

**Доктор военных наук Юрий Гусак,
кандидат военных наук Игорь Шовкошитный,
Иван Старинский,
Василий Шевченко,
Андрей Марченко.**

Безопасность важных государственных объектов от террористических актов с применением ударных беспилотных летательных аппаратов

ABSTRACT

SECURITY OF IMPORTANT STATE OBJECTS FROM TERRORIST ACTIONS WITH THE USE OF ATTACK
UNMANNED AERIAL VEHICLES

In the article, the authors propose a mathematical model of counteraction to unmanned aerial vehicles. The relevance of the work is due to the need to the need of the method of development of the countering actions unmanned aerial vehicles that can be used by terrorist organizations to carry out terrorist acts at important government facilities. The authors analyze different approaches to studying the problem of counteraction unmanned aerial vehicles and propose a mathematical model of a system for counteraction unmanned aerial vehicles based on Markov theory processes.

To evaluate the effectiveness of the system for counteracting unmanned aerial vehicles, it was constructed Markov model, which includes a state graph and a system of differential equations for the probabilities of the system staying in one or another state, and there are obtained analytical expressions for them.

The article presents the results of a numerical experiment, which confirmed the efficiency of the

proposed model and the visibility of the results.

Key words: security of important state facilities, terrorist actions, Markov processes.

Аннотация. В статье авторы предлагают математическую модель противодействия беспилотным летательным аппаратам. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки способов противодействия ударным беспилотным летательным аппаратам которые могут применяться террористическими организациями для осуществления террористических актов на важных государственных объектах Авторы анализируют разные подходы к изучению проблемы противодействия ударным беспилотным летательным аппаратам, предлагают математическую модель системы противодействия ударным беспилотным летательным аппаратам на основе теории марковских процессов.

Для оценивания эффективности системы противодействия ударным беспилотным летательным аппаратам построена марковская модель, которая включает в себя граф состояний и систему дифференциальных уравнений для вероятностей пребывания системы в том или ином состоянии, а также получены аналитические выражения для них.

В статье приводятся результаты численного эксперимента, который подтвердил работоспособность предложенной модели и наглядность получаемых результатов.

Вступление

Анализ действий террористических организаций в мире свидетельствует о том, что арсенал средств совершения террористических актов увеличивается и становится разнообразным, а целями этих актов становятся важные государственные объекты.

Одной из возможных угроз безопасности важных государственных объектов является применение ударных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), несущих различное боевое оснащение, противостоять которому становится все более сложной и актуальной задачей.

Целями террористических актов с применением БПЛА могут быть важные государственные объекты:

центры высшего звена стратегического управления экономикой страны;

предприятия химической промышленности, аэропорты, базы хранения продовольствия и горючего⁵⁵;

командные пункты (пункты управления) стратегического и оперативно-стратегического звеньев управления войсками (силами) Вооруженных Сил Украины.

В связи с широким применением БПЛА в современной вооруженной борьбе на тактического уровня и ниже проблемам их выявления уделяется особое внимание, о чем свидетельствует значительное количество публикаций как отечественных, так и зарубежных

⁵⁵ *Безпілотна авіація у військовій справі: кол. монографія / С. П. Мосов, М. В. Погорецький, С. М. Салій, О. В. Селюков, А. Л. Фещенко; за ред. проф. С. П. Мосова. Київ: Інтерсервіс, 2019. 324 с.*

авторов⁵⁶.

Анализ научных трудов, посвященных проблемным вопросам противодействия БПЛА, показал, что ныне чрезвычайно мало разработано и применяется математических моделей, которые описывают процесс противодействия БПЛА.

Учитывая проведенные ранее научные работы ^{57,58,59,60,61}, посвященные проблемным вопросам выявления БПЛА, свидетельствует о том, что в настоящее время разработаны и применяются простые математические модели, описывающие отдельные способы выявления БПЛА. При этом нет математических моделей для полного описания процесса противодействия БПЛА, который состоит из этапов выявления воздушной цели, идентификации воздушной цели как БПЛА, подавления и поражения БПЛА.

Главной целью статьи является изложить основные положения разработанной математической модели противодействия БПЛА для защиты важных государственных военных объектов от террористических актов с применением ударных БПЛА.

