



ISSN (Online): 2708-5228
ISSN (Print): 2312-4458

ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК MILITARY TECHNICAL COLLECTION

Том 33 № 2, 2025
Vol. 33 No. 2, 2025

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК
ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА САГАЙДАЧНОГО

HETMAN PETRO SAHAIDACHNYI NATIONAL ARMY ACADEMY



ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Military Technical Collection

Том 33 № 2, 2025

Vol. 33 No. 2, 2025

Львів – Lviv

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА САГАЙДАЧНОГО
HETMAN PETRO SAHAIDACHNYI NATIONAL ARMY ACADEMY

2025

Ідентифікатор цифрового об'єкта Випуску ВТЗ Том 33 № 2, 2025
Digital Object Identifier of the Issue MTC Vol. 33 No. 2, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025>

Занесений до Категорії «Б» переліку наукових фахових видань України в галузі технічних та військових наук (спеціальність – 255 (К7)) Наказ Міністерства науки і освіти України № 409 від 17 березня 2020 р.

Included into the Category "B" of the List of Scientific Professional Publications of Ukraine in the field of Technical and Military Sciences (Specialty – 255 (K7)) Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 409 dated March 17, 2020.

В 43 Військово-технічний збірник. Том 33 № 2. Львів: НАСВ, 2025. 210 с.

В 43 Military Technical Collection. Vol. 33 No. 2. Lviv: NASV, 2025. 210 p.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Реферативна інформація зберігається у загальнодержавній реферативній базі даних Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського

Abstract information is stored in the national abstract database of the V.I. Vernadsky National Library of Ukraine.

Видання індексуються міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних:

The publication is indexed by international bibliometric and scientometric databases:

Bielefeld Academic
Search Engine (BASE), ESJL,
CrossRef,

Citefactor,
General Impact Factor (GIF),

Index Copernicus,
Google Scholar,
OpenAIRE,

Polska Bibliografia
Naukowa (PBN),
ResearchBib, Road,

Scientific Indexing Services (SIS),
ULRICHS Web,
WorldCat

Засновник – Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
Founder – Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy

Витяг з реєстру суб'єктів у сфері медіа:

R30-01944. Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 21 грудня 2023 р. № 1827

Extract from the Register of Media Entities:

R30-01944. Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine dated December 21, 2023, No. 1827.

тел./ tel.: (032) 258-44-76 (науково-організаційний відділ / Scientific-Organizational Department)

E mail: nasv_vtz@post.mil.gov.ua

Вебсайт / Website: <http://vtz.asv.gov.ua>

Редакційна колегія / Editorial Board:

Голова редакційної колегії Настішин Ю.А., д.ф.-м.н., с.н.с.

Заступник голови редакційної колегії Малинич С.З., д.ф.-м.н., проф.

Відповідальний за випуск Рижев Є.В., к.т.н., с.д.

Chair: Nastyshyn Yu.A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Deputy Chair: Malynych S.Z., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor

Manager: Ryzhov Ye.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher

Ванкевич П.І., д.т.н., проф.

Васьківський М.І., д.т.н., проф.

Величко Л.Д., к.ф.-м.н., доц.

Вінтер Зденек, Prof. Dr. Sci.

Волочій Б.Ю., д.т.н., проф.

Габчак В.І., д.т.н., проф.

Дробенко Б.Д., д.ф.-м.н., с.н.с.

Грубель М.В., д.т.н., проф.

Криванек Вацлав, Ph.D. (Spec. Communic. Sys.), Assist. Prof.

Зубков А.М., д.т.н., с.н.с.

Кавалек Адам, Prof. Dr. Sci.

Кершис Роберт, Prof. Dr. Sci.

Коструба А.М., д.ф.-м.н., проф.

Кривцун В.І., д.т.н., с.н.с.

Купріненко О.М., д.т.н., проф.

Лаврут О.О., д.т.н., проф.

Лалицький С.В., д.т.н., проф., Засл. діяч науки і техніки України

Майстренко О.В., д.військ.н., с.д.

Оліярник Б.О., д.т.н., проф.

Сакович Л.М., к.т.н., доц.

Соколовський С.М., к.військ.н., доц.

Стадник В.Й., д.ф.-м.н., проф.

Хаустов Д.Є., к.т.н., с.д.

Чепков І.Б., д.т.н., проф., Засл. діяч науки і техніки України

Чорний М.В., к.т.н., с.н.с.

Шабатура Ю.В., д.т.н., проф.

Vankevych P.I., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Vaskivskiy M.I., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Velychko L.D., Ph.D. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.

Vintr Zdenek, Prof. Dr. Sci.

Volochii B.Yu., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Hrabchak V.I., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Drobenko B.D., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Hrubel M.V., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Krivanek Vaclav, Ph.D. (Spec. Communic. Sys.), Assist. Prof.

Zubkov A.M., Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher

Kawalec Adam, Prof. Dr. Sci.

Kersys Robertas, Prof. Dr. Sci.

Kostruba A.M., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor

Kryvtun V.I., Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher

Kuprinenko O.M., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Lavrut O.O., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Lapytskyi S.V., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Maistrenko O.V., Dr. Sc. (Mil.), Senior Researcher

Oliarnyk B.O., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Sakovych L.M., Ph.D. (Tech.), Assoc. Prof.

Sokolovskiy S.M., Ph.D. (Mil.), Assoc. Prof.

Stadnyk V.Y., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor

Khaustov D.Ye., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher

Chepkov I.B., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Chorny M.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher

Shabatura Yu.V., Dr. Sc. (Tech.), Professor

Рекомендовано до друку

рішенням Вченої ради Національної академії сухопутних військ (протокол від 21.10.2025 № 5)

Recommended for publication by

the decision of the Academic Council of the National Army Academy (Minutes No. 5 dated October 21, 2025).

Збірник містить матеріали результатів наукових досліджень наукових і науково-педагогічних працівників, докторантів, ад'юнктів і здобувачів наукових ступенів в галузі технічних і військових наук.

Для науковців, викладачів, студентів, курсантів і всіх, хто цікавиться проблемами воєнної науки та техніки.

The Collection contains materials on the results of scientific research by scientific and academic staff, doctoral candidates, adjuncts, and applicants for scientific degrees in the fields of technical and military sciences.

For scientists, lecturers, students, cadets, and anyone interested in the problems of military science and technology.

РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОВТ DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

UDC 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.3-7>

L. Velychko*, M. Voitovych, M. Sorokatyi

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

DETERMINING THE SPEED OF A PROJECTILE AT THE MOMENT OF ITS TRANSITION FROM SUBSONIC TO TRANSONIC SPEED

The authors have developed a method that takes into account that the magnitude of air drag force depends on the type of speed. That is, it has a different functional dependence when the projectile moves at supersonic, subsonic, or transonic speeds. The moment of transition of the projectile's speed from supersonic to subsonic is determined by the condition that the speed of the projectile becomes equal to the speed of sound in air. The latter depends on the air temperature at the point where the projectile is located. As the altitude of the projectile increases, the speed of sound in the air decreases. The condition that determines the speed of the projectile, which separates the movement of the projectile at subsonic speed from the movement at transonic speed, is not given in the literature. Based on the analysis of experimental studies aimed at establishing the dependence of the drag coefficient on the Mach number, the authors proposed a condition that allows determining the moment of change in the projectile's velocity from subsonic to transonic. It has been established that the speed value that distinguishes a subsonic projectile from a transonic V_{trsub} depends on the mass and initial velocity of the projectile, air temperature, and atmospheric pressure. Numerical values of this magnitude V_{trsub} were obtained for Projectiles, HE, M795 and M795M; Fuze, PD, M739A1 fired from an M777A2 howitzer with a 3H charge. It has been determined that changes in the mass and initial velocity of the projectile have a negligible effect on the velocity V_{trsub} . However, changes in air temperature and atmospheric pressure have a significant effect on the velocity V_{trsub} . As the air temperature increases, the velocity V_{trsub} increases, and it also increases as the atmospheric pressure decreases.

Keywords: external ballistics, air drag force, subsonic projectile velocity, transonic velocity.

Statement of the problem

When a projectile moves through the air, its speed can be supersonic, subsonic, or transonic. Experimental and theoretical studies have established that the magnitude of the air drag force on a projectile's motion depends significantly on the type of its speed. The graphical results of experimental studies conducted to establish the dependence of the drag coefficient on the Mach number for different types of projectiles are given in [1, 2].

Fig. 1 shows the approximate dependence of the drag coefficient C_D on the Mach number. The dependence of the drag coefficient on the projectile's

velocity is described by curve DB for transonic speeds, curve BC for subsonic speeds, and curve CL for supersonic speeds. Thus, the functional dependencies of the frontal air resistance force on the projectile velocity significantly depend on the type of velocity. Therefore, when studying the motion of a projectile, it is necessary to distinguish between the motions of a projectile at supersonic, subsonic, and transonic velocities.

The speed magnitude that separates the movement of a projectile from supersonic to subsonic speed depends on the air temperature at the point where the projectile is located and is determined using the formula

Article history: Income 08 September 2025; Revised 13 October 2025; Accepted 09 October 2025; Print 05 December 2025

Величко Л.Д. ORCID ID: 0000-0003-0191-4843, Войтович М.І. ORCID ID: 0000-0002-5593-6493,
Сорокатий М.І. ORCID ID: 0000-0003-4930-5836

* Corresponding author lvelychko@yahoo.com

$$V_s(z) = \sqrt{\frac{k_a R_{un}}{\mu_a} (TK - 0,006328 z)}, \quad (1)$$

where V_s – is the speed of sound in air, $k_a = 1,4$ – is the adiabatic index of air, $\mu_a = 28,96$ kg/kmol – is the conditional molar mass of air, $R_{un} = 8314$ J/kmol·K – is the universal gas constant, TK – is the absolute temperature of air at the weapon location, z – is the height of the projectile above the weapon location.

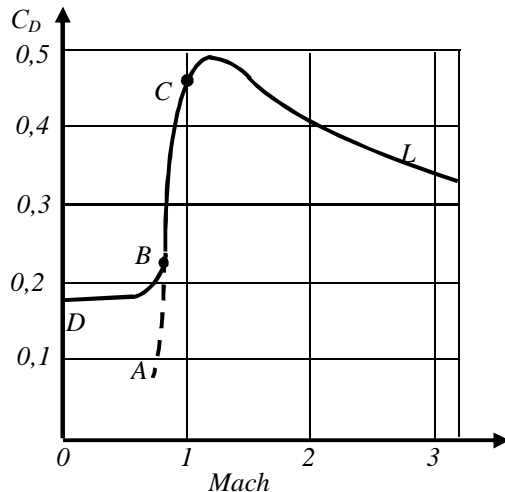


Fig. 1. Dependence of the drag coefficient C_D on the Mach number

The functional dependence for determining the velocity of a projectile which distinguishes subsonic velocity from transonic velocity is not explicitly stated in the literature.

Therefore, the problem of determining this velocity arises.

Analysis of research and publications

A significant number of scientific articles and experimental studies are devoted to the study of external ballistics problems. A summary of these results is presented in monographs [1-3]. In these monographs, scientific works [4-9], and other articles, the force of frontal air resistance to the motion of a projectile is described by dependencies

$$R = \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} i c_x \left(\frac{V}{V_s} \right), \quad (2)$$

or

$$R = \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} C_D, \quad (3)$$

where R – is the drag force of air, ρ – is the density of air, V – is the velocity of the projectile, d – is the caliber of the projectile, i – is the shape coefficient of

the projectile, $c_x \left(\frac{V}{V_s} \right)$ – is the reference drag function,

C_D – is the drag coefficient. The magnitude $\frac{\rho V^2}{2}$ is called dynamic pressure.

To reduce discrepancies between the results of field and theoretical studies of projectile dynamics, specific values of drag coefficients C_D or projectile shapes i are selected. Formulas (2) and (3) do not directly take into account the type of projectile velocity to determine the magnitude of the air drag force on the projectile's motion. That is, formulas (2) and (3) do not fully reflect the physical processes that occur during the flight of a projectile in the air. However, they allow, with a certain degree of accuracy, to determine the kinematic parameters of the projectile's movement in the air. Further scientific research is needed to gain a better understanding of the physical processes that occur during the flight of a projectile in the air.

Formulation of the article's objective

The speed of a projectile in flight, depending on its initial velocity, can be supersonic, subsonic, or transonic. The nature of the change in the magnitude of the air resistance force acting on a moving projectile depends significantly on the type of velocity. There is a need to determine the velocities that separate supersonic from subsonic and subsonic from transonic velocities. In the first case, the speed is determined using formula (1). How to determine the speed of a projectile that separates subsonic speed from transonic speed is not specified in the literature.

Therefore, the purpose of this article is to determine the magnitude of this velocity and to study the effects of the projectile's mass, its initial velocity, air temperature, atmospheric pressure, wind speed, and other factors on its magnitude.

Presentation of the main material

Unlike the widely known formulas (2) and (3), which determine the magnitude of the frontal air resistance force on a moving projectile, articles [10, 11] formulate another mathematical model for determining this force. The model takes into account the fact that the magnitude of the drag force significantly depends on the type of velocity. Therefore, the determination of the magnitude of the drag force of air on a moving projectile is described by the functional dependence

$$R(t) = c_x \cdot \rho_a \cdot S_x \cdot (V(t))^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{V_s(t)} \right)^{\beta_i} \quad (4)$$

and the values of its coefficients $\gamma_i (i=1,2,3)$ and $\beta_i (i=1,2,3)$ are different at supersonic ($i=1$), subsonic ($i=2$) and transonic ($i=3$) speeds.

In formula (4), the following symbols are used: c_x – coefficient that takes into account the aerodynamics of the projectile shape when air flows around it longitudinally, and proportionality; ρ_a – air density; s_x – maximum cross-sectional area of the projectile.

In the absence of wind, the functional dependence of the frontal air resistance force on the projectile velocity will be as follows [10, 11]

$$R(t) = \frac{c_x s_x \mu_a \cdot 101325}{R_{um}} \left(1 - \frac{6,5(z+zp)}{288000} \right)^{5,255} \times \frac{(V(t))^{2+\gamma_i+\beta_i}}{\left(\frac{k_a R_{um}}{\mu_a} \right)^{0,5\beta_i} (TK - 0,006328 z(t))^{1+0,5\beta_i}} \cdot (5)$$

Variable zp characterizes the atmospheric pressure at the location of the weapon. For example, if the atmospheric pressure is 750 mm Hg, then $zp = 111,54$ m and if it is 760 mm Hg, then $zp = 0$.

We place the origin of the coordinate system $Oxyz$ at the location of the weapon. The axis Ox is directed toward the target and lies in the horizontal plane of the weapon, the axis Oz – is directed vertically upward, and the axis Oy is perpendicular to the plane Oxz , forming a right-handed coordinate system.

Let us determine the effects of the projectile's mass, its initial velocity, air temperature, and atmospheric pressure on the velocity V_{trsub} , that distinguishes the subsonic velocity of the projectile from the transonic velocity.

Example. Let's consider the motion of Projectiles, HE, M795 and M795M; Fuze, PD, M739A1 fired from an M777A2 howitzer with a 3H charge, which provides the initial velocity of the projectile $V_0 = 547$ m/s.

The motion of the projectile under the action of air drag, projectile weight, and Coriolis force was considered.

During the research, the following values were used: $m = 46,948$ kg, $s_x = \pi \cdot 0,078^2$ m², $c_x = 0,35$, $t = 15^\circ C$ or $TK = 288$ K, $p_{atm} = 760$ mm Hg, wind speed – $V_w = 0$ m/s.

At aiming angles within the range $0 \text{ mil} < \theta_0 \leq 125,1 \text{ mil}$ the projectile will only move at supersonic speed, and the values of the coefficients in formula (5) are as follows: $\gamma_1 = -0,107512$ and $\beta_1 = -0,044864$.

If the aiming angle changes within $128,4 \text{ mil} \leq \theta_0 \leq 298,0 \text{ mil}$, then the projectile's velocity will initially be supersonic and then subsonic. The condition for the completion of the projectile's supersonic velocity phase and the start of its subsonic velocity phase is the violation of the inequation

$$V(t) \geq V_s(t). \quad (6)$$

At the stage of movement with subsonic velocity, the values of the parameters in formula (5) are as follows: $\gamma_2 = -0,196753$ and $\beta_2 = 2,090781$.

It should be noted that the speed of sound decreases with increasing altitude of the projectile.

At aiming angles within $303,2 \text{ mil} \leq \theta_0 \leq 573,3 \text{ mil}$ during the flight of the projectile, three types of velocity are recorded. Initially, the projectile moves at supersonic velocity, and the moment of completion of this stage is described by condition (6). In the second stage, it moves at subsonic velocity, and then at transonic velocity.

In Fig. 1, the CL curve describes the dependence of the drag coefficient C_D on the Mach number if the projectile velocity is supersonic. The BC curve indicates the nature of the change in the drag coefficient C_D , if the projectile velocity is subsonic. The DB curve describes the change in the drag coefficient C_D with a change in the Mach number if the projectile is moving at transonic velocity. Point B is the point that separates the dependence of the drag coefficient C_D on the Mach number at subsonic speed from that at transonic speed. Analyzing the graph in Fig. 1, we can see that as the Mach number decreases, the drag coefficient C_D , according to the nature of the SV curve, does not continue to decrease sharply after point B . That is, a further decrease in the drag coefficient is not described by curve AB , but by curve DB . There is a tendency for the nature of the dependence of the drag coefficient on the Mach number to change. This gives reason to assert that point B separates the stage of projectile motion at subsonic speed from the stage of motion at transonic speed. Thus, the end of the stage of projectile motion at subsonic speed is the moment when the inequation condition is violated,

$$V(t) > V(t+\Delta t), \quad (7)$$

where $\Delta t > 0$.

Let us analyze the influence of individual parameters on the velocity of a projectile at the moment of its transition from subsonic to transonic speeds.

Let us consider the influence of a change in the mass of the projectile, under otherwise standard conditions, on the velocity V_{trsub} that distinguishes the movement of a projectile at subsonic speed from transonic speed.

Table 1

Dependence of the projectile velocity at the moment of transition from subsonic to transonic speed on its mass

m , kg	V_0 , m/s	θ_0, mil	V_{trsub} , m/s	t_k , sec
2sq (45,950)	552,91	298,677	301,21	26,609
3sq (46,449)	549,93	298,568	301,73	26,541
4sq (46,948)	547,00	298,451	302,24	26,472
5sq (47,447)	544,12	298,315	302,74	26,401
6sq (47,946)	541,28	298,163	303,23	26,329

Table 1 shows the weight of the projectile in the first column. Due to changes in the weight of the projectile, its initial velocity will change with the same charge, and its magnitudes are shown in the second column. The third column shows the aiming angle at which the projectile completes its movement at subsonic speed when it reaches the level of the weapon. The fourth column shows the projectile's velocity V_{trsub} at the moment of transition from subsonic to transonic speeds. The duration of the projectile's movement is shown in the fifth column.

Analyzing the results presented in Table 1, we can conclude that increasing the mass of the projectile does not significantly increase the velocity V_{trsub} , that separates the projectile's movement from subsonic to transonic speeds.

