реализация данного подхода потребует некоторой коррекции учебных программ подготовки специалистов данного профиля.

4. С целью определения класса распределения времени успешного выполнения боевой задачи БПЛА были произведены расчеты первых четырех центральных моментов указанной случайной величины. Результаты многочисленных расчетов показали, что полученное распределение является унимодальным, не симметричным, правосторонним, с положительным эксцессом, то есть:

$$A_s = \frac{m_3}{\sigma^3} > 0; E = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3 > 0,$$

где m_3 ; m_4 ; – третий (четвертый) центральные моменты; σ – среднеквадратичное отклонение случайного времени выполнения задачи, относится к третьему классу распределения Пирсона. Это означает, что функция распределения времени успешного выполнения задачи БПЛА может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирована гамма-распределением (рис. 7).

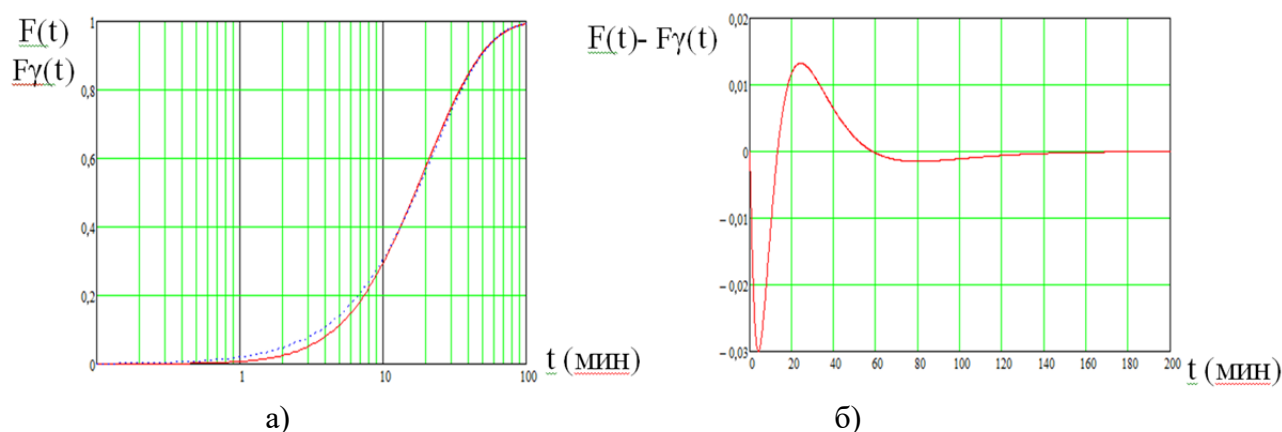


Рис. 7: а) графики функции распределения $F(t)$ (сплошная линия) и гамма-распределения $F\gamma(t)$ (пунктирная линия); б) абсолютная погрешность аппроксимации

Параметры масштаба μ и формы α гамма-распределения:

$$F\gamma(t) = \int_0^t \frac{\mu^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\mu x) dx$$

определялись с использованием эквивалентной функции (1):

$$M_1 = T = \frac{-d}{ds} \left[\frac{Q(s)}{Q(0)} \right]_{s=0}; \quad M_2 = \frac{d^2}{ds^2} \left[\frac{Q(s)}{Q(0)} \right]_{s=0}; \quad \mu = \frac{M_1}{M_2 - M_1^2}; \quad \alpha = \frac{M_1^2}{M_2 - M_1^2}.$$

Так как гамма-распределение является встроенной функцией большинства объектно-ориентированных пакетов прикладных программ для ЭВМ, то ее использование может несколько упростить задачу разработки специального математического и программного обеспечения подсистемы планирования и поддержки принятия решений автоматизированной системы управления БПЛА. Тем более, что абсолютная погрешность аппроксимации не превышает 3 %.

Таким образом, обобщая всё выше рассчитанное, качество подготовки расчётов БПЛА можно оценить выполнением предложенного в табл. 2 комплексного полётного задания исходя из норматива.