Математическая модель противодействия БПЛА

На основе теории марковских процессов ^{62,63,64} рассмотрим модель противодействия БПЛА, которая состоит из пяти основных состояний:

- S₁ – канал свободен, воздушные цели отсутствуют;
- S₂ – воздушная цель присутствует, осуществляется процесс ее обнаружения;
- S₃ – воздушная цель обнаружена и идентифицирована как БПЛА;
- S₄ – средство подавления (поражения) получило целеуказание и осуществляет подавление

⁵⁶ *Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденцій розвитку засобів протиповітряної оборони):* моногр. / І. С. Романченко, О. М. Загорка, С. Г. Бутенко, О. В. Дейнега. Житомир: Полісся, 2011. 344 с.

⁵⁷ Гусак Ю. А., Старинський І. М. *Математична модель комплексної протидії безпілотним літальним апаратам* // Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗС України. Київ. 2019. № 3 (89). С. 243–251.

⁵⁸ Даник Ю. Г. *Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження* // Зб. наук. пр. ЖВІ ДУТ, 2015. Вип. 10. С. 5–20.

⁵⁹ Годунов А. И. *Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами* / А. И. Годунов, С. В. Шишков, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2 (6). С. 62–70.

⁶⁰ Меньшаков Ю. К. *Защита объектов и информации от технических средств разведки*. Москва: Российск. гос. гуманит. ун-т, 2002. 399 с.

⁶¹ Шовкошитний І. І. *Методичний підхід до оцінювання ефективності комплексної протидії безпілотним літальним апаратам противника* // Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗС України. Київ. 2020. № 1 (91).

⁶² Шуенкин В. А., Донченко В. С. *Прикладные модели теории массового обслуживания. В помощь студентам специальности “Прикладная математика”*: учебн. пособ. Київ: НМК ВО, 1992. 398 с.

⁶³ Вентцель Е. С. *Исследование операции: задачи, принципы, методология*. 2-е изд., стер. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 208 с. (Пробл. науки и техн. прогресса).

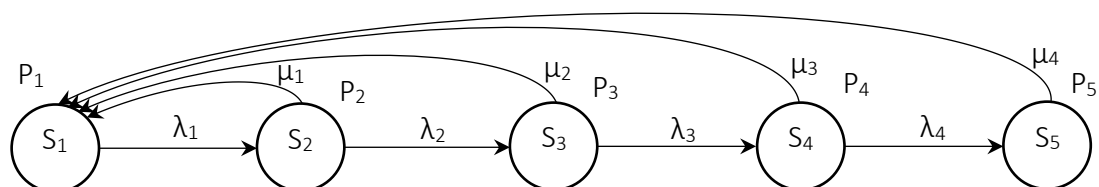
⁶⁴ *Исследование операций*: пер. с англ. В 2-х т. / под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Том 1. Москва: Мир, 1981. 712 с.

(поражение) БПЛА;

S_5 – БПЛА поражен (подавленный).

Вид графа состояний такой системы приведен на рисунке 1.

Рисунок 1 - Граф состояний системы противодействия БПЛА



Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний системы противодействия БПЛА

На основе графа состояний системы противодействия БПЛА, а также при начальных условиях $P_1(0)=1$, $P_2(0)=P_3(0)=P_4(0)=P_5(0)=0$, а также нормирующему условию $\sum_i P_i = 1$, $i = \overline{1,5}$

запишем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \mu_1 P_2 + \mu_2 P_3 + \mu_3 P_4 + \mu_4 P_5 - \lambda_1 P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_1 P_1 - P_2 (\mu_1 + \lambda_2); \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_2 P_2 - P_3 (\mu_2 + \lambda_3); \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_3 P_3 - P_4 (\mu_3 + \lambda_4); \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_4 P_4 - \mu_4 P_5. \end{cases}$$

где P_1 – вероятность того, что система находится в состоянии, когда воздушные цели отсутствуют;

P_2 – вероятность того, что система находится в состоянии, когда воздушная цель обнаружена средством наблюдения;

P_3 – вероятность того, что система находится в состоянии, когда обнаруженная воздушная цель отнесена к классу БПЛА;

P_4 – вероятность того, что система находится в состоянии, когда средство поражения осуществляет наведение и захват БПЛА;

P_5 – вероятность того, что система находится в состоянии противодействия (поражение, подавление) БПЛА;

P_1, \dots, P_5 – вероятности пребывания системы в состояниях S_1, \dots, S_5 соответственно;

λ_1 – интенсивность перехода системы из состояния S_1 в состояние S_2 ;

λ_2 – интенсивность перехода системы из состояния S_2 в состояние S_3 ;

λ_3 – интенсивность перехода системы из состояния S_3 в состояние S_4 ;

λ_4 – интенсивность перехода системы из состояния S_4 в состояние S_5 ;

μ_1 – интенсивность перехода системы из состояния S_2 в состояние S_1 ;

μ_2 – интенсивность перехода системы из состояния S_3 в состояние S_1 ;

μ_3 – интенсивность перехода системы из состояния S_4 в состояние S_1 ;

μ_4 – интенсивность перехода системы из состояния S_5 в состояние S_1 .