Let us examine the effect of changing the initial velocity of the projectile, under otherwise standard conditions, on the velocity V_{trsub} at the moment of transition from subsonic to transonic speed.

Table 2

Dependence of the projectile velocity at the moment of transition from subsonic to transonic velocity on its initial velocity

V_0 , m/s	θ_0, mil	V_{trsub} , m/s	t_k , sec
539,00	298,470	301,61	26,187
543,00	298,465	301,93	26,330
547,00	298,451	302,24	26,472
551,00	298,425	302,54	26,612
555,00	298,391	302,85	26,752

Analyzing the results presented in Table 2, it can be stated that increasing the initial velocity of the projectile does not significantly increase the velocity V_{trsub} that distinguishes the movement of the projectile at subsonic and transonic speeds.

Let us consider the effect of only the change in air temperature, under otherwise standard conditions, on the speed V_{trsub} at the moment of transition from subsonic to transonic speed.

Table 3

Dependence of the projectile velocity at the moment of transition from subsonic to transonic speed on the change in air temperature

t , °C	θ_0, mil	V_{trsub} , m/s	t_k , c
-5° C	297,256	292,34	26,102
5° C	297,906	297,35	26,294
15° C	298,451	302,24	26,472
25° C	298,894	307,02	26,637
35° C	299,245	311,69	26,791

Analyzing the results presented in Table 3, it can be stated that an increase in air temperature significantly increases the speed V_{trsub} that distinguishes subsonic projectile motion from transonic motion.

Changes in atmospheric pressure also affect the speed V_{trsub} that distinguishes subsonic projectile motion from transonic motion.

Table 4

Dependence of the projectile velocity at the moment of transition from subsonic to supersonic speed on changes in atmospheric pressure

P_{atm} , mm Hg	θ_0, mil	V_{trsub} , m/s	t_k , sec
760	298,451	302,24	26,472
740	298,171	304,09	26,560
720	297,848	305,99	26,647
700	297,476	307,95	26,733
680	297,047	309,96	26,817

Analyzing the results presented in Table 4, it can be stated that a decrease in atmospheric pressure significantly increases the speed V_{trsub} that distinguishes the movement of a projectile at subsonic speed from transonic speed.

It can be argued that accompanying and side winds will also affect the speed V_{trsub} that distinguishes the movement of a projectile traveling at subsonic speed from transonic speed.

When the aiming angle increases $298,0mil < \theta_0$, a gradual change in the projectile's velocity will be observed during its flight. Initially, it will move at supersonic speed, and the end of this stage is characterized by a violation of condition (6). In the second stage, the projectile moves at subsonic speed. Condition (7) allows us to determine the moment when the projectile completes its subsonic motion and begins to move at transonic speed. In the third stage, the projectile moves at transonic speed, and in formula (4), the values of the parameters $\gamma_3 = -0,253595$ and $\beta_3 = 0,777779$.

During mortar firing, certain peculiarities of the projectile's movement will be observed, which will be discussed in a separate article.

Conclusions

During the flight of Projectiles, HE, M795 and M795M; Fuze, PD, M739A1 fired from the M777A2 howitzer and charged with 3H, at aiming angles $\theta_0 < 746,6 \text{ mil}$, the projectile will gradually move at supersonic, subsonic, and transonic speeds. The transition of the projectile from supersonic to subsonic speed is described by inequation (6), and the transition from subsonic to transonic speed is determined by condition (7).

The speed magnitude V_{trsub} that separates the movement of a projectile from subsonic to transonic speeds depends on the mass of the projectile, its initial speed, air temperature, and atmospheric pressure. It can be argued that the speed magnitude V_{trsub} is influenced by both headwinds and crosswinds. Further research will be devoted to this issue.

References

1. McCoy R. L. (2012), Modern Exterior Ballistics. The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles. 328 p.
2. Donald E. Carlucci and Sidney S. Jacobson (2008), Ballistics: theory and design of guns and ammunition. 514 page.
3. Lewtas Ian, Mcalister Rachael, Wallis Adam, Woodley Clive and Cullis Ian (2016), The ballistic performance of the bombard Mons Meg. *Defence Technology*. No. 12 (2016). Pages 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.12.001>
4. Sahoo S. and Laha M.K. (2014), Coefficient of Drag and Trajectory Simulation of 130 mm Supersonic Artillery Shell with Recovery Plug or Fuze. *Defence Science Journal*,

Vol. 64, No. 6, November 2014, pp. 502-508, DOI: 10.14429/dsj.64.8110

5. Bo Zhang, Shushan Wang, Mengyu Cao and Yuxin Xu (2014), Impacts of Deflection Nose on Ballistic Trajectory Control Law. *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2014, Article ID 984840, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/984840>

6. Balon Rastislav and Komenda Jan (2006), Analysis of the 155 mm ERFB / BB projectile trajectory. *Advances in MT*. No. 10, 2006. pp. 91-114.

7. Liang Ke, Zheng Huang and Jing-min Zhang (2017), Optimal design of the aerodynamic parameters for supersonic two-dimensional guided artillery projectile. *Defence Technology*. No. 13. pp. 206-211. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2017.05.003/>

8. B. Zygmunt, K. Motyl, B. Machowski, M. Makowski, E. Olejniczak and T. Rasztabiga (2015), Theoretical and experimental research of supersonic missile ballistics. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. No. 63 (1). pp. 229-233. DOI: <https://doi.org/10.1515/bpasts-2015-0027/>

9. Grabchak V.I. and Bondarenko S.V. (2013), "Analiz isnyuyuchykh ta perspektyvnykh metodiv vyznachennya syly oporu povitrya ruhu snaryadiv" [Analysis of existing and perspective methods for determining the air resistance force of the projectiles movement], *Military Technical Collection*. No. 2 (9). pp. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.9.2013.13-19> [in Ukrainian]

10. Velychko L., Petruchenko O., Tereshchuk O. and Nanivskiy R. (2021), "Zovnishnia balistica snariada, vipyschenogo z gaubici". [Exterior ballistics howitzer projectile]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2021. № 24. pp. 13-20. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.13-20> [in Ukrainian]

11. N. Huzyk, N. Sokulska and L. Velychko (2023), Mathematical model of external ballistics of projectiles. *Information Processing Systems*. Issue 1 (172). pp. 20-28. DOI: 10.30748/soi.2023.172.03

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ШВИДКОСТІ СНАРЯДА В МОМЕНТ ПЕРЕХОДУ ЙОГО РУХУ ВІД ПІДЗВУКОВОЇ ДО ДОЗВУКОВОЇ ШВИДКОСТЕЙ

Л.Д. Величко, М.І. Войтович, М.І. Сорокатий

Авторами розроблена методика, яка враховує, що величина сили лобового опору повітря залежить від типу швидкості. Тобто має різну функціональну залежність при русі снаряда з надзвуковою, підзвуковою чи дозвуковою швидкостями. Момент переходу швидкості снаряда з надзвукової на підзвукову визначається з умови, що швидкість снаряда стає рівною швидкості звуку в повітрі. Остання залежить від температури повітря в точці перебування снаряда. Зі збільшенням висоти руху снаряда величина швидкості звуку в повітрі зменшується. Умову, з якої визначається величина швидкості снаряда, що відокремлює рух снаряда з підзвуковою швидкістю від руху з дозвуковою, в літературі не наведено. На основі аналізу експериментальних досліджень, скерованих на встановлення залежності коефіцієнта сили опору від числа Маха, автори запропонували умову, яка дозволяє визначати момент зміни швидкості снаряда з підзвукової на дозвукову. Встановлено, що величина швидкості, яка розмежовує рух снаряда з підзвуковою швидкістю від дозвукової V_{trsub} , залежить від маси та початкової швидкості снаряда, температури повітря і атмосферного тиску. Отримано числові значення цієї величини V_{trsub} для Projectiles, HE, M795 і M795M; Fuze, PD, M739A1, випущеного з гаубиці M777A2 із зарядом 3H. Визначено, що зміна маси і початкової швидкості снаряда незначно впливає на величину швидкості V_{trsub} . Проте зміна температури повітря та атмосферного тиску суттєво впливають на величину швидкості V_{trsub} . При збільшенні температури повітря величина швидкості V_{trsub} зростає і вона теж зростає при зменшенні атмосферного тиску.

Ключові слова: зовнішня балістика, сила лобового опору повітря, підзвукова швидкість снаряда, дозвукова швидкість.

UDC 629.1

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.8-12>V. Zykov¹, V. Ratoshnyuk¹, Y. Chahan^{2*}, I. Cherniakhivskiy¹, Ye. Ryzhov²¹ Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolev² Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

SPECIFICS OF NONLINEAR VIBRATIONS IN SYSTEMS WITH CONCENTRATED MASSES AND METHODS OF THEIR STUDY

The development of a suspension system capable of ensuring the reliable functioning of other vehicle systems and providing comfortable conditions for the crew remains among the important modern problems in military vehicle design. Traditionally, the studies of the functioning of suspension systems are carried out based on a linear model of the relationship between deformation and restoring force of an elastic element, which does not account for numerous factors that arise during movement over rough terrain. Progress can be achieved via the development of an approximate analytical method for studying such systems, which allows one to evaluate the effect of the entire complex of suspension parameters on the dynamics and stability of oscillatory processes. In this work, analytical methods for studying oscillatory processes of systems with concentrated masses are considered, and the conditions for their realization are derived. The conditions for the manifestation of nonlinearities in oscillatory processes are established. The need to refine computational models of existing systems and create new models that realistically reflect their dynamic processes has been proven. These circumstances suggest the need to solve a scientific problem, which involves deriving analytical dependencies to evaluate the impact of nonlinear suspension characteristics on the dynamics of the hull and tracked contour of the tracked military vehicle (TMV). The goal is to predict resonance phenomena during operation over rough terrain. The calculated dependencies themselves, obtained based on a nonlinear mathematical model suitable for the dynamic process, can serve as the basis for solving an equally important problem: determining dynamic loads. Thus, it is possible to analyze the influence of the entire complex of suspension parameters of the TMV on the smoothness of the ride solely by analyzing the solution (exact or approximate) of a mathematical model adequate to the physical process.

Keywords: systems with concentrated masses, oscillatory systems, suspension systems, tracked military vehicles.

Introduction

Analytical methods for the study of nonlinear vibrations of a tracked military vehicle (TMV), which relate to the dynamics of the TMV as a mechanical system, imply:

first, the development of a refined mathematical model of process dynamics, accounting for the complex influence of longitudinal speed of the vehicle, suspension properties, suspension element layout, etc.;

second, the justified involvement of existing analytical methods for constructing and analyzing their solutions;

third, obtaining relatively simple dependencies that allow for a comprehensive analysis of the influence of a wide range of parameters on the process dynamics.

Derived functional dependencies based on a nonlinear mathematical model, which is adequate to the

dynamic process, are supposed to be the basis for solving an equally important problem: determining dynamic loads.

State of the art of the research

The main system that perceives and simultaneously protect the hull and equipment of the TVM from the action of external loads are suspension elements [1, 2].

Traditionally, theoretical studies on the influence of external loads on the work of the crew and the functioning of other units and assemblies have been carried out based on a linear model of the relationship between deformations and the restoring forces of the elastic element [3-7]. Only in some works it was emphasized [8-11] that such a suspension does not provide proper protection of the crew and equipment from the action of external factors. It is worth noting that

Article history: Income 08 September 2025; Revised 12 September 2025; Accepted 22 September 2025; Print 05 December 2025

Зиков В. Г. ORCID ID: 0009-0000-7917-5572, Ратошнюк В.В. ORCID ID: 0009-0002-6634-495X, Чаган Ю.А. ORCID ID: 0000-0001-7837-0528
Черняхівський І.В. ORCID ID: 0009-0005-7161-0724, Рижов Є.В. ORCID ID: 0000-0002-0132-3931

* Corresponding author Yrachagan@ukr.net

© Зиков В.Г., Ратошнюк В.В., Чаган Ю.А., Черняхівський І.В., Рижов Є.В.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

there is no suitable analytical approach (except for numerical and modeling) [12, 13] for the study of various types of suspension with a nonlinear relationship between the deformation and the restoring force on the body vibrations. The latter is due to the complexity of developing mathematical models adequate to the dynamic process. Therefore, the construction of mathematical models of the dynamics of the TVM accounting for the nonlinear elastic characteristics of the suspension and the development of an approximate analytical method for studying these models is in great demand from both theoretical and applied points of view.

The purpose of the paper is to analyze the methods for studying vibration processes during the operation of military tracked vehicles.

Results and discussions

Analytical methods for studying vibration processes have received a relatively complete methodology only for the so-called linear and quasi-linear mathematical models. However, the elastic characteristics of the suspension systems of military tracked vehicles (VGM) have a clearly expressed nonlinear relationship between the restoring force and deformation. In addition, the vibrations of the VGM are accompanied by external and internal friction forces, which have a complex nature (depend on the speed, material structure, etc.). Each of the above factors of the system determines its individual properties. Together, they are the reason that vibrations in nonlinear systems have a number of specific features:

- absence of the superposition principle;
- existence of a more complex relationship between the frequencies of natural and forced oscillations in the case of resonance;
- presence of the principle of single-frequency nonlinear oscillations in nonlinear systems with many degrees of freedom, etc.

The above-mentioned features of dynamic processes in nonlinear systems and the simultaneous absence of general exact analytical methods for integrating nonlinear differential equations that describe these processes require an individual approach to their study. It is necessary to dwell on some of them, which are most convenient for studying nonlinear oscillations of systems with concentrated masses, including TVMs.

One of the first mathematical methods used to study nonlinear oscillatory systems close to linear ones was the perturbation method. However, the perturbation theory in its initial interpretation made it possible to study the motion of bodies and mechanical systems only on a small time interval. This is due to the fact that when the motion is expanded by a small parameter in the case of a periodic force, the secular terms $t^m \sin(kt)$

and $t^m \cos(kt)$ appear in the solutions. As a result, the error of the obtained solution behaves as t^m .

At the same time, numerous systems do not allow, even in the first approximation, a linear approach to their consideration [14]. When studying oscillations in such systems, A. Poincaré [15] proposed a substitution of variables of the independent argument t , rewriting the equation to a form where the period of its solution appears to be constant. For the case when small perturbations of oscillatory systems are approximated by non-analytic functions, I.G. Malkin proposed a special method of using successive approximations [16]. However, the calculation schemes of the specified method appear to be too complex, such that they have not been widely used in solving practical problems.

Closely related to the method of A. Poincaré is the method of A. Lyapunov [17, 18], which has found wide practical application in the study of conservative oscillatory systems. An important role in the study of oscillatory processes of nonlinear systems plays the method of Van der Pol [19], which is quite effective in solving nonlinear problems of the theory of oscillations of systems with one degree of freedom. According to this method, the dynamic process of nonlinear systems can be described by the dependence similar to the linear case, with the only difference that, for the nonlinear case, the main oscillation parameters are slowly variable in time. The law of variation of the latter was expressed via relatively simple dependences, a system of first-order differential equations. However, this method was purely intuitive in nature since neither the author nor his followers presented any justification for it.

The generalization of the Van der Pol method for strongly nonlinear systems provides reasonable results in the study of nonlinear conservative systems regardless of the value of the parameter ε in cases where the elastic force increases monotonically. The specified method also allows one to estimate how close a nonlinear system is to a linear one. It should be noted that the basic idea of the Van der Pol method was used to study oscillations in nonlinear systems with concentrated masses [20, 21] and was also employed to systems with distributed parameters [22].

Another approach to the study of oscillatory processes of quasilinear systems, the motion of which is described by an autonomous system of differential equations, was proposed by G.V. Kamenkov.

$$\begin{aligned} \dot{x} + \lambda y &= \varepsilon f(x, y, \varepsilon), \\ \dot{y} - \lambda x &= \varepsilon g(x, y, \varepsilon) \end{aligned} \quad (1)$$

where x, y are the phase coordinates of the point's motion; λ is a constant; $f(x, y, \varepsilon)$, $g(x, y, \varepsilon)$ are analytical functions that describe the nonlinear forces acting on the point; ε is a small parameter.

The right-hand sides of the original equations (1) are polynomials of the phase coordinates x and y . It was shown that by some substitution of variables in (1) it is possible to obtain relatively simple relations that determine the main parameters of the oscillatory process.

The problem of applying the harmonic balance method in the study of established oscillatory processes of nonlinear systems, which are described by the perturbed equation (1), was considered in [23]. The method is justified on the basis of a comparative analysis with a known result at $\varepsilon \rightarrow 0$.

Oscillations of systems described by strongly nonlinear differential equations

$$\begin{aligned}\ddot{x} + \phi(\dot{x}) + kx &= 0, \\ \ddot{x} + \phi(\dot{x}, x) + \psi(x) &= 0, \\ \ddot{x} + f(x, \dot{x}) &= 0.\end{aligned}\quad (2)$$

were studied in [24], with x being the deviation of the point from the equilibrium position; $\phi(x)$ is the law of variation of the resistance force; $\psi(x)$ is the nonlinear restoring force; $f(x, \dot{x})$ is the analytical representation of the resistance force and the restoring force; k is a constant.

Under appropriate initial conditions and physically justified assumptions regarding the nonlinear characteristics of forces, i.e., the functions $\phi(\dot{x})$, $\psi(x)$, $\phi(x, \dot{x})$, $f(x, \dot{x})$ in the mentioned references:

it is shown that for the existence of oscillatory processes in the corresponding systems, the nonlinear functions should satisfy the conditions: $\psi(x) > 0$, $\phi(x) > 0$, $\phi(x, -x) = -\phi(x, x)$, $\psi(0) = 0$, $\phi(x, 0) = 0$ and be analytic;

the conditions for the existence of oscillations in the presence of positive energy dissipation in the system were obtained;

it was proven that for an arbitrary strongly nonlinear damping characteristic, the criterion for the existence of an oscillatory solution coincides with the same criterion for the corresponding linear system.

Nonlinear effects in dynamic systems, associated with the growth of loads, the action of mechanical forces of various nature on them, as well as the use of new structural materials with nonlinear characteristics, require the development of analytical methods for their study. Nonlinear effects of oscillatory systems are primarily manifested in the dependence of the oscillation period on the magnitude of its amplitude. Such systems, in particular, include mechanical systems with pneumatic, rubber and torsion elastic elements [25], etc.