Таблица 2

Норматив «Выполнение полётного задания на БПЛА «Доставка груза»

Наименование норматива	Время на «отлично», мин	Время на «хорошо», мин	Время на «удовлетворительно», мин
Выполнение полётного задания на БПЛА «Доставка груза»	Не более 19 мин	23 мин 30 сек.	Не более 28 мин

Кроме того, расчёты в предложенной модели учитывают вероятность появления условного противника, который, в свою очередь, будет воздействовать на выполняющего полётное задание БПЛА. Таким образом, в качестве практики применения средств подавления БПЛА и интенсификации проведения занятия с расчётами БПЛА, учебную группу целесообразно делить на две подгруппы. Первая подгруппа выполняет норматив, вторая подгруппа осуществляет противодействие БПЛА (условный противник) с использованием различных средств подавления БПЛА без их физического уничтожения типа: Жезл-2, Аркан-2 и др.

В связи с тем, что предложенная стохастическая сеть учитывает время на подготовку БПЛА к запуску $a(s)$, то норматив «Выполнение полётного задания на БПЛА «Доставка груза» предлагается дополнять нормативом на сборку и подготовку БПЛА к запуску, таким как, например, изложенный в работе [21]. Если такой норматив применяется, и это требует существенных усилий обучаемых, учитывая особенности конкретного БПЛА, то в таком случае предлагается делить учебную группу уже на три подгруппы.

Занятие возможно организовать по циклическому принципу по учебным местам, что обеспечит наиболее полное задействование обучаемых. В целях повышения интереса обучаемых в занятие могут быть включены элементы командной игры. В таком случае в итоговом результате можно учитывать не только среднее время выполнения полётного задания, но и, например, количество выполненных полётных заданий и количество перехваченных БПЛА разными командами.

Необходимо отметить, что предложенный научно обоснованный норматив для расчётов БПЛА учитывает технические характеристики конкретного типа БПЛА. Для БПЛА же с иными техническими характеристиками модель необходимо пересчитать.

Заключение

Представленная модель для интегральной оценки обученности расчётов управления БПЛА в условиях противодействия противника по доставке груза в труднодоступный район основана на представлении исследуемого процесса доставки в виде стохастической сети, включающей ветви, характеризующие основные этапы выполнения полётного задания БПЛА. Отличительной особенностью модели является учет противодействия со стороны системы обнаружения и перехвата (уничтожения) БПЛА противника. Математическая модель позволяет учитывать не только технические характеристики БПЛА, но и способы выполнения полётных заданий, что показывает на целесообразность заблаговременной разработки частных моделей (вариантов) тактических заданий применения БПЛА. Кроме того, чувствительность модели к свойствам системы воздушного перехвата противника позволяет производить оценку эффективности реализуемых мер защиты БПЛА от подсистем разведки поражения противника.

Как показал анализ результатов моделирования, предложенная модель работоспособна, проявляет чувствительность к изменению исходных данных, также позволяет получать не противоречащие логике результаты, хорошо согласующиеся с практикой применения БПЛА.

В связи с тем, что в модели предлагается комплексное полётное задание, применять её следует не в качестве обучения пилотированию БПЛА, а в качестве практического задания в рамках итогового (экзаменационного) контроля по соответствующей дисциплине.

Таким образом, полученные результаты могут лечь в основу нормативов по итоговому (экзаменационному) контролю подготовки расчётов управления БПЛА и, учитывая актуальность темы и необходимость подготовки курсантов военных образовательных организации высшего образования по данному направлению, могут быть рекомендованы для внедрения в образовательный процесс.

Список источников

1. AL-Dosari K., Hunaiti Z., Balachandran W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications // Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2023. Vol. 7. № 3. DOI: 10.3390/drones7030210.
2. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Almalki F.A. Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 128125–128152. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
3. Chen H., Hu Z., Solak S. Improved delivery policies for future drone-based delivery systems // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294. № 3. P. 1181–1201. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.