Решение системы дифференциальных уравнений для вероятностей состояний системы противодействия БПЛА

В стационарном режиме работы системы противодействия БПЛА вероятности нахождения системы в соответствующих состояниях можно записать через вероятность пребывания ее в состоянии P_1 следующим образом:

$$P_2 = \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_2} P_1;$$

$$P_3 = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} P_1;$$

$$P_4 = \frac{\lambda_3 \lambda_2 \lambda_1}{(\mu_3 + \lambda_4)(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} P_1;$$

$$P_5 = \frac{\lambda_4 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_1}{\mu_4 (\mu_3 + \lambda_4)(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} P_1,$$

где вероятности нахождения системы в состоянии P_1 :

$$P_1 = \left(1 + \left[\frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_2 \lambda_1}{(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} + \frac{\lambda_3 \lambda_2 \lambda_1}{(\mu_3 + \lambda_4)(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} + \frac{\lambda_4 \lambda_3 \lambda_2 \lambda_1}{\mu_4(\mu_3 + \lambda_4)(\mu_2 + \lambda_3)(\mu_1 + \lambda_2)} \right] \right)^{-1}.$$

Тогда, в общем виде, для вероятности нахождения системы противодействия БЛА в n -м состоянии имеем:

$$P_n = \prod_{n=1}^3 \frac{\lambda_n}{\mu_n + \lambda_{n+1}} P_1,$$

где

$$P_1 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{m=4} \frac{\lambda_{m-k} \lambda_{m-k-1} \dots \lambda_1}{(\mu_{m-k} + \lambda_{m-k+1})(\mu_{m-k-1} + \lambda_{m-k}) \dots (\mu_1 + \lambda_2)}};$$

или

$$P_5 = \prod_{n=1}^3 \frac{\lambda_n}{\mu_n + \lambda_{n+1}} \left[\frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{m=4} \frac{\lambda_{m-k} \lambda_{m-k-1} \dots \lambda_1}{(\mu_{m-k} + \lambda_{m-k+1})(\mu_{m-k-1} + \lambda_{m-k}) \dots (\mu_1 + \lambda_2)}} \right].$$

Связь интенсивности перехода системы противодействия БЛА из состояния в состояние и вероятностей появления событий.

Каждое состояние системы противодействия БПЛА связано с соответствующими событиями, а именно: выявлением воздушной цели и ее идентификации как БПЛА, наведением средства противодействия БПЛА и непосредственным влиянием этим средством на БПЛА.

Согласно основным положениям теории марковских процессов каждое из этих событий может характеризоваться вероятностью появления этого события и средним временем пребывания системы противодействия БПЛА в состояниях, соответствующих этим событиям.

В таблице 1 приведены выражения для интенсивности перехода системы противодействия БПЛА из одного состояния в другое через вероятность появления этих событий и среднее время пребывания системы противодействия БПЛА в состояниях, соответствующих этим событиям.

Таблица 1 - Интенсивности перехода системы противодействия БПЛА из состояния в состояние

№ п/п	Название интенсивности перехода системы из состояния в состояние	Выражения для интенсивности перехода системы из состояния в состояние	Значения составляющих выражения для интенсивности перехода системы из состояния в состояние
1.	Интенсивность обнаружения воздушной цели каналом наблюдения	$\lambda_1 = \frac{1}{t_o} P_o$	P_o – вероятность обнаружения воздушной цели средством наблюдения; \bar{t}_o – среднее время обнаружения воздушной цели средством наблюдения;
2.	Интенсивность ложного обнаружения воздушной цели каналом наблюдения	$\mu_1 = \frac{1}{t_{ло}} P_{ло}$	$P_{ло}=1-P_o$ – вероятность ложного обнаружения воздушной цели средством наблюдения; $\bar{t}_{ло}$ – среднее время работы средством наблюдения на определение ложной цели;
3.	Идентификация воздушной цели как БПЛА	$\lambda_2 = \frac{1}{t_{и}} P_{и}$	$P_{и}$ – вероятность того, что воздушная цель идентифицирована как БПЛА; $\bar{t}_{и}$ – среднее время на идентификацию воздушной цели;
4.	Интенсивность того, что воздушная цель идентифицирована не как БПЛА	$\mu_2 = \frac{1}{t_{ни}} P_{ни}$	$P_{ни}=1-P_{и}$ – вероятность того, что воздушная цель идентифицирована не как БПЛА; $\bar{t}_{ни}$ – среднее время на ложную идентификацию БПЛА;
5.	Интенсивность наведения средства поражения на БПЛА	$\lambda_3 = \frac{1}{t_{н}} P_{н}$	$P_{н}$ – вероятность наведения средства поражения на БПЛА; $\bar{t}_{н}$ – среднее время наведения средства поражения на БПЛА;