The dynamic processes of the mentioned list of mechanical systems are described with sufficient accuracy by non-autonomous differential equations of the form [26]

$$\begin{aligned}\dot{y} + a_1 x^{v_1} &= \varepsilon f(x, y, \mu t, \varepsilon), \\ \dot{x} - a_2 y^{v_2} &= \varepsilon g(x, y, \mu t, \varepsilon)\end{aligned}\quad (3)$$

where x, y are the phase coordinates of the system motion; $\varepsilon f(x, y, \mu t, \varepsilon)$, $\varepsilon g(x, y, \mu t, \varepsilon)$ are nonlinear analytical functions that take into account the effect of dissipative and periodic forces on the system. Particular cases of the above equations are

$$\ddot{y} + a^2 y^v = \varepsilon f(y, \dot{y}, \mu t, \varepsilon) \quad (4)$$

$$\ddot{y} + a^2 \dot{y}^{1-v} y^v = \varepsilon f(y, \dot{y}, \mu t, \varepsilon) \quad (5)$$

In differential equations (3-5), the parameters v, v_1, v_2 should take odd values, i.e. $(2m_i + 1)(2n_i + 1)^{-1}$, $m_i, n_i = 0, 1, 2, \dots$, since only at such values of the nonlinearity parameters the elastic restoring force will be odd, i.e. symmetric with respect to the origin. We emphasize that the differential equation (5) also reflects with sufficient accuracy the process of viscoelastic impact of bodies and, depending on their shape and material, the parameter v in the mentioned equation varies within the limits of $0.5 < v < 1.3$ [27]. At the same time, the question of the influence of various types of force factors, in particular impulse forces, on the dynamic process of systems, the mathematical models of which are equations (3-5) under the condition of non-analyticity of its right-hand parts, remains open.

The most complete and accomplished structure for the study of nonlinear oscillatory systems with a small parameter was developed in [28], where the so-called Krylov-Bogolyubov-Mitropolsky asymptotic method is generalized to the case of non-autonomous systems and systems with many degrees of freedom.

Conclusions

Methods for analytical study of vibration processes have been developed to a sufficient extent for engineering practice, mostly for quasi-linear systems, i.e., systems whose nonlinear-elastic characteristics are close to linear, and the maximum values of resistance forces are small compared to the restoring force.

The increase in the operating speeds of TMV, and therefore the loads on individual nodes and structural elements, requires not only refined approaches to calculation models of real systems, but also the development of new models capable of realistically reflecting dynamic processes in these systems.

Thus, the development of a general methodology for studying vibration processes in mechanical systems with power nonlinearity (as well as those that are close to them) will become the basis for the design and modeling of the elements as well as systems with strongly nonlinear elastic characteristics.

Solving the problems highlighted in this paper will allow one to assess the influence of the entire complex of suspension parameters on the dynamics and stability of vibration processes and their impact on the operation of the crew and equipment, as well as to recommend specified characteristics of the suspension elements and their layout, which will be a subject of our research in progress.

References

1. Veretennikov A.I. and Paly A.V. (1999), Improvement of main battle tanks over the last decade. *Mechanics and mechanical engineering*. No. 2. pp. 155-162. [in Russian]
2. Volosnikov S.A. (2003), Analysis of torsion suspension structures of domestic and foreign tanks. *Bulletin of NTU "KHPY"*. Kharkiv. No. 28. pp. 19-23. [in Russian]
3. Dushchenko V.V. and Vorontsov S.N. (2002), To the question of choosing the characteristics of the reverse stroke of the damping device of the suspension of a tracked machine. *Mechanics and mechanical engineering*. Kharkiv. No. 1. pp. 90-92. [in Russian]
4. Alexander Fidler (2006), Nonlinear oscillations in mechanical engineering Birkhäuser. 358 p.
5. Pelicano F., Fregolent A., Bertizzi A. and Vestroni F. (2001), Primary parametric resonances of a power transmission belt: theoretical and experimental analysis. *Journal of sound and vibration*. Volume 224 (4). pp. 669-684.
6. Aleksandrov E.E., Lebedev A.T., Turenko A.N. etc. (2001), Dynamics of transport-traction wheeled and tracked machines. Kharkiv: Khnadu. 642 p. [in Russian]
7. Zhuk N.R. (2009), To the concepts of static and dynamic loads. *Proceedings of the VIII International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduate Students and Students*. Issue 5 (79). pp. 35-39. [in Russian]
8. Dushchenko V.V. and Yakymenko I.I. (2004), Mathematical modeling of oscillations of the sprung body of a multi-support wheeled machine. *Mechanics and mechanical engineering*. Kharkiv. No. 2. pp. 139-147. [in Russian]
9. Dushchenko V.V. (2007), Disadvantages, causes of their occurrence and contradictions in the development of known physical principles of action of damping devices of springing systems of military tracked and wheeled vehicles. *Mechanics and mechanical engineering*. Kharkiv. No. 1. pp. 113-123. [in Russian]
10. Kuzio I.V., Sokil B.I. and Palyukh V.M. (2007), The influence of suspension parameters on nonlinear vibrations of vehicles. *Dynamics, strength and design of machines and devices*. Lviv. No. 588. pp. 49-52. [in Ukrainian]
11. Pisarev V.P. and Gorbunov A.P. (2009), Possibilities for the layout of new elastic suspension elements, with progressive characteristics, within the existing design solution of the BTR-60. *Mechanics and Machine Building*. Kharkiv. No. 2. pp. 51-56. [in Ukrainian]
12. Dushchenko V.V. and Yakymenko I.I. (2005), Experimental assessment of the reliability of the mathematical model of the movement of a wheeled vehicle over bumps. *Bulletin of NTU "KHPY"*. Kharkiv. No. 37. pp. 93-100. [in Russian]
13. Epifanov V.V. (1986), Experimental studies of the amplitude-frequency characteristics of the transverse oscillating caterpillar circuit. *Dynamics and durability of machines*. Issue 43. pp. 130-132. [in Russian]
14. Kryukov B.I. (1984), Forced oscillations of essentially nonlinear systems. M.: Mashinostroenie. 216 p. [in Russian]
15. Proskuryakov A.P. (1977), The Poincaré method in the theory of nonlinear oscillations. M.: Nauka. 256 p. [in Russian]
16. Malkin I.H. (1956), Some problems of the theory of nonlinear oscillations. M.: Gostekhizdat. 492 p. [in Russian]
17. Belman R. (1954), Theory of stability of solutions of differential equations. M.: IL. 216 p. [in Russian]
18. Schmidt G. (1978), Parametric Oscillations. trans. from German V.M. Starzhinsky, under the editorship. M.Z. Lytvyn-Sedogo. Mir. 336 p. [in Russian]
19. Wan der Pol. (1920), A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations. *Radio Review*. № 1. pp. 3-31.
20. Sokil B.I. (1981), Asymptotic solution construction for a non-autonomous nonlinear system. *Bulletin of LP, Differential equations and their applications*. Lviv. No. 150. pp. 100-101. [in Russian]
21. Sokil B.I. (1983), On the asymptotic representation of the solution of one nonlinear system at resonance. *Ukrainian Mathematical Journal*. No. 3. pp. 390-392. [in Russian]
22. Sokil B.I. (1997), On the application of Ateb-functions for constructing solutions of some equations describing nonlinear oscillations of one-dimensional media. *Supplement to the NAS of Ukraine*. No. 1. pp. 55-58. [in Ukrainian]
23. Velichko L.D. and Chagan Y.A. (2011), Dynamics of tracked vehicles over rough terrain. *Forestry, forest, paper and woodworking industries*. Lviv. No. 21.4. pp. 346-352. [in Ukrainian]
24. Shteinberg T.S. (1960), Small-parameter methods for second-order differential equations with discontinuous terms. *IAN of the USSR. Dept. technical science, mech. and mechanical engineering*. No. 1. pp. 106-112. [in Russian]
25. Kuzio I.V., Sokil B.I. and Palyukh V.M. (2007), The influence of suspension parameters on nonlinear vibrations of vehicles. *Dynamics, strength and design of machines and devices*. Lviv. No. 588. pp. 49-52. [in Ukrainian]
26. Senyk P.M. and Sokil B.I. (1975), On the construction of an optimal quasilinear autonomous program-oscillating system. *Supplement to the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*. 1975. No. 11. pp. 1014-1017. [in Ukrainian]
27. Chelomey V.N. (1980), Reference book in 6 volumes. Vibrations in technology. under the editorship. M.: Mashinostroenie. 544 p. [in Russian]
28. Bogolyubov N.N. and Mitropolskyi Yu.A. (1974), Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. M.: Nauka. 504 p. [in Russian]

**ОСОБЛИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ СИСТЕМ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ МАСАМИ
ТА МЕТОДИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ**

В.Г. Зиков, В.В. Ратошнюк, Ю.А. Чаган, І.В. Черняхівський, Є.В. Рижов

Актуальним завданням є створення системи підресорювання, яка б могла забезпечити надійне функціонування інших систем машини та створити комфортабельні умови для роботи екіпажу. Як правило, дослідження функціонування систем підресорювання проводились за лінійної моделі зв'язку між деформацією та відновлювальною силою пружного елемента, що не повною мірою враховує всі чинники, які виникають під час руху пересіченою місцевістю. Розроблення наближеного аналітичного методу дослідження вказаних систем дасть змогу оцінити весь комплекс параметрів підвіски на динаміку та стійкість коливальних процесів. У цій роботі розглянуто аналітичні методи дослідження коливальних процесів систем із зосередженими масами та отримано умови їх існування. Визначено умови проявлення нелінійностей у коливальних процесах. Доведено необхідність уточнення підходів до розрахункових моделей існуючих систем та створення нових моделей, які б реально відображали динамічні процеси у цих системах. Отже, зазначені обставини вимагають вирішення актуального наукового завдання, сутність якого полягає в отриманні аналітичних залежностей, які дають змогу оцінити вплив нелінійних характеристик підвіски на динаміку корпусу та гусеничного обводу ВГМ для прогнозування появи резонансних явищ при русі пересіченою місцевістю. Самі ж отримані розрахункові залежності на базі адекватної динамічному процесу нелінійної математичної моделі можуть бути базою і для розв'язання не менш важливої задачі – визначення динамічних навантажень. Таким чином, провести аналіз впливу всього комплексу параметрів підвіски ВГМ на плавність ходу можна тільки на базі аналізу розв'язку (точного чи наближеного) адекватної фізичному процесу математичної моделі.

Ключові слова: аналітичні методи дослідження, коливальні системи, військові гусеничні машини.

UDC 621.396

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.13-19>

A. Zubkov, Y. Krasnik, S. Kamencev, R. Bubenshchykov*, V. Shchyhlo

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF DOMESTIC MISSILE COMPLEXES AND ARTILLERY SYSTEMS

The article analyses the current state and development prospects of domestic missile and artillery systems within the Missile Forces and Artillery of the Ukrainian Land Forces. It examines methodological principles for identifying avenues to improve armaments through a comparative analysis of principal tactical and technical requirements for effective combat employment, using the best domestic and foreign systems currently in service as benchmarks. The paper formulates key challenges to enhancing combat effectiveness, including measures to improve survivability, firing accuracy, and strike depth. Particular attention is paid to trends in the development of precision-guided munitions, including hypersonic missiles, and to the feasibility of their development in Ukraine. A comparative assessment of the combat capabilities of domestic and foreign missile systems, rocket artillery, self-propelled guns, and towed artillery is provided. The study finds that Ukrainian MLRS models "Vilkha-M" and "Bureviy", as well as the 2S22 "Bogdana" self-propelled gun, are comparable to or outperform the best foreign counterparts. Recommendations are presented for further development of missile and artillery weaponry, notably pursuing ranges up to 800 km and the indigenous development of hypersonic systems.

Keywords: missile system, rocket artillery, artillery system, hypersonic missile, combat effectiveness, tactical and technical requirements, mortar, artillery shell, target destruction.

Problem statement

In modern combat operations, missile complexes and artillery systems constitute the principal means of firepower for the Land Forces and are intended to destroy enemy targets in order to inflict decisive losses and prevent the enemy from accomplishing their objectives.

The methodological basis for determining the prospects for the development and improvement of domestic missile complexes and artillery systems is a comparative analysis of the main tactical and technical requirements that ensure the effective combat use of the best domestic and foreign models that have been adopted for service.

The problem of increasing the combat effectiveness of missile and artillery weapons in general terms includes the need to comply the following basic tactical and technical requirements [1-2]:

- ensuring the necessary survivability of missile and artillery weapons;
- ensuring maximum accuracy of firing (launching);
- increasing the maximum combat range.

Foreign and domestic experience in the development

of rocket and artillery weapons shows that the set of tactical and technical requirements formulated above can be optimally solved by a differentiated approach to the creation of missile systems, reactive artillery systems, self-propelled artillery installations, towed artillery models, and mortars. [1-2].

In the 21st century, the development of hypersonic missiles (HSM) has become a widespread phenomenon. At least, that is what their developers call them. One thing can be said with certainty: there is currently no hypersonic missile system (MS) that has been confirmed to meet all the criteria and is in service. Three countries are currently engaged in active large-scale development and testing: the US, China, and Russia. [3-5].

An analysis of the reference catalog of the main types of weapons and military equipment used by the opposing sides during the repulsion of the large-scale invasion of Ukraine by the Russian Federation and other sources [6-8] showed that the Missile Forces and Artillery of the Land Forces did not have missile systems equipped with hypersonic missiles. Currently, Ukraine is not developing hypersonic missiles.

Article history: Income 02 September 2025; Revised 05 September 2025; Accepted 18 September 2025; Print 05 December 2025

Зубков А.М. ORCID ID: 0000-0001-9013-8158, Красник Я.В. ORCID ID: 0000-0001-9872-3984

Каменцев С.Ю. ORCID ID: 0009-0000-9159-4470, Бубенщиков Р.В. ORCID ID: 0000-0001-6610-0360,

Щигло В.О. ORCID ID: 0009-0006-4052-1902

* Corresponding author flokee007@gmail.com

© Зубков А.М., Красник Я.В., Каменцев С.Ю., Бубенщиков Р.В., Щигло В.О.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Formulation of the article's objective

The purpose of this article is to justify the list of rocket and artillery weapons with the necessary basic tactical and technical characteristics required by the Missile Forces and Artillery of the Land Forces, based on an analysis of the effectiveness of the best examples of Ukrainian-made rocket and artillery weapons, those supplied to Ukraine as part of international assistance, and those in service with the Russian armed forces.

Presentation of the main material

An analysis of recent researches and publications [1-11] indicates that the main scientific and technical ways to improve domestic rocket and artillery weapons should be considered as follows:

- ensuring round-the-clock and all-weather combat readiness through the use of radar methods for searching, detecting, and identifying ground targets and guiding missiles and artillery shells toward them;
- use of high-precision methods for positioning missile (artillery) systems based on satellite (pseudo-satellite) navigation systems;
- restoring the production capacity of the domestic optoelectronic industry in terms of serial production of key components for search and targeting devices for missile (artillery) systems;
- restoration and improvement of the domestic range base for testing and testing high-precision missile and artillery weapons without limiting their combat range.

One of the key problems in mastering foreign models of missile and artillery systems provided by partner countries, and which has not been resolved previously, is the absence of a complete and adequate set of technical and operational documentation needed to realize the equipment's full combat potential, as well as shortcomings in training personnel in operational units and educational institutions. Addressing this issue will also help accelerate the adoption of NATO standards within Ukraine's defense industry.

An analysis of trends in the development of high-precision weapons shows the potential effectiveness of HSMs in combat. No work is being done in Ukraine to create HSMs. The development of hypersonic weapons is a technologically complex and expensive process. The manufacture of such weapons requires heat-resistant materials and powerful power plants. The payload capacity of HSM is significantly lower than that of ballistic or cruise missiles. Therefore, HSM have a smaller warhead.

The characteristics of the main hypersonic weapons, based on an analysis of recent publications [3, 4], are presented in Table. Hypersonic weapons may be divided into two classes: operational systems and potentially operational systems. [4]:

- hypersonic glider;
- hypersonic cruise missile.

The United States, China, and Russia are leaders in the field of hypersonic weapons [4]. Hypersonic systems will continue to become more sophisticated in the future.

Table

Characteristics of the main hypersonic weapons

Characteristics	Name				
	C-HGB	DF-ZF	Yu-71-71 (Yu-71-74) "Avangard"	3M22 (3K-22) "Zircon"	Kh-47M2 "Kinzhal"
Type of HSV (hypersonic vehicles)	HGV	HGV	HGV	HCM	HGBM
Country of manufacture	The US	PRC	rf	rf	rf
Possible carriers	LRHW launcher, destroyer class "Zumwalt", Virginia-class submarine	Medium-range BM DF-17	Intercontinental BM PC-18A	Frigates of the Gorshkov and Grigorievich classes, submarine of the Yasen class	MiG-31K fighter (Tu-22M3 bomber)
Flight path altitude, km	40...100	60	40...100	20...30	20
Maximum range, km	2 775	1 800...2 500	6 000	500...1 000	2 000 (3 000)*
Flight speed, Max	17	5...10	20	5...8	10

A comparative analysis of missile systems [2, 6, 8, 10] of the Armed Forces (AF) of Ukraine, missile systems received as part of international military material and technical assistance, and missile systems of Russian military formations in terms of maximum combat range is presented in Fig. 1.

The analysis of the presented materials allows us to conclude that:

- within a firing range of up to 500 km, the combat capabilities of the domestic "Sapsan" ("Hrim-2") missile

systems are on par with those of the Russian "Iskander" system;

- within a firing range of up to 300 km, the domestic Neptune missile system is practically equivalent to the Russian "Bal" system in terms of combat capabilities.;

- within a firing range of up to 120 km, the Soviet-designed "Tochka-U" missile system, which is in service with the Ukrainian Armed Forces, is equivalent to the RGM Harpoon (USA), except for the number of missiles on the launcher;

- It is advisable to accelerate work on increasing the firing range of domestic missile systems to 800 km, which is equal to the firing range of the russian “Bastion-P” system with P-800 Onyx missiles.

After conducting a comparative analysis of the depth of fire damage caused by rocket artillery [2, 6, 7, 11] of the Armed Forces of Ukraine and military formations of the russian federation, presented in Fig. 2, the following conclusion can be drawn:

- the domestic 300 mm calibre “Vilkha-M” complex exceeds foreign counterparts, including the russian

9K512 “Uragan-M” and 9K515 “Tornado-S”, in terms of maximum firing range (130 km);

- the domestic “Bureviy” complex exceeds the best Soviet-made 9K57 “Uragan” complex (35 km) in terms of maximum firing range (65 km);

- domestic complexes “Bastion-01”, “Bastion-02”, BM21U “Verba”, BM21UM “Berest” with a calibre of 122 mm and a maximum firing range (40 km) are equivalent to the russian 9K51M “Tornado-G” complex.

