

УДК: 623.094

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ  
МАССИРОВАННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МИНИ-БПЛА:  
МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

**ASSESSMENT OF EFFECTIVENESS OF COUNTERMEASURES SYSTEMS  
MASS USE OF MINI-UAVS: METHODOLOGICAL BASES**

*А.С. Гусева, чл.-корр. РАРАН Р.А. Дурнев, А.С. Кудряшов, Е.В. Свиридок*

*РАРАН*

*A.S. Guseva, R.A. Durnev, A.S. Kudryashov, E.V. Sviridok*

В статье предложены методические основы, позволяющие проводить предварительную оценку по критерию «эффективность – стоимость» традиционных и нетрадиционных систем противодействия массированному налету мини-БПЛА. При этом учитывается живучесть к воздействию поражающих факторов отдельных элементов, подсистем и образцов мини-БПЛА, а также способы и условия их применения. Результаты данной оценки могут уточняться с использованием других методов и моделей, а также по результатам лабораторных и натурных экспериментов, боевого применения систем противодействия массированным налетам мини-БПЛА.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, массированный налет, поражающие факторы, живучесть, эффективность, ожидаемая стоимость противодействия.

The article proposes methodological bases that allow preliminary assessment of traditional and non-traditional systems for counteracting a massive raid of mini-UAVs according to the «efficiency – cost» criterion. This takes into account the survivability to the effects of damaging factors of individual elements, subsystems and samples of mini-UAVs, as well as the methods and conditions of their use. The results of this assessment can be refined using other methods and models, as well as based on the results of laboratory and full-scale experiments, combat use of systems to counter massive raids of mini-UAVs.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, massive raid, damaging factors, survivability, efficiency, expected cost of counteraction.

В статье представлен подход, позволяющий оценивать эффективность применения (поражения, функционального подавления) мини-БПЛА типа «квадрокоптер» через учет технических характеристик и тактических особенностей его использования [1]. Для этого определяется взаимосвязь характера воздействия различных поражающих факторов (ПФ) как с живучестью отдельных элементов мини-БПЛА, так и с живучестью отдельных подсистем и образца в целом. Это позволяет оценить возможность сохранения функциональности указанного образца в полете и вероятность реализации способов его применения по назначению.

Основу данного подхода составляет логико-вероятностный метод (ЛВМ) [2, 3], позволяющий, помимо других возможностей, определять вероятности как прямых, так и инверсных событий. Поэтому применительно к системам противодействия мини-БПЛА (традиционные средства ПВО, БПЛА-перехватчики с огневыми средствами, сетями, клейкими и горючими аэрозолями, оружие направленной энергии (ОНЭ), генераторы компактных вихревых образований и др.) с применением ЛВМ возможно определять вероятности функционального подавления или поражения (далее — противодействия)

рассматриваемых образцов средств воздушно-го нападения (СВН) (вероятности не проведения разведки, не поражения цели) [4, 11–13]. Данная вероятность лишь частично характеризует действенность систем противодействия мини-БПЛА и не является представительным показателем эффективности. Поэтому дополнительно необходимо рассмотреть следующие факторы (особенно применительно к традиционным средствам ПВО):

- значительное превышение количества применяемых мини-БПЛА над боекомплектом;
- значительное превышение времени операции применения многочисленных мини-БПЛА над временем расходования боекомплекта;
- значительное превышение стоимости традиционного средства поражения (боеприпаса) над стоимостью мини-БПЛА и, иногда, над ущербом от применения мини-БПЛА.

В связи со сказанным сравнительную оценку по критерию «эффективность – стоимость» традиционных и нетрадиционных систем противодействия мини-БПЛА возможно проводить с использованием такого показателя, как ожидаемая стоимость противодействия одиночному мини-БПЛА

$$C_{\text{прот}} = \frac{C_{\text{прот}}^{\text{1ц}}}{P_{\text{прот}}^{\text{1ц}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{прот}}$  — ожидаемая стоимость противодействия одиночному мини-БПЛА, руб.;

$C_{\text{прот}}^{\text{1ц}}$  — стоимость одного цикла противодействия мини-БПЛА (выстрела, импульса излучения и т.п.), руб.;

$P_{\text{прот}}^{\text{1ц}}$  — вероятность противодействия мини-БПЛА за один цикл, определяемая с учетом разработанного методического подхода [1].