4. Буренок В.М. Формирование новых взглядов на применение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа опыта специальной военной операции // Вооружение и экономика. 2024. № 1 (67). С. 5–8.
5. Горчица Г.И. Роль и место роботизированных авиационных систем в современной войне. Прогноз развития беспилотной авиационной военно-транспортной системы // Вооружение и экономика. 2022. № 2 (60). С. 23–41.
6. Научно-методическое обоснование способов применения беспилотных летательных аппаратов для разведки и поражения целей: монография / М.В. Сильников [и др.]. СПб.: НПО Спецматериалов, 2022. 412 с.
7. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Ред.-изд. центр «Школа», 2015. 444 с.
8. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.
9. Рюмин А.В. Оценка вероятности поражения микро-БЛА стрелковым оружием с помощью имитационной модели // Прикладные проблемы безопасности технических и биотехнических систем. 2019. № 1. С. 24–31.
10. Гусева А.С. Дурнев Р.А. Оценка живучести и эффективности беспилотных летательных аппаратов: некоторые возможности методического подхода // Вооружение и экономика. 2021. № 2 (56). С. 22–31.
11. Оценка эффективности систем противодействия массированному применению мини БПЛА: методические основы / А.С. Гусева [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 57–61.
12. Имитационная модель оценки эффективности огневого противодействия беспилотным летательным аппаратам / Н.В. Быков [и др.] // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2021: материалы Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конф. СПб., 2021. С. 135–142.
13. Федулов В.А., Быков Н.В., Баскаков В.Д. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 63–104.
14. Рябуха В.П. Радиолокационное наблюдение беспилотных летательных аппаратов (обзор) // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2020. Т. 63. № 11. С. 655–669.
15. Рекомендации по выполнению оценки продолжительности доставки грузов в район ЧС с использованием БАС / Е.С. Михайлов [и др.] // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2024. № 3 (21). С. 15–20. DOI: 10.37657/vniipro.avrb.2024.83.26.002.
16. Типы и характеристики беспилотных летательных аппаратов: обзор / А.В. Вавилонский [и др.] // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIX Междунар. науч.-практ. конф. Томск, 2023. С. 60–62.
17. Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы: пер. с англ. / под ред. П.А. Ионкина. М.: Иностранная литература, 1963.
18. Pristker A.A.B., Harp W.W. GERT: Graphical Evalution and Review Tecnique // The Journal jf Indaistrial Engineering. 1966. May. Part 1.
19. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для моделирования систем связи ВМФ / под ред. проф. В.П. Чемиренко. М.: ВМА, 2000. 66 с.
20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: «Наука», 1977.
21. Курс артиллерии для оператора комплекса воздушной разведки с беспилотным летательным аппаратом / М.В. Сильников [и др.]. СПб.: Первый ИПХ, 2022. 364 с.

References

1. AL-Dosari K., Hunaiti Z., Balachandran W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications // Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2023. Vol. 7. № 3. DOI: 10.3390/drones7030210.
2. Alsamhi S.H., Ma O., Ansari M.S., Almalki F.A. Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 128125–128152. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2934998.
3. Chen H., Hu Z., Solak S. Improved delivery policies for future drone-based delivery systems // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 294. № 3. P. 1181–1201. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.02.039.
4. Burenok V.M. Formirovanie novykh vzglyadov na primenenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove analiza opyta special'noj voennoj operacii // Vooruzhenie i ekonomika. 2024. № 1 (67). S. 5–8.
5. Gorchica G.I. Rol' i mesto robotizirovannykh aviacionnykh sistem v sovremennoj vojne. Prognoz razvitiya bespilotnoj aviacionnoj voenno-transportnoj sistemy // Vooruzhenie i ekonomika. 2022. № 2 (60). S. 23–41.
6. Nauchno-metodicheskoe obosnovanie sposobov primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya razvedki i porazheniya celej: monografiya / M.V. Sil'nikov [i dr.]. SPb.: NPO Specmaterialov, 2022. 412 s.
7. Moiseev V.S. Osnovy teorii effektivnogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov: monografiya. Kazan': Red.-izd. centr «Shkola», 2015. 444 s.
8. Makarenko S.I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nym apparatam: monografiya. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2020. 204 s.
9. Ryumin A.V. Ocenka veroyatnosti porazheniya mikro-BLA strelkovym oruzhiem s pomoshch'yu imitacionnoj modeli // Prikladnye problemy bezopasnosti tekhnicheskikh i biotekhnicheskikh sistem. 2019. № 1. S. 24–31.
10. Guseva A.S., Durnev R.A. Ocenka zhivuchesti i effektivnosti bespilotnykh letatel'nykh apparatov: nekotorye vozmozhnosti metodicheskogo podhoda // Vooruzhenie i ekonomika. 2021. № 2 (56). S. 22–31.
11. Ocenka effektivnosti sistem protivodejstviya massirovannomu primeneniyu mini BPLA: metodicheskie osnovy / A.S. Guseva [i dr.] // Izvestiya Rossijskoj akademii raketnykh i artillerijskikh nauk. 2021. № 1 (116). S. 57–61.
12. Imitacionnaya model' ocenki effektivnosti ogneвого protivodejstviya bespilotnym letatel'nym apparatam / N.V. Bykov [i dr.] // Imitacionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika. IMMOD-2021: materialy Vseros. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. SPb., 2021. S. 135–142.
13. Fedulov V.A., Bykov N.V., Baskakov V.D. Ocenka effektivnosti sistemy porazheniya malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov metodom imitacionnogo modelirovaniya // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2023. № 4. S. 63–104.
14. Ryabuha V.P. Radiolokacionnoe nablyudenie bespilotnykh letatel'nykh apparatov (obzor) // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Radioelektronika. 2020. T. 63. № 11. S. 655–669.
15. Rekomendacii po vypolneniyu ocenki prodolzhitel'nosti dostavki gruzov v rajon CHS s ispol'zovaniem BAS / E.S. Mihajlov [i dr.] // Aktual'nye voprosy pozharnej bezopasnosti. 2024. № 3 (21). S. 15–20. DOI: org/10.37657/vniipo.avpb.2024.83.26.002.
16. Tipy i harakteristiki bespilotnykh letatel'nykh apparatov: obzor / A.V. Vavilonskij [i dr.] // Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Tomsk, 2023. S. 60–62.
17. Mezon S., Cimmerman G. Elektronnye cepi, signaly i sistemy: per. s angl. / pod red. P.A. Ionkina. M.: Inostrannaya literatura, 1963.
18. Pristker A.A.B., Harp W.W. GERT: Graphical Evalution and Review Tecnique // The Journal of Industrial Engineering. 1966. May. Part 1.