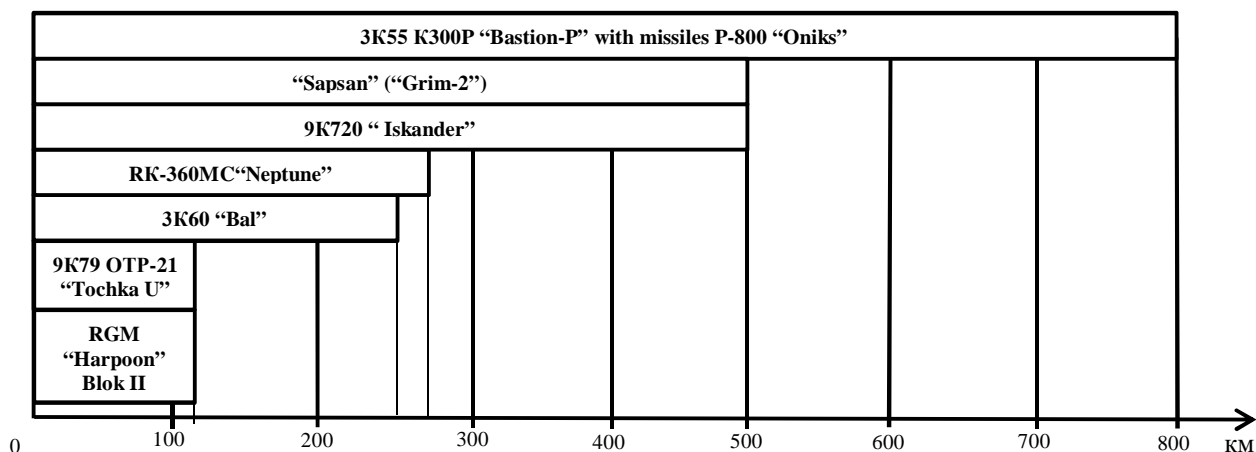


Fig. 1. The depth of fire damage caused by missile systems of the Armed Forces of Ukraine and military formations of the russian federation

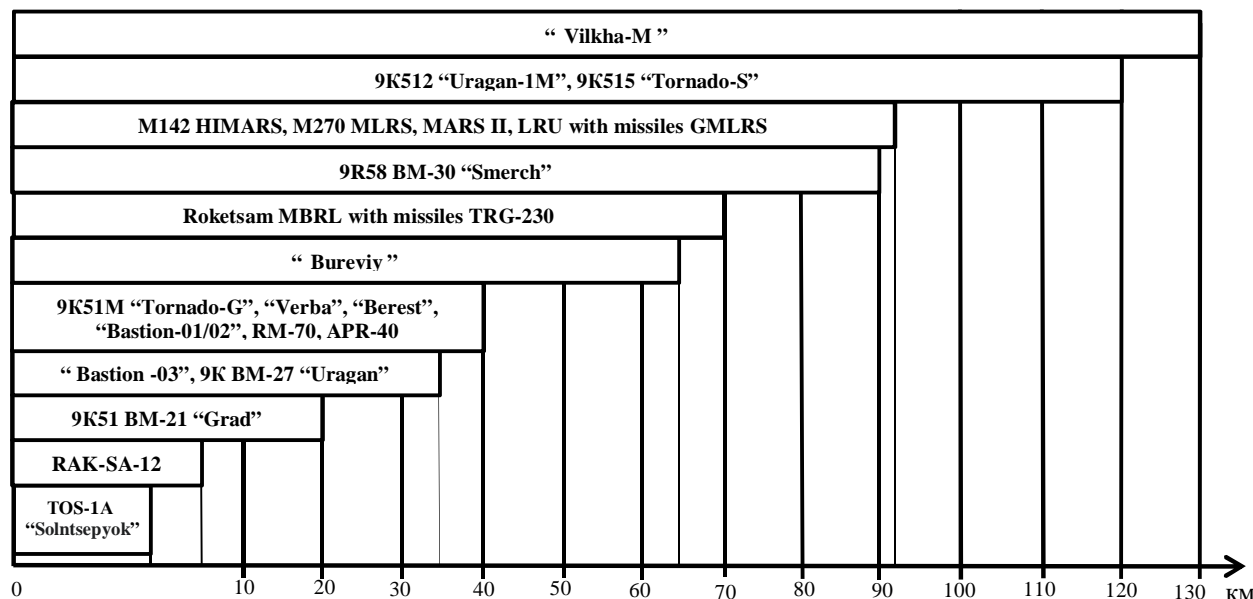


Fig. 2. The depth of fire damage caused by the rocket artillery of the Armed Forces of Ukraine and russian military formations

Analysing the depths of fire damage caused by self-propelled guns [2, 6, 8, 11], shown in Fig. 3, we can conclude that the 2S22 “Bogdana” self-propelled gun, in terms of its overall technical characteristics, is on a par with the world's best analogues, the “PzH 2000” (Germany), “Archer” (Sweden) and “CAESAR” (France)

with a calibre of 155 mm, and significantly exceeds the Soviet-made 152 mm calibre 2S5 “Giatsint-S” and 2S19 “Msta-S” self-propelled guns. An analysis of the depth of fire damage caused by towed artillery [2, 6] of the Armed Forces of Ukraine is provided in comparison with the best foreign models in Fig. 4.

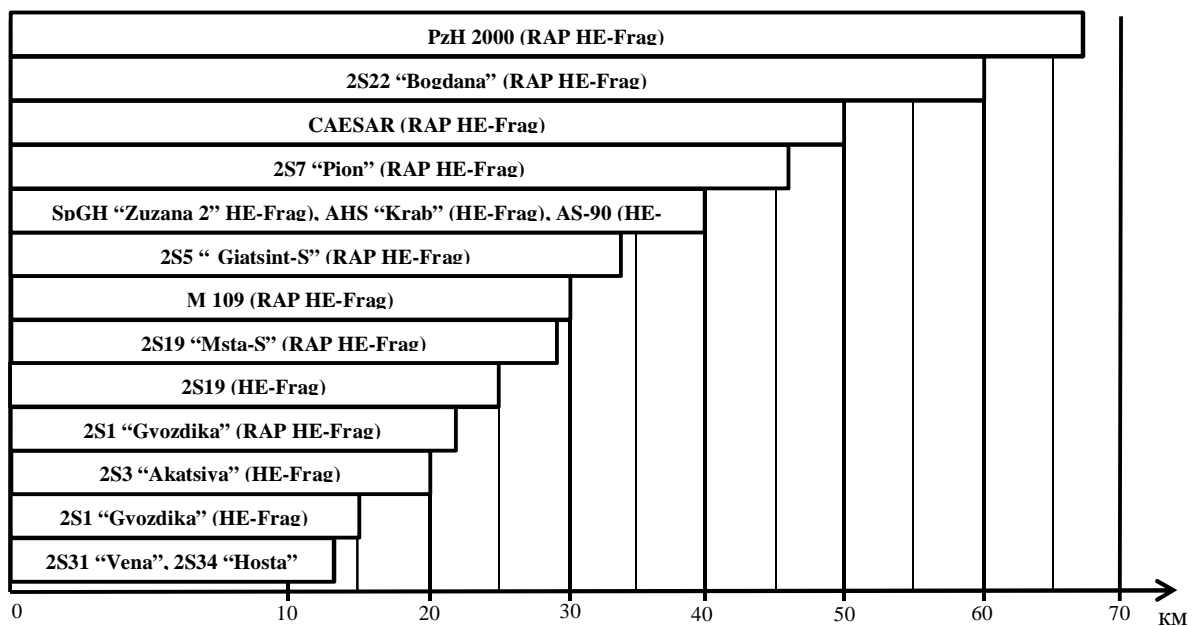


Fig. 3. The depth of fire damage caused by SPA system of the AF of Ukraine and Russian military formations

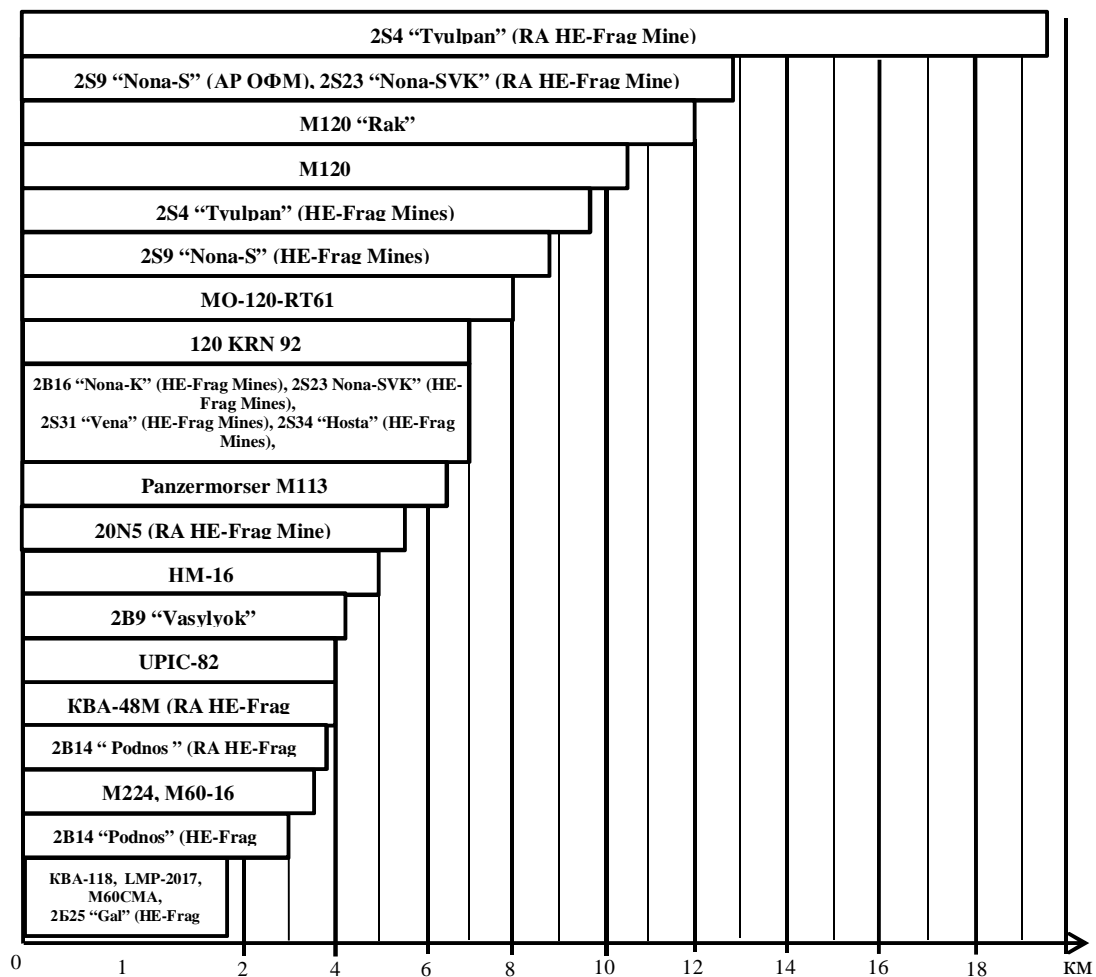


Fig. 4. The depth of fire damage caused by mortars of the AF of Ukraine and Russian military formations

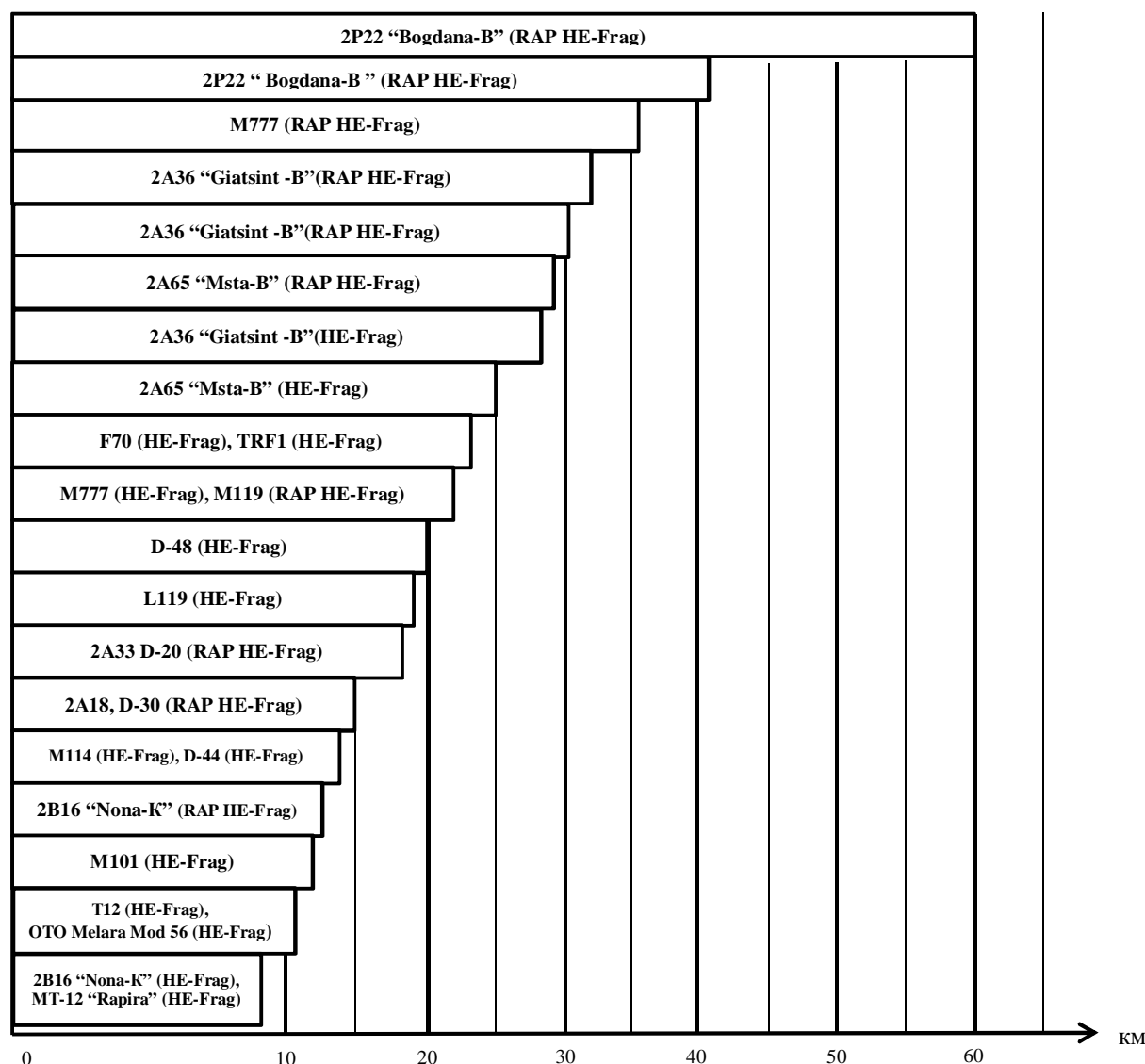


Fig. 5. The depth of fire damage caused by the towed artillery of the AF of Ukraine and russian military formations

The data presented allows us to conclude that:

- soviet-made towed artillery systems D-30, 2A65 "Msta-B", 2A36 "Giatsint-B" and others, which are in service with the Armed Forces of Ukraine and were manufactured in the 1960s-1980s, are morally and physically outdated and have exhausted their potential for modernisation;

- the combat experience in Ukraine of the M777 howitzer (Great Britain), created in 2005, provides grounds for its use as a base for performing fire tasks at dual firing ranges of up to 36 km. [7, 11]

An analysis of the tactical and technical characteristics of self-propelled and transportable mortars [2, 6] of the Armed Forces of Ukraine gives reason to conclude that self-propelled, transportable and hand-held mortars of domestic and soviet production (Fig. 5) sufficiently satisfy modern requirements for combat use.

In Ukraine, the main enterprises involved in the creation of high-precision rocket and artillery systems are "Luch" Design Bureau, the "Pivdenne" Design Office, "Progress", and the developers of component parts are Research and Production Complex "Photoprylad", Arsenal Factory, "Zirka", "Kramatorsk Heavy Machine Building Plant" and others.

Conclusions

1. An analysis was conducted of the full spectrum of missile and artillery systems in service with the Armed Forces of Ukraine, using maximum engagement range as the primary criterion, while accounting for their classification by operational-tactical level and comparing them with foreign analogues supplied to Ukraine as part of international military assistance, as well as with systems fielded by the russian federation's armed forces.

2. The Ukrainian “Sapsan” and “Hrim” missile systems are comparable in combat capabilities to the Russian 9K720 “Iskander” system, while the Ukrainian RK-360MC “Neptune” is broadly comparable to the Russian BRK “Bal” in overall combat effectiveness. Efforts by Ukrainian missile designers should concentrate on achieving the performance characteristics of the Russian K-300P “Bastion-P” system.

3. In the category of 300 mm calibre multiple launch rocket systems, the Ukrainian “Vilkha-M” complex surpasses the Russian 9K512 “Uragan-1M” complex, while in the category of 220 mm calibre MLRS, the Ukrainian “Bureviy” complex significantly surpasses the Soviet-made 9K57 “Uragan” complex. In the category of 122 mm calibre MLRS, the Ukrainian BM21U “Verba”, BM21UM “Berest”, “Bastion-01” and “Bastion-02” systems are equivalent in combat capabilities to the Russian 9K51 “Tornado-G” system.

4. In the self-propelled artillery category, the domestic 2S22 “Bogdana” is not inferior in its technical characteristics to the best world analogues PzH 2000 (Germany), “Archer” (Sweden), “CAESAR” (France) with a calibre of 155 mm, and significantly exceeds the soviet-made 2S19 “Msta-S” and 2S5 “Giatsint –S” self-propelled guns with a calibre of 152 mm.

5. The category of towed artillery guns in service with the Armed Forces of Ukraine includes the 2A65 “Msta-B”, 2A36 “Giatsint-B”, and D-30, which were developed in the 1960s and 1980s and are now morally and physically obsolete and have exhausted their potential for modernisation. At the same time, the operational experience gained during combat operations with the M777 (Great Britain) gun, created in 2005, is a convincing argument for using them as the basis for a firing range of up to 36 km, and the domestic 155 mm 2P22 “Bogdana-B” for firing at ranges up to 60 km.

6. The category of self-propelled and transportable mortars of domestic and soviet production includes the necessary range of products for performing the entire spectrum of combat tasks.

7. An analysis of trends in the development of high-precision weapons shows the potential effectiveness of combat use of HSMs. The creation of HSMs involves solving a number of scientific and manufacturing problems that are only accessible to countries with advanced scientific and technical capabilities. The results of combat operations during Russia's large-scale aggression against Ukraine show that for the Armed Forces of Ukraine, the creation (development and production) of highly effective HSM is of current importance and is a priority area for the development of military equipment at the present stage.