Очевидно, что применительно к массированному применению рассматриваемых образцов

мини-БПЛА (в группе, рое, стае и т.п.) этого показателя недостаточно.

Для обоснования вида показателя эффективности противодействия массированному применению рассматриваемых СВН может использоваться схема, приведенная на рисунке.

С учетом данной схемы вероятность противодействия нескольким мини-БПЛА  $P_{\text{прот}}$  может определяться следующим образом

$$P_{\text{прот}} = P_{\text{обст}} \cdot P_{\text{прот}}^{\text{1ц}},$$

где  $P_{\text{обст}}$  — вероятность реализации одного цикла противодействия, в том числе обстрела (вероятность того, что для произвольного (случайного) мини-БПЛА будет произведен цикл противодействия).

При этом формула (1) приобретет следующий вид

$$C_{\text{прот}} = \frac{C_{\text{прот}}^{\text{1ц}}}{P_{\text{обст}} \cdot P_{\text{прот}}^{\text{1ц}}}.$$

Для определения величины  $P_{\text{обст}}$  могут применяться различные методы — имитационного (статистического) моделирования, дискретно-событийного, агентного моделирования и системной динамики [5], динамики средних и многие другие. Но большинство из них, даже реализованные в виде программных продуктов, достаточно трудоемки и зачастую требуют, как, например, в AnyLogic [6], написание дополнительных кодов. Все эти методы должны применяться, в основном, априорно, до проведения дорогостоящих экспериментов, в целях т.н. «спора моделей», сравнения достоверности их результатов и т.п. Но до их применения для предварительной оценки эффективности противодействия массированному налету мини-БПЛА, как представляет-

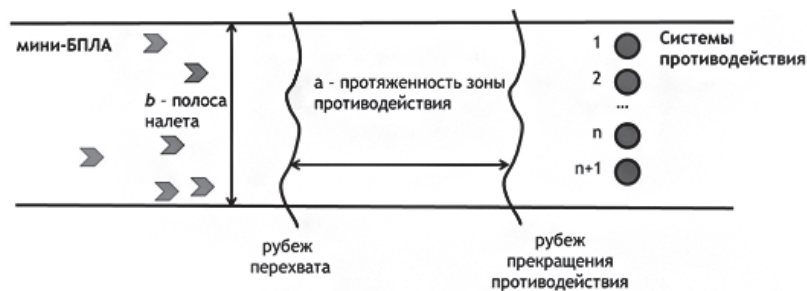


Рис. Схема оценки эффективности противодействия массированному применению мини-БПЛА

ся, достаточно использование теории массового обслуживания (ТМО), расчеты с использованием которой достаточно просты, а их результаты зачастую нетривиальны, неочевидны [7].

В основе ТМО лежат марковские потоки — стационарные пуассоновские (ординарные, без последействия). Как правило, именно эти свойства потоков — стационарность, ординарность, отсутствие последействия приводят в качестве аргументации «грубости», неадекватности данной теории. Но в то же время является общепризнанным тот факт, что именно эти свойства и задают наиболее тяжелые условия для моделируемых систем [8], т.е. обеспечивают получение гарантированного результата. Так, если система противодействия справляется, например, с большими потребными углами доворота осей направленности стволов зенитных пушек или направляющих зенитных ракет для стрельбы по мини-БПЛА, расстояние между которыми или время пролета которыми определенных рубежей носят ярко выраженный случайный характер (как для марковских потоков), то конечно же данная система не будет иметь затруднений при регулярном потоке воздушных целей.

Гарантированность результата, в принципе, ведет к перерасходу используемых сил и средств (систем противодействия мини-БПЛА, их боекомплекта). Но, во-первых, если среди множества систем одна из них точно обеспечит решение задачи противодействия массированному применению мини-БПЛА, хотя и затратит больше ресурсов, то, конечно же, такую систему необходимо планировать к применению, хотя бы в составе резерва. Тем более очевидно, что массированность применения мини-БПЛА в будущем будет только расти, поэтому «гарантированность результата» позволит выбранной системе быть актуальной более длительное время. Ну а во-вторых, рассматриваемые модели ТМО можно поэтапно уточнять. Например, вначале исследовать характеристики систем в установившемся режиме на всем интервале исходных данных. Затем для выбранного интервала выходных параметров систем провести анализ переходных процессов, а после этого уточнить выходные параметры системы с использованием методов имитационного (статистического) моделирования [9]. Уточнение моделей систем массового обслуживания (СМО) позволит снизить разме-

ры затрат ресурсов, необходимых для получения гарантированного результата.