6.	Интенсивность срыва наведения средства поражения	$\mu_3 = \frac{1}{t_{\text{ук}}} P_{\text{ук}}$	$P_{\text{вк}}=1-P_{\text{н}}$ – вероятность того, что над БПЛА утерян контроль средством наведения;
			$\bar{t}_{\text{вк}}$ – среднее время на сбой работы средства наведения;
7.	Интенсивность поражения БПЛА	$\lambda_4 = \frac{1}{t_{\text{п}}} P_{\text{п}}$	$P_{\text{п}}$ – вероятность поражения БПЛА;
			$\bar{t}_{\text{п}}$ – среднее время на поражение БПЛА средством уничтожения;
8.	Интенсивность не поражения БПЛА	$\mu_4 = \frac{1}{t_{\text{нп}}} P_{\text{нп}}$	$P_{\text{нп}}=1-P_{\text{п}}$ – вероятность того, что БПЛА не будет уничтожен;
			$\bar{t}_{\text{нп}}$ – среднее время на сбой работы средства поражения.

Введем:

показатель приведенной интенсивности обнаружения воздушной цели средством обнаружения:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1} = \frac{t_{\text{лю}}}{t_{\text{о}}} \frac{P_{\text{о}}}{P_{\text{лю}}} = \frac{\bar{t}_{\text{лю}}}{t_{\text{о}}} \frac{P_{\text{о}}}{1-P_{\text{о}}};$$

показатель приведенной интенсивности идентификации воздушной цели как БПЛА:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} = \frac{t_{\text{ни}}}{t_{\text{и}}} \frac{P_{\text{и}}}{P_{\text{ни}}} = \frac{\bar{t}_{\text{ни}}}{t_{\text{и}}} \frac{P_{\text{и}}}{1-P_{\text{и}}};$$

показатель приведенной интенсивности наведения средства поражения на БПЛА:

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3} = \frac{t_{\text{ук}}}{t_{\text{н}}} \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{ук}}} = \frac{t_{\text{ук}}}{t_{\text{н}}} \frac{P_{\text{н}}}{1-P_{\text{н}}};$$

показатель приведенной интенсивности поражения БПЛА:

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_4}{\mu_4} = \frac{t_{\text{нп}}}{t_{\text{п}}} \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{нп}}} = \frac{t_{\text{нп}}}{t_{\text{п}}} \frac{P_{\text{п}}}{1-P_{\text{п}}}.$$

Проверка работоспособности модели

Для проверки работоспособности предложенной математической модели был проведен численный эксперимент.