References

1. Humberto Gouveia and Ricardo Freitas. Innovations and trends in field artillery weapon systems. *Cogent Social Sciences*, 2024, Vol. 10. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2137.html?utm_source=chatgpt.com (Accessed 05 August 2025).
2. Ukraine ramps up defence production, prioritising artillery ammunition and long-range drones, *Defence Industry Europe*, 2024. URL: https://defence-industry.eu/ukraine-ramps-up-defence-production-prioritising-artillery-ammunition-and-long-range-drones/?utm_source=chatgpt.com (Accessed 23 August 2025).
3. Richard H. Speier, George Nacouzi, Carrie Lee and Richard M. Moore. Hypersonic Missile Nonproliferation: Hindering the Spread of a New Class of Weapons. RAND Corporation, RR-2137, 2017. RAND Corporation RR-2137, 2017. URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2137.html?utm_source=chatgpt.com (Accessed 18 August 2025).
4. Emmanuelle Maitre and Stephane Delory. Hypersonic missiles: Evolution or revolution for missile non-proliferation and arms control instruments. *HCOC Research Papers*, № 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.58248/PN696/> (Accessed 03 August 2025).
5. Krasnyk Ya.V., Yunda V.A., Siriy Yu.I. and Yunda D.V. (2025), “Hiperzvukova zbroia – osnovni poniattia, vyznachennia, istoriia stvorennia ta stan rozrobok” [Hypersonic Weapons – Basic Concepts, Definitions, History of Development and Current State of Research]. *Prospects for the Development of Armament and Military Equipment of the Ground Force: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*, Lviv. pp. 260.
6. Center for Military History Studies of the Armed Forces of Ukraine (2023), “Zbroia rosiisko-ukrainskoi viiny 2022–2023 rokiv. Dovidnyk-katalog osnovnykh zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki, yaki zastosovувалися protyborchymy storonamy pid chas vidsichi shyrokomasshtabnoho vtorhnnennia RF v Ukrainu” [Weapons of the Russian-Ukrainian War 2022–2023. Reference Catalog of Main Types of Weapons and Military Equipment Used by Opposing Sides during the Repulsion of the Large-Scale Invasion of the Russian Federation in Ukraine]. Kyiv, 243 p. [in Ukrainian].
7. Sampir O. and Dachkovskiy V. Analysis of the 155 mm howitzer M777 operation during its combat use by units of the Armed Force of Ukraine in the Russian-Ukraine war in 2022. *Social Development and Security*, 13(2), 31-40. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.4>
8. Zubkov A.M., Krasnyk Ya.V., Martynenko S.A. and Hodebskyi V.P. (2025), “Perspektyvy rozvytku ta udoskonalennia vitchyznianskykh vysokotochnykh raketnykh i artyleriyskykh kompleksiv” [Prospects for the Development and Improvement of Domestic High-Precision Rocket and Artillery Systems.]. *Prospects for the Development of Armament and Military Equipment of the Ground Force: Proceedings of the Scientific and Practical Conference*, Lviv. pp. 247.
9. Hrabchak V.I., Bondarenko S.V. and Bubenshchykov R.V. (2024), “Syla ta moment syly Magnusa. Yikh vplyv na dalnist strilby 155-mm snaryadiv” [Magnus Force and Torque. Their Influence on the Firing Range of 155-mm Shells.] *Collection of*

Scientific Papers of the National Academy of the National Guard of Ukraine. 2024. Sssue № 1(43). pp. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2024/1/43/307874> (Accessed 15 August 2025).

10. Marek Depczynski (2019), Renaissance of Russian high-power artillery. *Cientific Journal of the Military University of Land Forces*, Vol. 194, DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.6455> (Accessed 08 August 2025).

11. Zvonko A.A., Semiv H.O. and Mazii V.R. (2025), "Dosvid ekspluatatsii samokhidnoi artyleriiskoi ustanovky

2S22 "Bohdana" v rosiisko-ukrainskii viini" [Experience of Operating the 2S22 "Bohdana" Self-Propelled Artillery System in the russo-Ukrainian War]. *All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of the Department of Logistics Management of the Operational Faculty of the National Academy of the National Guard of Ukraine: Collection of Abstracts of the Scientific and Practical Conference*, Kharkiv. pp. 134–135.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ І АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ

А.М. Зубков, Я.В. Красник, С.Ю. Каменцев, Р.В. Бубенчиков, В.О. Щигло

У статті проведено аналіз стану та перспектив розвитку вітчизняних ракетних комплексів і артилерійських систем РВіА Сухопутних військ України. Розглянуто методологічні засади визначення напрямів удосконалення озброєння на основі порівняльного аналізу основних тактико-технічних вимог до ефективного бойового застосування кращих вітчизняних та закордонних зразків, що стоять на озброєнні. Сформульовано проблеми підвищення бойової ефективності, серед яких – забезпечення живучості, точності стрільби та збільшення глибини вогневого ураження. Особливу увагу приділено тенденціям розвитку високоточного озброєння, у тому числі гіперзвукових ракет, можливостям їх створення в Україні. Наведено порівняльний аналіз бойових можливостей вітчизняних і закордонних ракетних комплексів, систем реактивної артилерії, самохідних артилерійських установок і причіпної артилерії. Визначено, що українські зразки РСЗВ "Вільха-М" та "Буревій", а також САУ 2С22 "Богдана" відповідають або перевищують кращі закордонні аналоги. Сформульовано рекомендації щодо подальшого розвитку ракетного та артилерійського озброєння, зокрема досягнення дальності ураження до 800 км і створення власних зразків гіперзвукової зброї.

Ключові слова: ракетний комплекс, реактивна артилерія, артилерійська система, гіперзвукова ракета, бойова ефективність, тактико-технічні вимоги, міномет, артилерійський снаряд, ураження цілі.

UDC 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.20-26>

O. Korolova*, I. Milkovych

*Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv***DETERMINATION THE IMPACT OF PARTIAL METRIC IMPROVEMENT ON THE EVALUATION OF UNMANNED GROUND VEHICLE COMPLEX APPLICATION EFFECTIVENESS**

Unmanned Systems and Unmanned Ground Vehicles, in particular, have become a crucial element of modern combat operations during the war for Ukraine's independence against the Russian aggressor. A wide spectrum of tasks is assigned to them based on their designated roles: Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, strike (fire support), logistics, medical evacuation, etc.

This article provides an analysis of the most common types of multi-functional Unmanned Ground Vehicles in the Armed Forces of Ukraine, including those that are codified. It outlines the potential and limitations of Unmanned Ground Vehicles, based on an analysis of their Tactical and Technical Characteristics and combat capabilities derived from operational experience.

The key performance indicator for evaluating the combat effectiveness of a Unmanned Ground Vehicle unit is determined and substantiated. This performance indicator integrates aggregate metrics: Functionality/Combat Capabilities, Maneuverability, Survivability/Protection, Autonomy, and a list of partial components.

The influence of improving partial indicators on the Unmanned Ground Vehicles effectiveness assessment is determined using the system sensitivity analysis method.

The article presents an effectiveness evaluation of the designated tasks performed by a modernized combat Unmanned Ground Vehicles, with an illustrative example provided for clarity.

Keywords: *Unmanned Ground Vehicle, UGV, Monitoring, Reconnaissance, Detection, Situational Awareness Tool, Effectiveness Assessment, Sensitivity Analysis Method, Unit Employment.*

Problem Statement

Today, unmanned systems are being implemented across all domains and areas of application within the Armed Forces of Ukraine. According to the "Unmanned Systems" Doctrine, approved in August 2025 [1], the distribution of various types of Unmanned Ground Vehicles (UGVs) occurs across the majority of services (branches) and their subordinate units.

According to the Doctrine [1], an UGV is a complex (system) comprising vehicles, associated Ground Control Stations, command and control (C2) links, and other elements that ensure their functioning. There is rapid development and prototyping of new models by various manufacturers, necessitating standardization and a unified approach to the definition, classification, role, and place of UGVs among other forces and assets of the Armed Forces of Ukraine. The development of new and the improvement of existing doctrinal and regulatory

documents are ongoing, and algorithms for the codification of both domestic and foreign platforms have been introduced.

Unmanned Ground Vehicles of various designations are being developed today, but operational experience [2–4] suggests that they are most efficiently used predominantly for logistics, medical evacuation (MEDEVAC), and reconnaissance; while combat modules are utilized only in supportive/accompanying roles. It is necessary to refine specific technical specifications (specs), which requires identifying problematic issues. Currently, there is a range of technical and organizational challenges regarding the deployment of UGVs. Manufacturers and developers continue to refine and modernize their UGV models by improving specific system parameters. It is relevant to investigate how the modernization of a platform's individual characteristics impacts the overall UGV operational effectiveness assessment.

Article history: Income 30 September 2025; Revised 08 October 2025; Accepted 24 October 2025; Print 05 December 2025

Корольова О.В. ORCID ID: 0000-0002-9265-8445, Мількович І.Б. ORCID ID: 0000-0003-4478-9536

* Corresponding author ok_im2@ukr.net

© Корольова О.В., Мількович І.Б.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Analysis of Recent Research and Publications

Domestic military scientists and military experts from leading global nations employ various scientific approaches for evaluating the combat effectiveness of Armaments and Military Equipment models: analysis of Tactical and Technical Characteristics (TTCs); probabilistic (based on the probability of mission success); economic-mathematical (cost-effectiveness analysis); expert-analytical (assessment by a group of specialists in the absence of complete data); simulation-modeling (modeling combat scenarios with varied UGV parameters), etc. [5-10]. Article [11] presents methods for assessing the status of autonomous ground vehicles: perspectives on evaluation objects, key algorithms, and UGV characteristics.

This study selects a multi-criteria evaluation method based on a set of weighted indicators, and the quantitative (numerical) parameter for assessing the effectiveness of UGV models is defined as the Key Performance Indicator (KPI) for employment effectiveness, which is currently the most rational way to compare different types of combat platforms.

A thorough understanding of UGV employment challenges is necessary for a meaningful assessment of their effectiveness. A general overview of sources regarding the creation of ground platforms and their use in combat in Ukraine highlights the capabilities and limitations currently faced by UGVs.

Following the analysis of UGV employment effectiveness in combat based on the experience of the war in Ukraine [12-20], the general problems and weaknesses of UGV deployment can be summarized:

Tactical Effectiveness – whether the UGV achieves its assigned combat/operational tasks (reconnaissance, engagement, MEDEVAC, demining).

Personnel Safety/Force Protection – the extent to which UGVs reduce risk to personnel (the percentage of operations where UGVs replace a human in hazardous actions).

Payload Capacity and Protection – current platforms are still insufficient for heavy combat functions and protective armor.

Maneuverability – difficulty traversing complex terrain (craters, mud, dense foliage); lower effectiveness in urban warfare; impact of weather conditions.

Reliability / Availability – mean Time Between Failures in extreme conditions (dust, water, frost or heat, rough terrain degrade performance); failures; percentage of battlefield availability.

Mission Duration or Power Supply – average battery life (limited operation time-hours, sometimes less, under intensive tasks); logistical burden (charge/replacement); charging logistics.

Resistance to Countermeasures (EW, Cyberattacks) – probability of losing control under the effect of Electronic Warfare (EW) (interference in control, spoofing, and jamming leave UGVs vulnerable; requires autonomous modes and protected channels). This is one of the most critical threats.

Maintenance Logistics – time and resources for repair/replacement; need for spare parts; many systems are commercial off-the-shelf; complex field repair.

Cost / Cost-Effectiveness – the ratio of effect (saved human resources, accomplished tasks) to overall cost.

Risk of Capture and Enemy Use – technical information and sensors may be copied or used against friendly forces.

Cost and Scalability – large-scale procurement and sustainment require significant resources; concurrently, a need for tens/thousands of units for widespread application.

Thus, existing UGV models require technological enhancements and the elimination of identified deficiencies, leading to the necessity of validating the rationality of implemented modernization.

The Goal of the Article is to conduct a fundamental study on the influence of individual parameters on the overall effectiveness assessment of UGV employment to enhance the functions and capabilities of ground robotic systems.

Presentation of the Main Material

The capabilities of modern UGV designs demonstrate a wide scope for executing combat missions. Specific missions require improved characteristics for relevant partial parameters (e.g., cross-country mobility and autonomy for logistical platforms (fig. 1 *a*), power supply for MEDEVAC platforms (fig. 1 *b*), a high degree of protection for fire support (strike) UGVs (fig. 1 *c*), etc.). A preliminary review indicated that significant improvements are currently needed across a large number of TTCs for models of various types and roles, which requires an analysis of UGV employment experience against specific indicators. Therefore, the analysis of UGV employment effectiveness should also be conducted with consideration of structural and technical features.

A generalized comparative technical analysis of the main characteristics that influence UGV maneuverability and cross-country mobility shows that:

tracked platforms have a larger contact area, which reduces ground pressure and increases cross-country mobility on soft soil types (mud, snow); mass distribution, track width, and ground clearance are critically important here;

the track drive system is more prone to wear when moving on gravel and requires regular tensioning/section replacement;

the maintenance of a wheeled platform is simpler – in field repair, wheel replacement is faster than track repair;

speed and maneuverability in an Urbanized Area are higher for wheeled platforms – wheeled UGVs are typically faster and more maneuverable in narrow city streets, while tracked UGVs better overcome obstacles, ascents, and trenches.

The sensor and communication system is one of the primary limiting factors for UGV effectiveness (up to 30% of all operational failures); thus, manufacturers and developers are actively refining and improving the characteristics of the C2 infrastructure.

Kinematic and dynamic instability limit the effectiveness of UGVs on the battlefield in Ukraine. Kinematic instability is the unsteady position or trajectory of the UGV caused by features of the chassis design, mass distribution, or control inaccuracy. It manifests as: skidding and loss of trajectory; rocking when moving on uneven surfaces; instability during stopping or firing due to an unfavorable ratio of parameters: wheelbase / track / center of gravity / moment of inertia.

Dynamic instability is the loss of control or stability of the UGV under the influence of external or internal forces acting during movement, acceleration, or braking. It includes: hull oscillations; resonance during movement at certain speeds; oscillation of the gun or manipulator during movement or firing; rollover when overcoming obstacles or rapid changes in speed.

The design and technical solutions of various UGV manufacturers and developers improve the partial indicators of the models, but none accounts for all employment nuances. General recommendations for determining paths and directions for improvement include:

1. Technical problems can be solved by modernizing the design:

- platform unification;
- enhancement of armor protection;
- modernization of the power plant to reduce thermal and acoustic detection by the enemy;
- improvement of the running gear and, for example, the use of prospective hybrid bionic chassis.

2. Increasing autonomy and system intellectualization:

- integration of Artificial Intelligence;
- autonomous navigation;
- autonomy.

3. Improving communication means provision:

- Use of communications and control means with enhanced jamming resistance (wideband signal).

- communication redundancy;

- implementation of simultaneous multi-channel communication (radio, satellite, WiFi, 4G/5G);

- use of Mobile Ad-hoc Network (MANET) technology to build a communication system within a UGV group.

4. Expanding functionality:

- multi-functionality (replacing the combat module with a logistics module, etc.);

- increased execution of engineer tasks.

5. Organizational issues:

- centralized technical maintenance;

- refining the training of operators and technical personnel (improving training quality);

- scaling.

Thus, the effectiveness of UGV employment in the context of modern warfare demonstrates high potential but requires systematic improvement. Therefore, it is important to conduct a UGV employment effectiveness assessment and then investigate the impact of the implemented partial improvements on the effectiveness evaluation.



a



b



c

Fig. 1. Domestically produced UGV samples:

a – TerMIT (TENCORE); b – Ardal (BUREVII); c – Krampus (Brave1/Deviro)

It is known that, according to the chosen multi-criteria evaluation method with weighted coefficients, the effectiveness of an Armaments and Military Equipment model is determined by assessing its group criteria (evaluation criteria) and studying the impact of partial factors (sub-criteria) that characterize the system.

Therefore, the main influence indicators for assessing UGV operational effectiveness are defined as: *Functionality/ Combat Capability* (firepower, accuracy, compatibility, automation); *Maneuverability* (speed, cross-country mobility, range, maneuvers); *Survivability/ Protection* (armor, EW countermeasures, signature/

detectability) and *Autonomy* (power/energy, algorithms, communication).

This list and nomenclature of indicators are not constant and may change depending on the specific conditions under which priority thematic areas for scientific research are determined.

All group criteria represent interconnected constraints that define the UGV's combat readiness in the theater of operations. If one of these components fails to meet mission requirements, the platform's effectiveness falls exponentially, leading to equipment losses, mission failures, increased logistical burden, and the risk of capture/reverse-engineering. These criteria require detailed investigation to define UGV employment effectiveness evaluation criteria.

To ensure simplicity, clarity, and rapid results for assessing the effectiveness of combat UGVs, the Weighted Sum Method is proposed. This method is effective for prioritizing multiple options and allows for ranking options based on their importance or significance relative to defined indicators. The primary indicator for assessing the effectiveness of combat UGVs is defined as the Key Performance Indicator for Employment Effectiveness (KPI-EE) – a consolidated weighted indicator that summarizes several group criteria (combat, technical, operational) into a single numerical value, providing a quantitative assessment even for heterogeneous systems. Its purpose is the objective comparison of UGV employment effectiveness, considering their diversity and broad specialization, such as the degree of automation (remotely-operated, automated, robotic (autonomous) UGVs) or the type of UGV chassis (tracked, wheeled, special), etc.

Procedure for Calculating the Key Performance Indicator for Combat UGV Employment Effectiveness or KPI-EE – E_{tot} .

The UGV employment effectiveness is calculated using the relation (1)

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^N \omega_i E_i, \quad (1)$$

where:

E_i – normalized scores of the group criteria based on a defined experimental scale;

ω – weight coefficients of importance (determined by the expert assessment method), where $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$;

N – the number of group criteria.

The calculation of the weight coefficients for the combat UGV employment effectiveness indicators is performed using the *Pairwise Comparison Method*. This

is done according to standardized algorithms involving competent experts and is not described in this paper.

The *min-max* normalization method is used to allow for the comparison of qualitative values of sub-criteria within a group criterion that have different natures.

In case one or more sub-criterion values are improved (e.g., during model modernization), the *Sensitivity Analysis Method* is used to assess the impact of these improvements on the overall effectiveness indicator of the model.

The sensitivity analysis method allows for assessing the model's robustness against parameter changes and the interrelationship between models. It also helps identify the criteria that most significantly influence effectiveness – for instance, control range or survivability.

In comparative models, the sensitivity method shows how competition between models affects rankings. It accounts for the degradation of one model when another is improved. That is, increasing the indicator of one model (e.g., range or survivability) automatically reduces the relative score of the others.

The quantitative measure of the model's robustness (sensitivity) to changes is the *Sensitivity Coefficient* – E_{tot}^* , which indicates the relative change in the integrated index upon changing a specific criterion. The relation (2) is used to determine the *relative increase*, in percentage

$$E_{tot}^* = \frac{\Delta E^{Zr}}{E_{tot}^{Zr-old}} * 100. \quad (2)$$

where

ΔE^{Zr} – change in contribution, calculated as

$$\Delta E^{Zr} = E_{tot}^{Zr-new} - E_{tot}^{Zr-old};$$

E_{tot}^{Zr-old} – KPI-EE of the non-modernized model;

E_{tot}^{Zr-new} – new KPI-EE (calculated by the standard method using the new values of the improved sub-criteria, while others are fixed).

It is considered that in the case where $E_{tot}^* > 1$ – the system is highly sensitive (small changes have a strong impact). Conversely, in the case where $E_{tot}^* < 0$, a reverse effect is observed (e.g., improving one parameter causes a relative degradation of the overall index due to weight imbalance or normalization).

Example of Modernized UGV Effectiveness Assessment

To evaluate the impact of improving one or more UGV sub-criterion values on the overall effectiveness indicator E_{tot} of the model using the sensitivity analysis

method, the example tests two scenarios: improving one TTC indicator and improving two sub-criteria from different group indicators.

In the first scenario, the sub-criterion "Power/Energy" from the group criterion "Autonomy" is improved, while the second scenario improves "Accuracy" from the "Combat Capability" group criterion and "EW (Protection against EW influence)" from the "Survivability/Protection" group criterion.