Следует также принять во внимание то, что большая часть данных свойств обладает требуемой степенью адекватности к моделируемым процессам. Так, ординарность потока свидетельствует о том, что за бесконечно малый промежуток времени может появиться не более одного события, что вполне приемлемо принять для стай и роев мини-БПЛА, движение внутри которых достаточно случайно, не регулярно и поэтому маловероятно, что строго одновременно группа из нескольких таких образцов пересечет определенный рубеж.

Стационарность потока отражает тот факт, что вероятность появления  $k$  событий (мини-БПЛА) за промежуток времени  $t$  (времени одного налета) есть функция, зависящая только от  $k$  и  $t$ , что тоже достаточно очевидно при условии низкой вероятности проведения нескольких массированных налетов в ограниченные сроки.

Ну и, наконец, отсутствие последействия свидетельствует о том, что имеет место взаимная независимость появления того или иного числа событий (мини-БПЛА) в непересекающиеся промежутки времени, т.е., что отдельные мини-БПЛА заходят в зону противодействия независимо друг от друга. Этому свойству модели в наименьшей степени соответствуют свойства реального массированного налета мини-БПЛА в виде стаи или роя, двигающихся целенаправленно, по единому алгоритму управления. Но, как правило, подобные алгоритмы («движение за вожаком», «движение за основной группой») тоже не являются жестко детерминированными, и внутри стай и роев движение, как говорилось ранее, достаточно стохастично. Кроме того, отдельные погрешности в системах управления, автономной навигации и других системах мини-БПЛА приводят к более случайному и независимому друг от друга характеру их движения. С этих позиций, и свойство последействия не является недопустимым упрощением реальных процессов.

С применением ТМО вероятность реализации одного цикла противодействия в первом приближении может определяться как [10, 14]

$$P_{\text{обст}} = \min \left\{ 1; (\lambda \cdot T_{\text{ц.с.}}^k + e^{-\lambda \cdot t_{\text{ож}}})^{-1} \right\};$$

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{БПЛА}}}; t_{\text{ож}} = \frac{a}{V_{\text{БПЛА}}},$$

где  $\lambda$  — плотность (интенсивность) потока мини-БПЛА,  $c^{-1}$ ;

$t_{\text{БПЛА}}$  — средний интервал времени между мини-БПЛА, с;

$T_{\text{ц.с.}}^k$  — время цикла противодействия мини-БПЛА, в т.ч. стрельбы, с;

$t_{\text{ож}}$  — время пребывания мини-БПЛА в зоне системы противодействия, с;

$V_{\text{БПЛА}}$  — средняя скорость полета мини-БПЛА, м/с;

$a$  — протяженность зоны противодействия в соответствии с рисунком, м.

Очевидно, что чем больше систем противодействия мини-БПЛА, тем меньше время цикла противодействия (меньше время отклика на один мини-БПЛА). Поэтому при массированном противодействии, в том числе стрельбе, время указанного цикла снижается пропорционально количеству систем противодействия мини-БПЛА

$$T_{\text{ц.с.}}^k = \frac{T_{\text{ц.с.}}^1}{n},$$

где  $T_{\text{ц.с.}}^1$  — среднее время цикла противодействия, в т.ч. стрельбы, одной системой, с;

$n$  — количество систем противодействия мини-БПЛА, ед.

Для традиционных средств ПВО противодействие мини-БПЛА осуществляется в каждый момент времени «один к одному», т.е. одно средство ПВО для одного рассматриваемого СВН. Но для отдельных систем противодействия мини-БПЛА (например, некоторых видов оружия направленной энергии (ОНЭ)), количество систем противодействия — это фактически количество целей, которое находится в пространственной зоне их противодействия (полусфере, конусе и т.п.). В это связи

$$n = V_{\text{зоны}} \cdot \rho_{\text{БПЛА}},$$

где  $V_{\text{зоны}}$  — объем зоны противодействия мини-БПЛА систем, основанных на ОНЭ,  $m^3$ ;

$\rho_{\text{БПЛА}}$  — плотность БПЛА в зоне противодействия, ед./ $m^3$ .