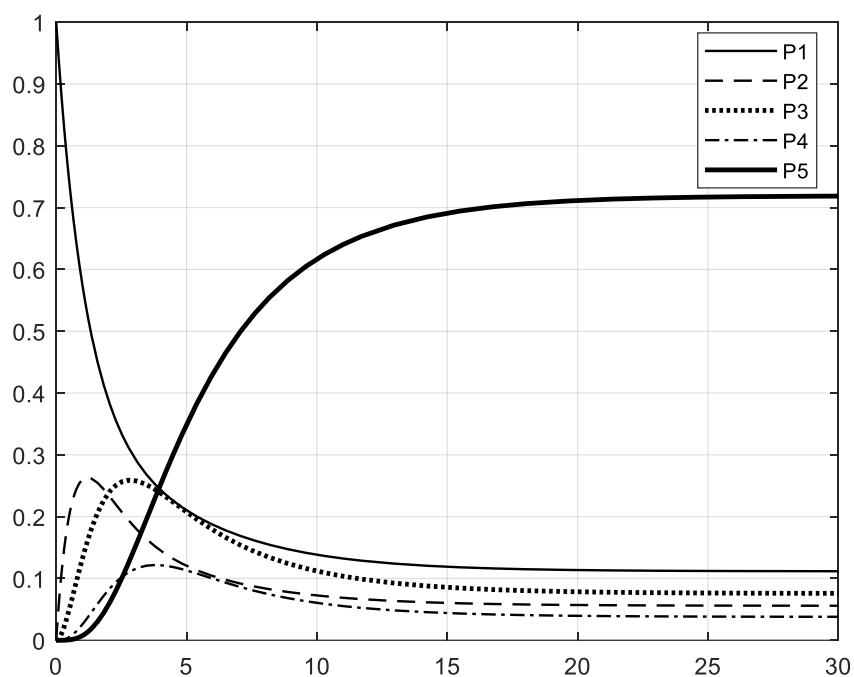


Рисунок 2 - Графики для вероятностей нахождения системы противодействия БпЛА в соответствующих состояниях ($\alpha_1=1.86$; $\alpha_2=15$; $\alpha_3=1.90$; $\alpha_4=19$)

На графиках видно, что при ($\alpha_1=1.86$; $\alpha_2=15$; $\alpha_3=1.90$; $\alpha_4=19$) вероятность пребывания системы противодействия в состоянии P_5 равна 0,72.

Зависимость вероятности P_5 от ($\alpha_1=1.86$; $\alpha_2=15$; $\alpha_3=1.90$;) α_4 ($\alpha_4=0.1 \div 19$) приведен на рисунке 3.

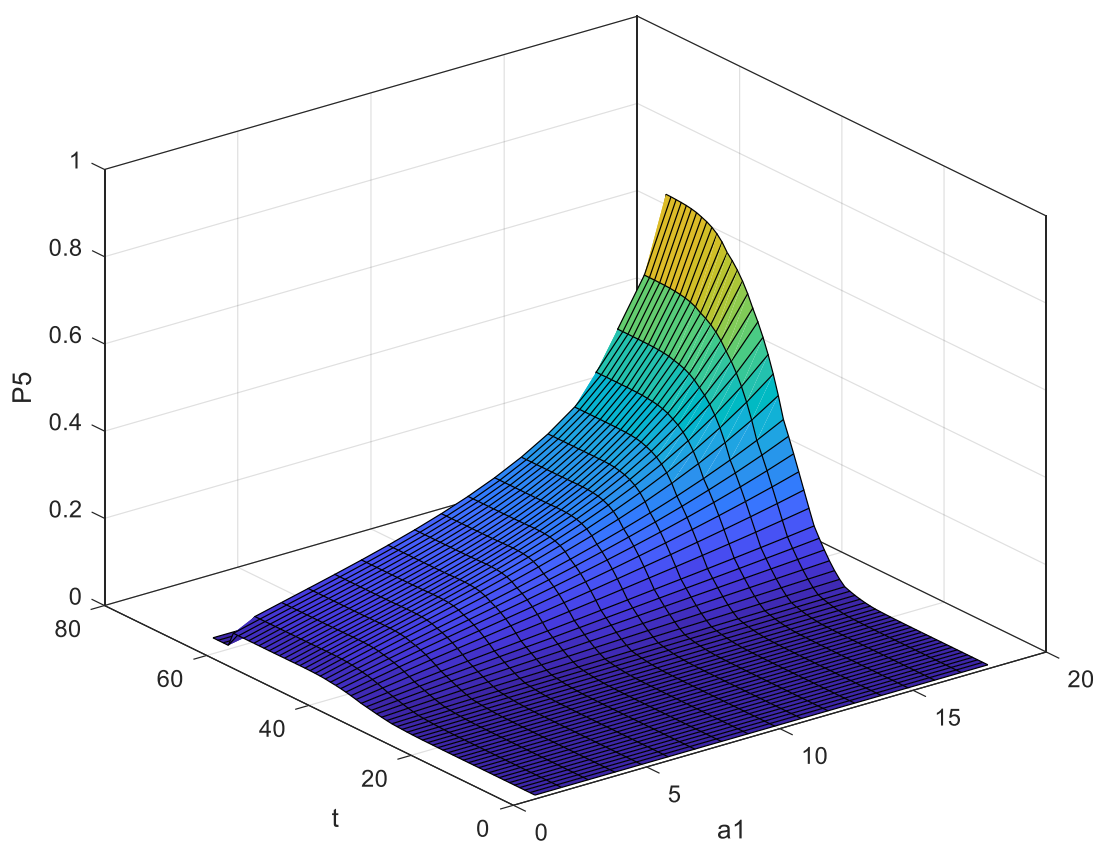


Рисунок 3 - График зависимости вероятности нахождения системы противодействия БПЛА в состоянии P_5 от приведенной интенсивности поражения ($\alpha_1=1.86$; $\alpha_2=15$; $\alpha_3=1.90$; $\alpha_4=19$)

Вывод. Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность смоделировать функционирование системы противодействия БПЛА в зависимости от эффективности средств обнаружения и поражения. Это позволяет оценивать как количественно, так и качественно эффективность системы противодействия БПЛА и обосновывать рекомендации по построению системы противодействия БПЛА для конкретных имеющихся средств обнаружения и поражения.