The following weight coefficients of importance are defined for both scenarios: $\omega_C = 0,25$, $\omega_M = 0,35$, $\omega_P = 0,2$, $\omega_A = 0,2$.

The KPI-EE values for the old and new sub-criteria E_{tot}^{Zr-old} and E_{tot}^{Zr-new} (for one sub-criterion and for two, respectively) were calculated using the standard method, equation (1), with new values for the improved sub-criteria and others fixed. The relation

(2) is used to determine the Relative Increase E_{tot}^* , in percentage.

The results and intermediate values of the calculations performed for the UGV model before and after the modernization of specific indicators are presented in the table:

normalized indicators for old and new TTCs (E_{tot}^{Zr-old} , $E_{tot_1}^{Zr-new}$ and $E_{tot_2}^{Zr-new}$, for one and two sub-criteria improving);

values of the old and new KPI-EE – $E_{tot}^{Zr-old} = 4,7$, $E_{tot_1}^{Zr-new} = 4,83$ (for one sub-criterion), and $E_{tot_2}^{Zr-new} = 4,8$ (for two), respectively;

the value of the relative KPI-EE increase E_{tot}^* in conventional units (c.u.) and percentages (%) for one and two indicators, respectively.

Table

Effectiveness Assessment of a Modernized Model using Sensitivity Analysis

Indicators		Normalized indicators, rank		Relative Increase		Normalized indicators, rank		Relative Increase	
				c.u.	%			c.u.	%
Group Criterion	Sub-criterion	E_{tot}^{Zr-old}	$E_{tot_1}^{Zr-new}$	$E_{tot_1}^*$		$E_{tot_2}^{Zr-new}$	$E_{tot_2}^*$		
Functionality/Combat Capability, (C)	Firepower	6	6			6			
	Accuracy	6	6			7 (+1)	0,01	1,27	
	Compatibility	7	7			7			
	Automation	5	5			5			
Maneuverability, (M)	Speed	5	5			4 (-1)	-0,02	-1,78	
	Cross-country mobility	5	5			5			
	Operational Range	5	5			5			
	Maneuvers	4	4			4			
Survivability/Protection, (P)	Armor	2	2			3 (+1)	0,01	1,35	
	Signature/Detectability	3	3			3			
	EW (Protection against EW)	3	3			3			
Autonomy, (A)	Energy	5	7 (+2)	0,03	2,71	5			
	Algorithms	5	5			5			
	Communication	5	5			5			
KPI-EE, c.u.		4,70	4,83		2,71	4,80		0,85	

The analysis of the obtained data shows that for the defined weight coefficients of the chosen group criteria, upon improvement:

change in contribution for both tests $\Delta_{EA}^{Zr} = 0,13$

and $\Delta_{EB3}^{Zr} = 0,1$;

the sub-criterion "Power/Energy" from the group criterion "Autonomy" by 2 points results in a relative KPI-EE increase of $E_{tot_1}^* = 2,71$ %.

the sub-criteria "Accuracy" from the "Combat Capability" group criterion by 1 point and "Armor" from the "Survivability/Protection" group criterion by 1 point results in a relative KPI-EE increase of $E_{tot_2}^* = 0,85$ %, accounting for the loss of maneuverability due to the increased weight of the armor after modernization (speed reduced by 1 point).

The value of the relative KPI-EE increase indicates that the system is highly sensitive to changes.

The research results clearly demonstrate how the improvement of partial TTCs of a model can negatively affect the values of other indicators and the assessment of the overall UGV employment effectiveness indicator.

Future plans include conducting an analysis of the influence of modernized partial characteristics on the UGV employment effectiveness assessment in comparative models of competing platforms.

Conclusions

1. The analysis of sources regarding UGV employment experience in modern warfare reveals the high potential of contemporary designs, yet necessitates their systematic improvement. In this regard, studying the impact of implemented partial improvements on the UGV employment effectiveness assessment is relevant.

2. The example provided assessed the impact of improving one and several (two) UGV sub-criterion values on the overall effectiveness indicator E_{tot} of the model using the sensitivity analysis method. Two modernization options were tested. It was determined that, for the defined weight estimates of the selected group criteria, upon improvement:

the sub-criterion "Power/Energy" from the group criterion "Autonomy" by 2 points results in a relative KPI-EE increase of $E_{tot-1}^* = 2,71$ %, which indicates the system's high sensitivity to change.

the sub-criteria "Accuracy" from the "Combat Capability" group criterion by 1 point and "Armor" from the "Survivability/Protection" group criterion by 1 point results in a relative KPI-EE increase of $E_{tot-2}^* = 0,85$ %, accounting for the loss of maneuverability due to the increased weight of the armor after modernization.

3. The results of the conducted study clearly demonstrate that improving the partial TTCs of a model can negatively impact the values of other indicators and the assessment of the overall UGV employment effectiveness indicator.

References

1. (2025), "Doktryna «Bezpilotni systemy» OP 3.0 (46), zatverdzheno 14.08.2025" [Doctrine "Unmanned Systems" OP 3.0 (46), approved on 08/14/2025]. Command of the Unmanned Systems Forces. 34 p. [in Ukrainian]
2. (2024), "170 typiv bezpilotnykiv u ZSU – dosiahnennia i problema" [170 types of drones in the Armed Forces of Ukraine – achievements and problems]. NV.ua. 2024. July 10. URL: <https://nv.ua/ukr/amp/170-tipiv-bezpilotnykiv-u-zsu-ye-dosyagnenniyam-i-problemoyu-novini-ukrajini-50456906.html> [in Ukrainian]
3. (2025), The Russia-Ukraine Drone War: Innovation on the Frontlines and Beyond. May 28, 2025. URL: <https://www.csis.org/analysis/russia-ukraine-drone-war-innovation-frontlines-and-beyond>

4. (2025), Ukraine's Robot Army: The Rise of Unmanned Ground Vehicles in Modern Warfare. Sldinfo.com. 10/10/2025. URL: <https://sldinfo.com/2025/10/ukraines-robot-army-the-rise-of-unmanned-ground-vehicles-in-modern-warfare/>

5. (2025), Christian A. Andersson, Kasper Halme, Mia Laine, Ville Hulkko and Kai Virtanen. Effectiveness of an Expendable Unmanned Ground Vehicle Stalling a Mechanized Infantry Company's Primary Combat Units – A Virtual Simulation Experiment. *September Journal of Field Robotics*. Volume 42, Issue 4. Jun. Pages 1125 - 1142. <https://doi.org/10.1002/rob.22442>

6. (2023), Department of Defense (DoD). *System Analysis and Effectiveness Modelling for Combat Systems*. Washington: DoD Publications. 148 pages.

7. (2024), Methods of Evaluation and Modelling of Autonomous Ground Vehicles. IEEE Robotics and Automation Society. IEEE Access, 2024. Vol. 12. Pages 14560–14578.

8. Rusnak V.M., Khomenko Ye.V. and Lysi O.O. (2024), "Innovatsiyni pidkhid shchodo naukovo-tekhnichnoho suprovodu eksperymentalnykh doslidzhen robotyzovanykh kompleksiv" [Innovative approach to scientific and technical support of experimental research of robotic complexes]. *Journal of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment (SRITCAME)*. 2024. No. 2(58). Pages 45–53. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/396/367>

<https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.10> [in Ukrainian]

9. (1985), Thomas L. Saaty and Kevin P. Kearns. *Analytical Planning The Organization of System*. Book. 216 pages.

10. Pavlov A.A. and Lyshchuk E.Y. (2007), "Pryniatyte reshenyi na osnove metoda analiza yerarkhiy" [Making decisions based on the method of hierarchical analysis] *Bulletin of the National technical "KhPI" University: Collection of Scientific works Thematic Issue: System analysis, management and information technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2007 No. 41. Pp. 69-76. [in Ukrainian]

11. Xiaoyu Wang, Te Chen, Renzhong Wang, Jiankang Lu and Guowei Dou (2025), Review of State Estimation Methods for Autonomous Ground Vehicles: Perspectives on Estimation Objects, Vehicle Characteristics, and Key Algorithms. *Sensors*. No. 25 (13). 3927. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25133927>

12. (2025), "Informatsiyni biuleten z vyvchennia ta vprovadzhennia dosvidu: SVP 7-00(11)" [Information bulletin on the study and implementation of experience: SVP 7-00(11)]. *Department of the Study and Implementation of Experience of the Command of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine*. August 2025. Pages 73. [in Ukrainian]

13. (2025), "Bezpilotna revoliutsiia: svitovi ta ukraïnski tendentsii v rozvytku BPAK, NRK i REB" [Unmanned revolution: global and Ukrainian trends in the development of UAVs, NRCs and electronic warfare]. 09.06.2025. URL: https://btry.energy/post/bezpilotna-revolutsiya-svitovi-ta-ukraynski-tendentsiy-v-rozvytku-bpak-nrk-i-reb_b10c73b1?srlid=AfmBOor_dDanuTFzBja3_aOEK4YaXJ6-rh5ZfmTCmCPmQRfj2AIo6IBO [in Ukrainian]

14. Hambling D. (2024), Ukraine's Robot Ground Forces Are Growing Rapidly With UGVs Like TerMIT And TheMIS. *Forbes*. May 7 2024. Нью-Йорк: Forbes Media LLC. URL: <https://www.forbes.com/sites/davidhambling>

15. (2025), THeMIS Dorsel Boyer II, TRADOC Military Analyst. Ukraine's Uncrewed Air and Ground Systems Teaming Marks a Watershed Moment. June 18 2025. URL: <https://oe.tradoc.army.mil/product/ukraines-uncrewed-air-and-ground-systems-teaming-marks-a-watershed-moment/>
16. (2025), How Ukrainian TerMIT robotic system redefines battlefield logistics, August 1 2025. URL: <https://english.nv.ua/nation/what-ukraine-s-termit-robot-brings-to-the-front-line-50534002.html>
17. (2024), Unmanned Ground Vehicle. *Army-technology*. February 9 2024. URL: <https://www.army-technology.com/projects/themis-hybrid-unmanned-ground-vehicle/>
18. (2025), "Zvit z vyvchennia dosvidu zastosuvannia nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv Sylamy oborony

Ukrainy" [Report on the study of the experience of using ground robotic complexes by the Defense Forces of Ukraine]. Forces of unmanned systems, 2025. 60 pages. [in Ukrainian]

19. (2025), "Informatsiinyi biuleten z vyvchennia ta vprovadzhennia dosvidu: SVP 7-00(11)" [Information bulletin on the study and implementation of experience: SVP 7-00(11)]. Department of the Study and Implementation of Experience of the Land Forces Command of the Armed Forces of Ukraine. July 2025. Pages 96. [in Ukrainian]

20. Minaeian S., Liu J. and Son Y. (2016), Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.: Syst.* 46(7), pp. 1005–1016. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2015.2491878>

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОКРАЩЕННЯ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ НА ОЦІНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ

О.В. Корольова, І.Б. Мількович

У ході війни за незалежність України проти російського загарбника безпілотні системи, зокрема безекіпажні наземні комплекси, стали важливим елементом ведення бойових дій, на них покладається широкий спектр завдань, виходячи з їх призначення: розвідувальні, ударні (вогневі), логістичні, евакуаційні тощо.

У статті проаналізовано найбільш поширені у Збройних Силах України зразки багатофункціональних безекіпажних наземних комплексів різних типів, зокрема кодифікованих. З огляду на аналіз тактико-технічних характеристик і бойових можливостей за досвідом застосування окреслено потенціал та обмеження безекіпажних наземних комплексів.

Визначено й обґрунтовано показник оцінювання ефективності застосування підрозділу безекіпажних наземних комплексів, який включає групові показники: функціональність/бойові спроможності, маневреність, захищеність, автономність та перелік часткових складових.

Наведено визначення впливу покращення часткових показників на оцінку ефективності застосування безекіпажного наземного комплексу методом аналізу чутливості системи.

Проведено оцінювання ефективності виконання завдань за призначенням модернізованим бойовим безекіпажним наземним комплексом, для наочності наведено приклад.

Ключові слова: безекіпажний наземний комплекс, моніторинг, розвідка, виявлення, засіб ситуаційної обізнаності, оцінювання ефективності, метод аналізу чутливості, застосування підрозділу.

УДК 004.056.55

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.27-33>

В.В. Кузавков, А.О. Тлустий*

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут, Київ

ФОРМУВАННЯ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ ЗМІН СТРУМУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Однією з ключових складових забезпечення інформаційної безпеки (в тому числі у засобах зв'язку) є використання криптографічних методів, зокрема систем шифрування. Такі методи ґрунтуються на генерації та обробці криптографічних ключів.

Існуючий підхід до генерації ключів – закриття виробником вихідних даних, формує критичну залежність користувачів від постачальників, унеможливорює повноцінний науковий аудит застосованих алгоритмів, ускладнює забезпечення криптографічної стійкості в умовах кіберзагроз і геополітичної нестабільності.

Проведений аналіз наслідків комерціалізації криптографічних засобів виявив нерівномірність доступу користувачів до засобів захищеного зв'язку. Це, в свою чергу, створює загрози на рівні як локальних систем, так і національної безпеки.

Чи не єдиний шлях розв'язання цієї проблеми – створення власних методів генерації ключових послідовностей. Один із таких шляхів наведено в цій роботі. Авторами запропоновано інноваційний програмно-апаратний метод формування псевдовипадкових послідовностей (ПВП), який ґрунтується на використанні стохастичних змін струму, що виникають під час штатного функціонування радіоелектронних засобів (РЕЗ).

Доведено, що використання фізичних принципів (флуктуацій природного або техногенного походження) дозволяє генерувати унікальні, непередбачувані ключі з високою ентропією. Запропонований підхід легко інтегрується в наявні (або перспективні) апаратно-програмні комплекси. Впровадження запропонованого підходу дозволяє не лише зберегти значні кошти (що витрачалися на закупівлю комерційного програмного забезпечення), але і суттєво підвищити технологічний суверенітет та інформаційну безпеку держави.

Результати дослідження становлять інтерес для розробників криптографічних рішень, науковців у сфері безпеки інформаційних технологій, а також фахівців оборонно-промислового комплексу.

Ключові слова: безконтактний індукційний датчик, криптографія, одноразові маркери, програмно-апаратний метод, псевдовипадкові послідовності, рівномірність розподілу, стохастичні зміни струму, статистичні характеристики.

Постановка проблеми

На сьогодні найбільш поширеними є платні системи генерації ключів. Такі системи передбачають або пряме комерційне придбання ключів (наприклад, через сертифікованих постачальників або спеціалізовані програмні платформи), чи придбання доступу до програмного забезпечення, яке генерує ключі на основі певних пропріетарних алгоритмів [1]. Головною небезпекою при цьому є та обставина, що кінцеві користувачі (армії, що безпосередньо ведуть бойові дії)

застосовують однакові методи (організаційно-технічні підходи) при захисті інформації. Попри свою технічну ефективність комерціалізація породжує низку проблем як прикладного, так і фундаментального характеру. Все це унеможливорює або ускладнює широке впровадження криптографії в масштабах масових, державних або критично важливих комунікаційних систем [2].

Проблема існування та розповсюдження платних ключів шифрування полягає у формуванні критичної залежності суб'єктів інформаційної взаємодії від зовнішніх постачальників криптографічних залежностей є потенційно вразливою: будь-яке обмеження до ключів

Article history: Income 25 August 2025; Revised 05 September 2025; Accepted 15 September 2025; Print 05 December 2025

Кузавков В.В. ORCID ID: 0000-0002-0655-9759, Тлустий А.О. ORCID ID: 0000-0002-4777-9563

* Corresponding author andrii.tlustyi@viti.edu.ua

© Кузавков В.В., Тлустий А.О.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

(наприклад, санкційного або технічного характеру) може паралізувати або скомпрометувати захищений зв'язок [1]. Крім того, відкритий або латентний контроль постачальника над алгоритмами генерації ключів підвищує ризик стороннього доступу до інформації в захищеній мережі (у сферах, пов'язаних із державними, військовими або науково-технічними комунікаціями) [1, 2].

Комерціалізація ключової інфраструктури перешкоджає науковій відкритості та ускладнює аудит алгоритмів, які використовуються в системах шифрування [1, 12]. У багатьох випадках алгоритми шифрування в платних рішеннях не проходять належної рецензії в наукових спільнотах, оскільки захищені авторським правом або комерційною таємницею [2]. Отже, користувач не може перевірити, чи не містить використовуваний ним алгоритм прихованих вразливостей або недокументованих функцій [1].

З огляду на вищезазначене, актуальним напрямом наукових досліджень є розробка альтернативних методів генерації криптографічних ключів, які забезпечують необхідний рівень ентропії, стійкість до криптоаналізу та незалежність від зовнішніх постачальників [2, 3]. У цьому контексті особливу наукову і прикладну цінність мають підходи, що передбачають використання стохастичних змін фізичних параметрів електронних пристроїв, радіоелектронних сигналів або природних процесів для формування унікальних ключових послідовностей [3, 4].

Запропонований підхід має кілька суттєвих переваг:

- підхід може бути реалізований у вбудованих або програмно-апаратних рішеннях. Це дозволяє інтегрувати процес генерації ключів безпосередньо в засоби зв'язку [3,4].
- фізико-хімічні процеси в компонентах при нерівномірному використанні апаратних ресурсів мають шумоподібний характер, що робить їх перспективним джерелом випадковості;
- реалізація запропонованого підходу не потребує ліцензійних відрахувань.

Мета роботи – розробити програмно-апаратний метод формування ПВП на основі стохастичних змін струму РЕЗ, оцінити його придатність для застосування в системах криптографічного захисту (для генерації одноразових маркерів) та провести попередній аналіз рівномірності отриманої ПВП.

Запропонований метод реалізується за допомогою програмно-апаратного комплексу (без контактний індукційний датчик, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та спеціалізоване програмне забезпечення). Унікальність методу полягає в його неінвазивності та енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Псевдовипадкові послідовності широко застосовуються в криптографії для поточкових шифрів, генерації ключів та протоколів аутентифікації. Традиційні методи, такі як регістри зсуву з лінійним зворотним зв'язком (РЗЛЗЗ), забезпечують довгий період, але вразливі до атак, наприклад, алгоритму Берлекемпа-Мессі [5, 13]. Криптографічні генератори на основі AES у режимі CTR пропонують високу стійкість, але потребують значних обчислювальних ресурсів [6, 4]. Крім того, відомо, що досліджуються фізичні джерела випадковості для створення ПВП із високою ентропією (такі як тепловий шум або хаотичні зображення) [4, 10].

Стохастичні сигнали, отримані від апаратних компонентів, є перспективним джерелом випадковості, оскільки їхня природа обумовлена фізико-хімічними процесами, що відбуваються в компонентах РЕЗ під час функціонування. Дослідження показали, що шумоподібні сигнали від електронних систем можуть бути використані для криптографії [5, 11]. Програмно-апаратні методи, реалізовані на FPGA або мікроконтролерах, демонструють ефективність у вбудованих системах. Проте такі методи потребують ретельного аналізу статистичних властивостей ПВП.