19. Privalov A.A. Metod topologicheskogo preobrazovaniya stohasticheskikh setej i ego ispol'zovanie dlya modelirovaniya sistem svyazi VMF / pod red. prof. V.P. Chemirenko. M.: VMA, 2000. 66 s.

20. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. M.: «Nauka», 1977.

21. Kurs artillerii dlya operatora kompleksa vozdushnoj razvedki s bespilotnym letatel'nyim apparatom / M.V. Sil'nikov [i dr.]. SPb.: Pervyj IPH, 2022. 364 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 23.12.2024; одобрена после рецензирования: 28.01.2025; принята к публикации: 29.01.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 23.12.2024; approved after review: 28.01.2025; accepted for publication: 29.01.2025

Сведения об авторах:

Привалов Андрей Андреевич, профессор кафедры боевого применения артиллерийских подразделений Военной ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилутова, д. 1), доктор военных наук, профессор, e-mail: aprivalov@inbox.ru, SPIN-код: 1775-3282

Егоренков Сергей Александрович, преподаватель кафедры боевого применения артиллерийских подразделений Военной ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилутова, д. 1), e-mail: egorenkoff83@mail.ru, SPIN-код: 3484-0793

Антошкин Дмитрий Васильевич, адъюнкт научно-исследовательского центра Военной ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации (198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилутова, д. 1), e-mail: dv.antoshkin@yandex.ru, SPIN-код: 1043-4027

Information about the authors:

Privalov Andrey A., professor of the department of combat use of artillery units of the Military order of Zhukov academy of the national guard troops of the Russian Federation (198206, Saint-Petersburg, Lotchika Pilyutova str., 1), doctor of sciences (military), professor, e-mail: aprivalov@inbox.ru, SPIN: 1775-3282

Egorenkov Sergey A., lecturer at the department of combat use of artillery units of the Military order of Zhukov academy of the national guard troops of the Russian Federation (198206, Saint-Petersburg, Lotchika Pilyutova str., 1), e-mail: egorenkoff83@mail.ru, SPIN: 3484-0793

Antoshkin Dmitriy V., postgraduate student of the research center of the Military order of Zhukov academy of the national guard troops of the Russian Federation (198206, Saint-Petersburg, Lotchika Pilyutova str., 1), e-mail: dv.antoshkin@yandex.ru, SPIN: 1043-4027