Бібліографія:

Книги и монографии

Bezplotna avlatsiya u vlyskovly spravl: kol. monografiya / S. P. Mosov, M. V. Pogoretskiy, S. M. Sally, O. V. SElyukov, A. L. Feschenko; za red. prof. S. P. Mosova. KiYiv: InterserviS, 2019. 324 s.

Venttsel E. S. Issledovaniye operatsii: zadachi. printsipy. metodologiya. 2-e izd.. ster. Moskva: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit.. 1988. 208 s. (Probl. nauki i tekhn. progressa).

Godunov A. I. Kompleks obnaruzheniya i borby s malogabaritnymi bespilotnymi letatelnyimi apparatami / A. I. Godunov, S. V. Shishkov, N. K. Yurkov // Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem. 2014. № 2 (6). S. 62–70.

Menshakov Yu. K. Zashchita obyektov i informatsii ot tekhnicheskikh sredstv razvedki. Moskva: Rossiysk. gos. humanit. un-t. 2002. 399 s.

Issledovaniye operatsiy: per. s angl. V 2-kh t. / pod red. Dzh. Moudera. S. Elmagrabi. Tom 1. Moskva: Mir. 1981. 712 s.

Teoriya i praktika borotbi z malorozmırnimi nizkolıtnimi tsilyami (otsınka mozhlivostey, tendentsiy rozvitku zasobiv protipovltryanoYi oboroni): monogr. / I. S. Romanchenko, O. M. Zagorka, S. G. Butenko, O. V. Deynega. Zhitomir: Polissya, 2011. 344 s.

Shuyenkin V. A., Donchenko V. S. Prikladnyye modeli teorii massovogo obsluzhivaniya. V pomoshch studentam spetsialnosti "Prikladnaya matematika": uchebn. posob. Kiiv: NMK VO. 1992. 398 s.

Статьи

Gusak Yu. A., Starinskiy I. M. Matematichna model kompleksnoYi protidiyi bezplotnim litalnim aparatom // Zb. nauk. pr. TsNDI ZS UkraYini. KiYiv. 2019. № 3 (89). S. 243–251.

Danik Yu. G. Anallz effektivnosti viyavleniya taktichnih bezplotnih litalnih aparativ pasivnimi ta aktivnimi zasobami sposterezheniya // Zb. nauk. pr. ZhVI DUT, 2015. Vip. 10. S. 5–20.

Shovkoshitniy I. I. Metodichniy pldhid do otslnyuvannya effektivnosti kompleksnoYi protidiyi bezplotnim litalnim aparatom protivnika // Zb. nauk. pr. TsNDI ZS UkraYini. KiYiv. 2020. № 1 (91).

Резюме

В статье рассматривается вопрос обеспечения безопасности важных государственных объектов от террористических актов с применением беспилотных летательных аппаратов. Предлагается математическая модель противодействия ударным беспилотным летательным аппаратам на основе теории марковских процессов. Статья может быть интересной для специалистов по обеспечению безопасности государства.

Ключевые слова: безопасность важных государственных объектов, террористический акт, марковские процессы.

О АВТОРАХ

Ведомости об авторах:

Information about the authors:

Husak Yurii Doctor of Military Sciences, Senior Researcher, Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, y.husak1512@mail.com https://orcid.org/0000-0002-3423-2112	Ihor Shovkoshtnyi Candidate of Military Sciences Senior Research Fellow, Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, igor65@meta.ua https://orcid.org/0000-0001-9245-4111
Ivan Starynskyi Senior Research Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, super_vanja-starinskijj@ukr.net https://orcid.org/0000-0003-2001-7718	Vasyl'ii Shevchenko Senior Research Fellow Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-9396-7848
Andrii Marchenko Institute of Special Communication and Information of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, mao1971@ukr.net https://orcid.org/0000-0002-1268-8012	