Запропонований метод вирізняється використанням стохастичних змін струму РЕЗ як джерела випадковості та неінвазивним збором даних, що робить його унікальним у порівнянні з існуючими рішеннями.

Виклад основного матеріалу

Опис методу. Метод формування ПВП ґрунтується на врахуванні стохастичних змін струму, що виникають під час функціонування РЕЗ. Ці зміни спричинені:

- фізико-хімічними процесами в радіоелектронних компонентах, які призводять до незворотних змін їхніх параметрів;
- наявністю струму квазікороткого замикання в цифровій схемотехніці;
- нерівномірним використанням апаратних ресурсів у різних режимах роботи РЕЗ (очікування, холостий хід, номінальна або максимальна потужність).

Стохастичний характер змін струму робить їх перспективним джерелом випадковості. Метод запропоновано реалізувати за допомогою програмно-апаратного комплексу, до складу якого входять:

- безконтактний індукційний датчик; фіксує динамічні зміни струму без впливу на РЕЗ;
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП); перетворює аналоговий шумоподібний сигнал у цифрову форму;

- спеціалізоване програмне забезпечення; виконує обробку сигналу та генерацію бінарної ПБП.

Для перетворення шумоподібного сигналу у бінарну послідовність запропоновано використання трьох способів, які представлені у вигляді блок-схем.

Першим є спосіб порівняння вхідного аналогового сигналу з пороговим значенням. Алгоритм перетворення сигналу наведено на рис. 1.

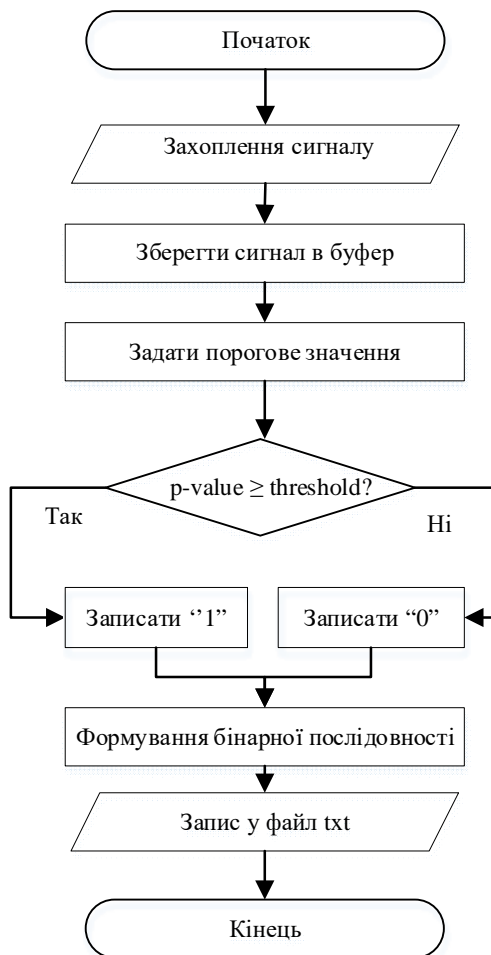


Рис. 1. Алгоритм перетворення вхідного сигналу у бінарну послідовність методом порогового порівняння

При цьому відбувається порівняння вхідного сигналу з пороговим рівнем. Якщо значення сигналу вище порогового рівня – формують сигнал (біт) логічної "1", нижче – "0". Слід зазначити, рівень порогового значення може бути фіксованим (нуль, середнє значення сигналу) або адаптивним.

Другий спосіб – виявлення перетину нуля (Zero-Crossing Detection). При цьому біт "1" формується при зміні знака вхідного сигналу (перетин рівня нуля з + на -, і "0", якщо вхідний сигнал змінюється з - на + (або навпаки).

Алгоритм функціонування програмної складової представлено на рис. 2.

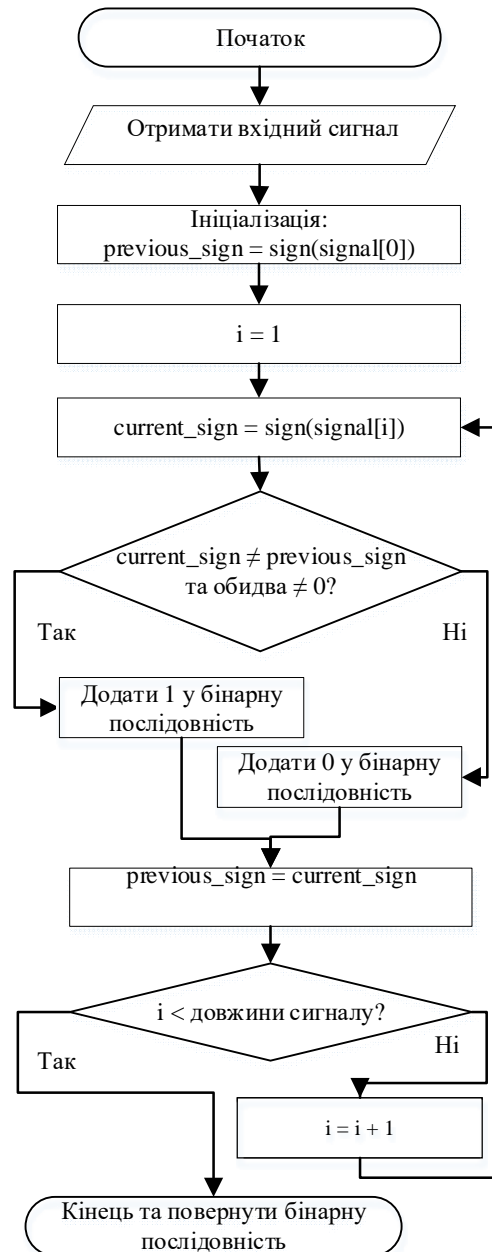


Рис. 2. Алгоритм перетворення сигналу у бінарну послідовність методом перетину нуля

Третій спосіб – аналіз швидкості зміни сигналу. Біти формуються на основі швидкості зміни амплітуди.

Якщо швидкість зростання перевищує поріг – генерується "1"; якщо швидкість спадання нижче порога – "0". Для проміжних значень використовується чергування 0 і 1.

Алгоритм перетворення сигналу у бінарну послідовність методом аналізу швидкості зміни значення рівня вхідного сигналу наведено на рис. 3.

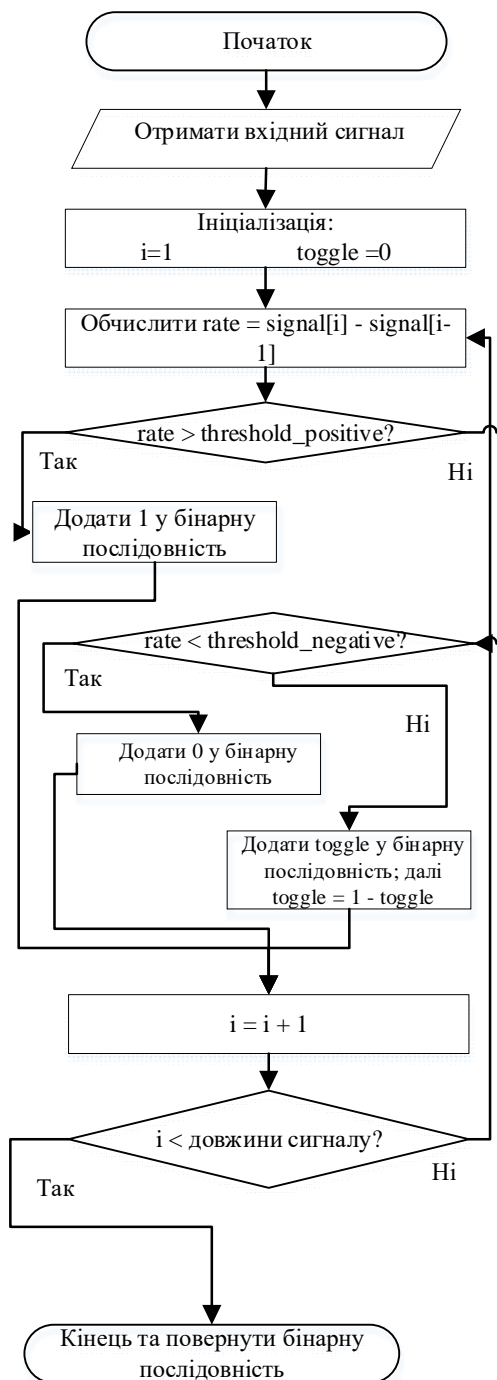


Рис. 3. Третій спосіб перетворення вхідного сигналу у бінарну послідовність методом швидкості зміни сигналу

Програмна реалізація будь-якого з наведених способів перетворення вхідного сигналу базується на бібліотеці Python sounddevice, яка дозволяє здійснити "захоплення" вхідного сигналу, його оцифрування та обробку (рис. 4). Оброблений сигнал (бінарна послідовність) зберігається в окремому файлі.

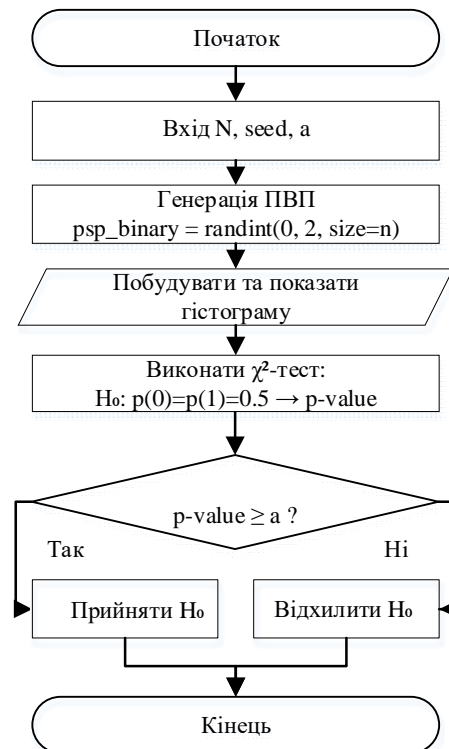


Рис. 4. Алгоритм перетворення сигналу у бінарну послідовність під час обробки сигналу

Методика оцінки властивостей ПВП

Для оцінки якості ПВП передбачено аналіз її статистичних властивостей, таких як:

- рівномірність розподілу ПВП (аналіз частоти появи 0 і 1 за допомогою гістограм і тест хи-квадрат для перевірки статистичної значущості рівномірності);
- автокореляція (обчислення автокореляційної функції для оцінки залежності між бітами);
- ентропія (використання формули Шеннона для оцінки інформаційної невизначеності);
- статистичні тести (планується застосування NIST Statistical Test Suite [6]).

Попередній аналіз зосереджено на рівномірності розподілу, що є однією з базових і водночас ключових властивостей криптографічних ПВП. Рівномірний розподіл гарантує відсутність систематичних зміщень у ймовірності появи нулів та одиниць, а відтак підвищує стійкість послідовності до статистичних атак. У цьому випадку досліджується бінарна ПВП довжиною 10^6 біт, сформована методом порівняння сигналу з пороговим значенням. Такий підхід дозволяє на практичному рівні оцінити відповідність послідовності рівномірному розподілу, а також створює основу для подальшого застосування формалізованих статистичних критеріїв – зокрема тесту хи-квадрат – для кількісної перевірки гіпотези про рівномірність появи символів [7].

Результати досліджень

Розроблено програмне забезпечення на Python для “захоплення” сигналу, обробки та генерації ПВП.

Для оцінки рівномірності використано модельну бінарну ПВП довжиною 10^6 біт, отриману методом порівняння з пороговим значенням. Гістограма розподілу показала частоту появи 0 і 1, що становлять 0.4997 і 0.5003 відповідно. Тест хи-квадрат дав $p\text{-value} = 0.78$, що підтверджує статистичну рівномірність (рис. 5).

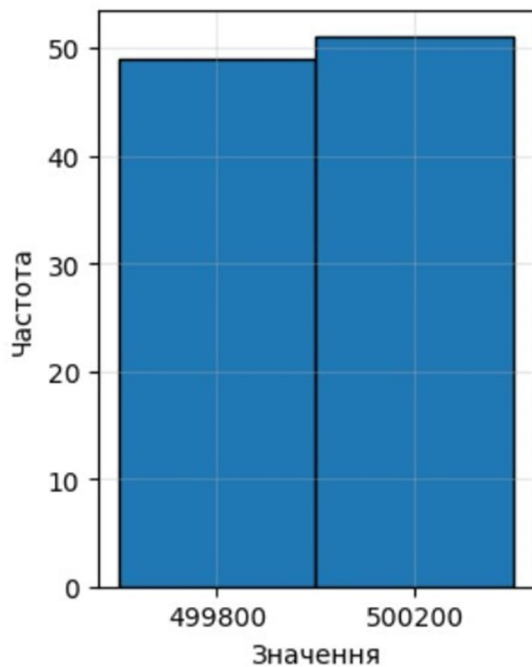


Рис. 5. Гістограма рівномірності ПВП

Порівняння з іншими методами

Порівняння з регістром зсуву з лінійним зворотним зв'язком показало, що запропонований метод має потенціал для створення ПВП із високою рівномірністю без складних апаратних модифікацій. Стохастичний характер вхідного сигналу підвищує криптографічну стійкість порівняно з РЗЛЗЗ, які вразливі до атак Берлекемпа-Мессі.

Криптографічне застосування

Запропонований метод розроблено з фокусом на генерацію одноразових маркерів (nonces) для протоколів аутентифікації в телекомунікаційних системах (наприклад, 5G, Wi-Fi). Nonces є унікальними послідовностями, які використовуються для запобігання атакам повторного відтворення. Переваги методу для цього застосування: енергоефективність, неінвазивність (відсутність потреби в модифікації РЕЗ), швидкодія (висока частота дискретизації забезпечує швидке створення ПВП).

Метод також має потенціал для розширення до інших застосувань, таких як потокові шифри або генерація ключів для симетричного шифрування.

Висновки

Розроблено програмно-апаратний метод формування ПВП на основі стохастичних змін струму РЕЗ. Метод використовує безконтактний індукційний датчик, АЦП та програмне забезпечення на Python із бібліотекою sounddevice. Реалізовано три способи обробки сигналу: порівняння з пороговим значенням, виявлення перетину нуля та аналіз швидкості зміни сигналу. Попередній аналіз модельної ПВП довжиною 10^6 біт показав рівномірність розподілу (частоти 0 і 1: 0.4997 і 0.5003, $p\text{-value} = 0.78$), що підтверджує її придатність для криптографії.

Переваги методу: енергоефективність, неінвазивність, гнучкість обробки сигналу. Він є перспективним для генерації одноразових маркерів у телекомунікаційних системах. Подальші дослідження включатимуть: тестування ПВП за допомогою NIST Statistical Test Suite, експериментальну апробацію на реальних зразках РЕЗ, оптимізацію апаратної реалізації для підвищення швидкості.

Перспективи подальшого розвитку цього напрямку полягають у впровадженні методів у системи шифрування та аутентифікації, де ПВП можуть використовуватися для створення одноразових маркерів (nonces), генерації ключів у потокових шифрах та підвищення стійкості до криптоаналізу. Крім того, вони мають практичну цінність у системах військового зв'язку, де можуть забезпечувати синхронізацію сигналів між радіостанціями, підвищувати завадостійкість за рахунок розширення спектра та захищати канали управління від несанкціонованого доступу.

Подальші дослідження доцільно зосередити на тестуванні ПВП із використанням міжнародних стандартів (зокрема, пакета NIST STS), оптимізації програмно-апаратної реалізації для роботи в польових умовах та інтеграції з сучасними засобами криптографічного захисту.

Список літератури

1. Істлейк, Д., Шиллер, Дж. Профіль сертифікатів та списків відкликання X.509 інфраструктури відкритих ключів (PKI). IETF. RFC 5280, 2005. 137 с.
2. Шнайер Б. Прикладна криптографія: протоколи, алгоритми та вихідний код мовою C / пер. з англ. К. : ДіаСофт, 2002. 816 с.
3. Юй, С., Лю, Ю., Лу, С. A Physical Unclonable Function Based on Ambient Noise for Key Generation / S. Yu, Y. Liu, X. Lu. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. pp. 67721–67730. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078311>
4. Khovratovich D., Rechberger C. Advances in Cryptanalysis of Proprietary Encryption Algorithms. In *Lecture Notes in Computer Science*. Springer. 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44381-1_5
5. Kocarev L. Chaos-based cryptography: A brief overview. *IEEE Circuits and Systems Magazine*. 2001. Т. 1, № 3. С. 6–21.

6. Rukhin A. та ін. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. NIST Special Publication 800-22, 2010. 131 с.

7. Поперешняк С. В. Засіб для тестування бітової послідовності на випадковість. *Інженерія програмного забезпечення*. 2020. № 9 (2). DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/16>

8. Golub J. D. Cryptographic applications of noise-like signals. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. Т. 52, № 3. С. 1123–1135.

9. National Institute of Standards and Technology. NIST SP 800-22. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications [Електронний ресурс]. April 2000. Режим доступу: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/SP800-22rev1a.pdf>

10. Thomas D. B., Luk W. High quality uniform random number generation using LUT optimised state machines. *Field Programmable Logic and Applications*. 2008. С. 77–84.

11. Kim Y., Yeom Y. Accelerated implementation for testing IID assumption of NIST SP 800-90B using GPU. *PeerJ Computer Science*. 2021. Т. 7. e404. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.404>

12. Менезес А. Дж., ван Ооршот П. С., Ванстоун С. А. Довідник із прикладної криптографії / пер. з англ. К.: Видавнича група BHV, 2003. 816 с.

13. Berlekamp E. R. Algebraic coding theory. New York : McGraw-Hill, 1968. 474 с.

14. National Institute of Standards and Technology. SP 800-90A: Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators (NIST SP 800-90A), 2010. 138 с.

References

1. Istleik D. and Shiller Dzh. (2005), "Інфраструктура відкритих ключів (X.509): сертифікати та списки відкликання" [Public-Key Infrastructure (X.509) Certificate and CRL Profile]. RFC 5280. IETF. 137 p. [In Ukrainian]

2. Schneier B. (2002), "Прикладна криптографія: протоколи, алгоритми та вихідні коди мовою C : перекл. з англ." [Applied cryptography: Protocols, algorithms, and source code in C : Trans. from Eng.]. Kyiv: DiaSoft. [In Ukrainian].

3. Yu S., Liu Y., and Lu X. (2021), A physical unclonable function based on ambient noise for key generation.

IEEE Access, Vol. 9, pp. 67721–67730. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078311>

4. Khovratovich D., and Rechberger C. (2014), Advances in cryptanalysis of proprietary encryption algorithms. In *Lecture Notes in Computer Science*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44381-1_5

5. Kocarev L. (2001), Chaos-based cryptography: A brief overview. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol. 1, No. 3. pp. 6–21. <https://doi.org/10.1109/7384.963463>

6. Rukhin A., et al. (2010), A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications (NIST SP 800-22). Gaithersburg, MD: NIST. 131 p.