Среднее время цикла противодействия равно

$$T_{\text{ц.с.}}^1 = \begin{cases} T_{\text{обн}} + T_{\text{удер}} + T_{\text{выст}}; \\ T_{\text{обн}} + T_{\text{удер}} + T_{\text{выст}} + T_{\text{перезаряд}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_{\text{обн}}$  — время обнаружения БПЛА, с;

$T_{\text{удер}}$  — время удержания в прицеле БПЛА (для лазерных систем — время воздействия лучом), с;

$T_{\text{выст}}$  — время выстрела (для традиционных средств ПВО включая подлетное время для боеприпаса), с;

$T_{\text{перезаряд}}$  — время перезаряда боекомплекта, с.

Верхнее выражение в системе (2) справедливо для времени операции, меньшем времени расхода боекомплекта  $t_{\text{расх}}$ , нижнее — при времени операции, большем времени расхода боекомплекта.

Время расхода боекомплекта может находиться следующим образом

$$t_{\text{расх}} = \frac{N_{\text{б/к}}}{\omega},$$

где  $N_{\text{б/к}}$  — боекомплект, ед.;

$\omega$  — скорострельность, ед./с.

Таким образом, предложены методические основы для оценки эффективности противодействия массированному применению мини-БПЛА. Приведенные показатели и зависимости позволят проводить предварительную оценку по критерию «эффективность – стоимость» традиционных и нетрадиционных систем противодействия мини-БПЛА. При этом учитывается живучесть к воздействию поражающих факторов (ПФ) отдельных элементов, подсистем и образцов мини-БПЛА в целом, а также способы и условия их применения. Результаты данной оценки могут уточняться с использованием других методов и моделей, а также по результатам лабораторных и натурных экспериментов, боевого применения систем противодействия массированным налетам мини-БПЛА [9, 10, 15].

## Литература

1. Гусева А.С., Дурнев Р.А., Кудряшёв А.С., Свиридок Е.В. От живучести элементов мини-БПЛА к оценке эффективности его поражения: методический подход // Известия РАН. 2020. № 4 (114). С. 55–58.
2. Поленин В.И., Рябинин И.А., Свиринок С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства / Под

ред. А.С. Можаяева. — СПб: «Ника» СПб-региональное отделение РАЕН. 2011. 416 с.

3. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. — М.: Радио и связь. 1981. 264 с.

4. Гусева А.С., Дурнев Р.А., Свиридок Е.В. Методический подход к оценке эффективности поражения воздушных РТК // Доклад на IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций — ассоциированных членов Российской академии ракетных и артиллерийских наук «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе». — М.: Реутов, ФГБУ РАРАН, АО «ВПК «НПО Машиностроения». 2020.

5. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. — СПб: БХВ-Петербург. 2005. 403 с.

6. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учеб. пособие / Р.Ф. Маликов. — Уфа: Изд-во БГПУ. 2013. 296 с.

7. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. — М.: Машиностроение. 1969. 329 с.

8. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Советское радио. Переизд. 2001. 552 с.

9. Сильников М.В., Лазоркин В.И. Активная защита мобильных объектов. — СПб: 2020. 488 с.: ил ISBN 978-5-907344-32-7.

10. Сильников М.В., Михайлин А.И., Лазоркин В.И., Кулаков К.С. Перспективы использо-

вания плазмодинамических метательных устройств в системах обеспечения безопасности охраняемых объектов // Известия РАРАН. 2018. № 2 (102). С. 22–28.

11. Андреев А.В., Сильников М.В. Методика распределения потенциала огневых средств противовоздушной обороны при отражении удара средств воздушного нападения противника // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2016. Вып. 9–10 (99–100). С. 38–42.

12. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146.

13. Рощина Н.В. Системы и средства управления беспилотных летательных аппаратов как объект их поражения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2019. № 1 (4). С. 68–74.

14. Бугаков И.А., Сорокин А.Д., Хомяков А.В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019. № 1 (51). С. 65–68.

15. Самойлов П.В., Иванов К.А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59–65. URL <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 16.10.2019).