7. Poperehniak S. V. (2020), "Засіб для тестування бітової послідовності на випадковість" [A tool for testing bit sequences for randomness]. *Інженерія програмного забезпечення – Software Engineering*. Vol. 9. No. 2. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/16> [In Ukrainian].

8. Golub J. D. (2006), Cryptographic applications of noise-like signals. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52. No. 3. pp. 1123–1135.

<https://doi.org/10.1109/TIT.2005.864420>

9. National Institute of Standards and Technology. (2000), A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications (SP 800-22 Rev. 1a). April 2000. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/SP800-22rev1a.pdf>

10. Thomas D. B. and Luk W. (2008), High quality uniform random number generation using LUT optimised state machines. In *Proceedings of the International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. pp. 77–84. <https://doi.org/10.1109/FPL.2008.4629904>

11. Kim Y., and Yeom Y. (2021), Accelerated implementation for testing IID assumption of NIST SP 800-90B using GPU. *PeerJ Computer Science*, Vol. 7, e404. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.404>

12. Menezes A. J., van Oorschot P. S. and Vanstone S. A. (2003), "Довідник із прикладної криптографії : перекл. з англ." [Handbook of applied cryptography : Trans. from Eng.]. Kyiv: Publishing group BHV. [In Ukrainian].

13. Berlekamp E. R. (1968), Algebraic coding theory. New York: McGraw-Hill. 474 p.

14. National Institute of Standards and Technology. (2010), Recommendation for random number generation using deterministic random bit generators (NIST SP 800-90A). Gaithersburg, MD: NIST. 138 p.

GENERATION OF PSEUDORANDOM SEQUENCES BASED ON STOCHASTIC VARIATIONS IN THE CURRENT OF RADIOELECTRONIC DEVICES

V. Kuzavkov, A. Tlustiy

One of the key components of ensuring information security (including in communication systems) is the use of cryptographic methods, particularly encryption systems. Such methods are based on the generation and processing of cryptographic keys.

The prevailing approach to key generation – proprietary encapsulation of initial data by the manufacturer – creates a critical dependency of users on vendors. This dependency prevents a comprehensive scientific audit of the implemented algorithms and complicates the assurance of cryptographic robustness under cyber threats and geopolitical instability.

An in-depth analysis of the implications of cryptographic tool commercialization reveals significant disparities in users' access to secure communication technologies. This situation poses threats not only to individual systems but also to national security at large.

A potentially singular solution to this problem lies in the development of proprietary key sequence generation methods. One such method is proposed in this study. The authors introduce an innovative software-hardware technique for generating pseudorandom sequences (PRS), which is based on the stochastic current fluctuations that naturally occur during the normal operation of radio-electronic equipment (REE).

It is demonstrated that leveraging physical principles – specifically, fluctuations of natural or technogenic origin – enables the generation of unique and unpredictable keys with high entropy. The proposed approach can be seamlessly integrated into existing or future software-hardware systems. Its implementation not only results in substantial cost savings (by eliminating the need for acquiring closed-source cryptographic software) but also significantly enhances technological sovereignty and the overall information security posture of the state.

The results of this research are of particular interest to developers of cryptographic solutions, researchers in the field of information security, and professionals within the defense-industrial sector.

Keywords: *pseudorandom sequences, cryptography, stochastic current variations, contactless inductive sensor, hardware-software method, statistical characteristics, one-time markers, uniformity.*

УДК 623.4+519.852

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.34-48>О. Макогон^{1*}, М. Пелехатий¹, Ю. Красношапка¹, С. Киричик¹, І. Мащенко¹, В. Кривцун²,
Я. Міщенко²¹Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Харків²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТАНКО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАНКОВОГО БАТАЛЬЙОНУ В УМОВАХ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

В умовах ведення бойових дій надійність технічного забезпечення танкового (механізованого) батальйону є однією з необхідних складових, що дозволяє підтримувати важку техніку у робочому стані. У статті розглядається система танко-технічного забезпечення танкового (механізованого) батальйону як підсистема логістичного забезпечення, що сама по собі є складною структурою, яка забезпечує бойову готовність техніки у сучасних умовах ведення бойових дій. Аналіз функціонування цієї системи показав, що вона потребує чіткої організації та оцінки надійності для подолання ризиків, що виникають в умовах війни. Як варіант управління процесом функціонування система танко-технічного забезпечення танкового (механізованого) батальйону пропонується використати контролінг, який дозволяє виявляти слабкі місця, такі як затримки в постачанні чи збільшення часу відновлення техніки, за допомогою статистичних методів.

Процес танко-технічного забезпечення танкового (механізованого) батальйону розглядається з використанням моделі теорії масового обслуговування. Це дозволило скласти граф станів системи та вивести аналітичні залежності коефіцієнта відновлення, коефіцієнта живучості системи танко-технічного забезпечення від часу переходу її зі стану в стан; шляхом розв'язання оптимізаційної задачі дослідити показники надійності у системі логістичного забезпечення танкового (механізованого) батальйону у визначених умовах ведення бойових дій, зробити відповідні висновки та надати рекомендації.

Реалізація рекомендацій, отриманих на основі проведених розрахунків, потребує інвестицій, навчання та координації з вищими ланками, але їх практична цінність підтверджується кількісними розрахунками.

Ключові слова: технічне забезпечення, танко-технічне забезпечення, ефективність логістичного забезпечення, ланцюг Маркова, динамічна модель, показники надійності, коефіцієнт відновлення.

Постановка проблеми

У сучасних умовах ведення бойових дій, особливо з урахуванням досвіду війни РФ проти України, питання надійності логістичного забезпечення (ЛЗ) набуває критичного значення для збереження боєздатності підрозділів. Танкові та механізовані підрозділи залишаються потужною ударною силою Сухопутних військ і потребують безперебійного постачання

боєприпасами, паливом, запасними частинами, а також якісного технічного обслуговування та ремонту. Розглянемо систему функціонування технічного забезпечення в танковому батальйоні. Відповідно до [1, 2] для підтримання ОБТ готовності до застосування в цих підрозділах основним видом логістичного забезпечення є танко-технічне забезпечення (ТТЗ), на яке покладається виконання функції забезпечення підрозділу ОБТ, їх технічне обслуговування та ремонт.

Article history: Income 25 September 2025; Revised 01 October 2025; Accepted 20 October 2025; Print 05 December 2025

Макогон О.А. ORCID ID: 0000-0003-1112-8707, Пелехатий М.А. ORCID ID: 0009-0006-8162-9506,
Красношапка Ю.В. ORCID ID: 0000-0001-9234-4844, Киричик С.М. ORCID ID: 0009-0008-8717-1393,
Мащенко І.А. ORCID ID: 0009-0006-9825-3437, Кривцун В.І. ORCID ID: 0000-0002-3907-5320,
Міщенко Я.С. ORCID ID: 0000-0002-0231-2361

* Corresponding author helmkg@ukr.net

Однак складні умови бойової обстановки, маневрений характер операцій, вогневий вплив противника та порушення логістичних шляхів часто призводять до зниження надійності ТТЗ. У таких умовах важливо дослідити та кількісно оцінити показники надійності елементів ТТЗ, виявити критичні вузли та розробити рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування цієї системи.

Таким чином, дослідження показників надійності танко-технічного забезпечення підрозділів є актуальним завданням і має практичне значення для готовності ОВТ до застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Достатньо велика кількість праць щодо удосконалення функціонування системи логістичного (технічного) забезпечення військ (сил), зокрема і ТТЗ, в умовах ведення бойових дій свідчить про актуальність цієї проблематики. Так питаннями організації та удосконалення системи логістичного (технічного) забезпечення ЗСУ досліджувала низка науковців, зокрема: Старцев В.В., Коломійцев О.В., Гурін О.М., Третьак В.Ф., Пустоваров В.В., Олійник Р.М., Павловський І.В., Твердохлібов В.В., Башкиров О.М. тощо.

У роботах [3, 4] наведена характеристика системи логістичного забезпечення військ (сил), але визначено лише вплив зовнішніх та внутрішніх умов і чинників. Крім того, проведений аналіз чинників, що пов'язані з вірогідністю ураження об'єктів логістики, і тих, що безпосередньо впливають на рівень живучості логістичного об'єкта.

У роботі [5] автори розглядають питання раціонального використання сил і засобів логістичного забезпечення Повітряних Сил ЗСУ під час технічного обслуговування та ремонту льотної техніки.

У роботі [6], за принципом функціонування логістичної складової військових формувань НАТО, акцент робиться на використанні універсальних мобільних комплексів логістичного забезпечення. У [7] пропонується загальна система обліку і контролю за матеріальними потоками, об'єктами і засобами ОВСТ, але не розглядається питання підвищення показників надійності функціонування ремонтно-відновлювальної складової логістичного забезпечення підрозділів тактичної ланки.

Крім того, у [8] проаналізовані математичні складові факторів, що впливають на надійність ЛЗ, для визначення шляхів нейтралізації та послаблення їх негативного впливу. Встановлено, що суттєвий вплив на послаблення наведених факторів та підвищення живучості об'єктів логістики мають такі заходи,

як створення хибних об'єктів ЛЗ, зокрема і для ремонту та відновлення ОВСТ. Обґрунтовані суб'єктивні показники, які необхідно змінювати для підвищення рівня живучості.

У [9] авторами розроблено рекомендації щодо ліквідації збоїв у процесі управління логістичним забезпеченням (ЛЗ) в умовах ведення БД. Механізм послідовного виконання окремих операцій за рекомендованим варіантом дозволяє отримати інформацію про внутрішнє та зовнішнє середовище, чітко усвідомлювати положення, в якому перебуває система, вибрати і практично реалізувати рішення, адекватне до ситуацій, що виникають. Реалізація запропонованих рекомендацій щодо підвищення ефективності управління відновленням зразків ОВТ, зокрема, і системи ЛЗ в цілому в умовах ведення БД дозволяє контролювати ситуацію, оперативно реагувати на дестабілізаційні впливи, підвищувати оперативність управління, а також забезпечувати ефективну організацію процесу управління відновленням військової техніки. Одночасно запропоновані методики визначення можливостей окремих функціональних елементів системи ЛЗ, зокрема з технічної розвідки пошкоджених зразків озброєння та військової техніки в ході ведення бойових дій.

У роботах [10, 11] досить змістовно розглянуті питання оцінювання показників надійності системи ЛЗ промислових систем з точки зору контролінгу бізнес-процесів, а саме: прикладні аспекти застосування ланцюгів Маркова для моделювання систем ЛЗ як проєктного управління без специфіки управління логістичною системою.

Отже, незважаючи на достатньо велику кількість праць щодо забезпечення надійності ЛЗ, зокрема ТТЗ, питання підвищення ефективності ТТЗ тактичного рівня в умовах ведення бойових дій залишається актуальним.

Мета досліджень

Проаналізувати наукові напрацювання в галузі досліджень системи технічного забезпечення з метою розроблення інструменту логістичного контролінгу для визначення факторів і "вузьких" місць системи ТТЗ та обґрунтувати пропозиції щодо забезпечення надійного його функціонування під час ведення бойових дій.

Виклад основного матеріалу

Вирішення задач логістичного забезпечення військ (сил) здійснюється через систему логістичного забезпечення ЗС України, яка включає сукупність взаємопов'язаних органів управління, сил та засобів, інфраструктури логістичного забезпечення тощо [12]. У свою чергу, сили і засоби логістичного

забезпечення за функціональним призначенням поділяють на наступні підрозділи (підсистеми):

- зберігання запасів МтЗ;
- технічного обслуговування та ремонту (ремонтно-відновлювальні);
- транспортні;
- інфраструктурного забезпечення;
- спеціальні [13].

При цьому здійснення евакуації з військ (сил) пошкоджених (несправних) виробів ОВСТ, передача їх ремонтним органам, проведення технічного обслуговування, поточного та середнього ремонту ОВСТ є одним із головних завдань Сил логістики під час їх застосування. Відповідно до [1] здійснення цих заходів покладається на органи технічного забезпечення, які забезпечують функціонування видів технічного забезпечення, зокрема і танко-технічного.

Проте під час ведення бойових дій ТТЗ не може функціонувати окремо і тісно пов'язано з іншими функціями ЛЗ та регламентується відповідними документами [1, 2]. В цих умовах забезпечення надійного функціонування ТТЗ можливо за умови забезпечення належного контролю за роботою всієї системи ЛЗ.

Проведений аналіз відомих джерел показує, що сьогодні найбільш дієвим та ефективним варіантом менеджменту роботи сучасних організаційних структур, зокрема і функціонування підрозділів ЗСУ, є контролінг – система інформаційно-аналітичної та методичної підтримки керівництва, спрямована на досягнення оперативної, тактичної й стратегічної мети організаційних структур, зокрема і функціонування підрозділів ЗСУ [11].

Під контролінгом систем танко-технічного забезпечення будемо розуміти процес управління і контролю над ефективністю роботи відповідної ієрархічної ланки. Він поєднує в собі аналітичний та практичний підходи, спрямовані на підвищення ефективності функціонування системи в цілому.

Мета контролінгу в ЛЗ, і зокрема ТТЗ, полягає у забезпеченні безперебійного функціонування всієї системи. Зазвичай, контролінг допомагає приймати правильні стратегічні рішення на основі аналізу даних постачання, складських запасів, транспортування та інших ключових параметрів логістичного процесу.

Одним із основних завдань контролінгу є аналіз надійності роботи всієї системи ЛЗ або її окремих елементів компонентів, зокрема ТТЗ. Шляхом збору та обробки даних контролінг допомагає виявити проблемні зони, неефективні та ненадійні процеси, а також пропонує заходи щодо їх оптимізації. В подальшому будемо розглядати функціонування ТТЗ на прикладі *тб*.

Отже, з **цією метою** в роботі вважається за доцільне розглянути інструментарій контролінгу ТТЗ для його ефективного управління та оптимізації процесів функціонування ТТЗ *тб* у сучасних умовах ведення бойових дій.

Для проведення подальшого дослідження щодо оцінки надійності системи ТТЗ у роботі обґрунтовано показники, які підлягатимуть контролінгу.

Так вибір показника **стійкості** ТТЗ дозволяє забезпечити здатність системи і органів управління виконувати свої функції у будь-якій обстановці. Стійкість є комплексною характеристикою системи ТТЗ і передбачає заходи, які спрямовані на мінімізацію втрат виділених ресурсів від впливу певних чинників (зовнішніх і внутрішніх, позитивних і негативних), а у ході ведення бойових дій – від впливу противника; забезпечує створення умов для стійкого і безперервного постачання МтЗ підрозділам у ході ведення бойових дій; забезпечує успішне виконання завдань з логістичного забезпечення у взаємодії з бойовим, морально-психологічним і медичним забезпеченням.

Наступний показник – **безперервність** управління ТТХ, характеризує можливості посадових осіб і органів управління складових цієї системи постійно впливати на ТТЗ і досягається постійною наявністю стійкого зв'язку з підрозділами, що забезпечуються, з підпорядкованими органами (підрозділами) логістичного забезпечення і логістикою вищої ланки, своєчасним нарощуванням можливостей засобів управління, умілим розміщенням пунктів управління, своєчасним їх переміщенням у разі необхідності та / або швидкою передачею управління з одного пункту на інший, швидким своєчасним відновленням порушеного управління.

Безперервність характеризується показниками живучості. Дослідження живучості підрозділів матеріально-технічного забезпечення проводилося з використанням наявних методик [10, 11].

Під час визначення показника **живучості** системи доцільно будувати цей показник із двох частин: перша частина має бути показником ступеня збереження функцій системи під час дій зовнішніх впливів, наприклад, ймовірності збереження готовності, тобто коефіцієнта готовності; друга частина показника живучості має бути показником ступеня відновлення функцій системи ТТЗ, наприклад, у вигляді показника підвищення ймовірності перебування системи у стані повної готовності до ймовірності перебування її у небоєготовому стані.

Живучість системи ТТЗ – це показник, який зазвичай досягається виконанням ряду заходів:

- створення раціональної організаційно-штатної структури з високою технічною оснащеністю і підготовкою підрозділів логістики до виконання завдань;

- наявність встановлених норм військових запасів МтЗ;
- раціональне розміщення (розташування) і своєчасне переміщення підрозділів ТТЗ;
- своєчасне і безперервне відновлення (ремонт) виробів (зразків) ОВТ і постачання МтЗ підрозділам;
- надійний захист, охорона, оборона та маскування підрозділів ТТЗ;
- швидке відновлення боєздатності підрозділів ТТЗ, які зазнали значних втрат від удару противника;
- організація безперервного і чіткого управління ТТЗ забезпеченням, а також проведенням інших заходів.

Від повноти та якості виконання цих заходів залежить рівень боєготовності, боєздатності та бойовий потенціал військ (сил).

Отже, для досягнення відновлюваності та живучості, системи ТТЗ військового підрозділу і, як наслідок, його боєздатності кожний її елемент має бути у взаємодії з іншими у часі та просторі.

Таким чином, перша складова показника живучості має сенс показника стійкості під час зовнішніх впливів, а друга – відновлення у разі пошкодження складових системи.

Тому важливим науковим та прикладним завданням є розробка математичних моделей логістичного забезпечення, зокрема ТТЗ, що дозволяє отримувати кількісні оцінки надійності ТТЗ ведення бойових дій танкового батальйону [8, 14].

Основні фактори впливу на надійність підсистеми технічного забезпечення *тб*

Технічне забезпечення (ТЗ), і як його складова ТТЗ, є однією з ключових підсистем логістичного забезпечення танкового батальйону, оскільки відповідає за підтримання ОВТ у робочому стані, що є критично важливим для виконання бойових завдань.

Технічне забезпечення охоплює ремонт, технічне обслуговування, постачання запасних частин і матеріалів, а також евакуацію пошкодженої техніки з поля бою [2].

У сучасних умовах ведення бойових дій, коли імовірність ураження ОВТ *тб* виросла в рази, а логістичні ланцюги перебувають під загрозою, ефективність ТТЗ безпосередньо впливає на надійність усієї системи ЛЗ і бойову готовність підрозділу.

Визначимо такі основні функції ТТЗ у межах діяльності системи ЛЗ *тб*:

- технічне обслуговування (ТО);
- ремонт зразків ОВТ;

- постачання запчастин і матеріалів та забезпечення ремонтних груп деталями, інструментами, мастилами тощо;

- евакуація техніки, зокрема: транспортування пошкоджених машин (танків, БМП, вантажівок) до ремонтних пунктів або складів;

- технічна розвідка (оцінка стану техніки на полі бою для визначення пріоритетів ремонту чи евакуації).

ТТЗ *тб* зазвичай включає наступні сили і засоби:

- ремонтний взвод у складі 10 – 15 осіб, оснащених мобільними ремонтними майстернями та інструментами для дрібного і середнього ремонту;

- евакуаційні групи, у складі яких передбачені 1-2 броньовані тягачі для транспортування пошкодженої техніки. Кожна група складається з 3 – 5 осіб;

- пункт технічного обслуговування (ПТО), що включає стаціонарну або мобільну базу для складнішого ремонту, зазвичай розташована на відстані 20 – 30 км від лінії бойового зіткнення.

Організація ТТЗ *тб* відбувається у тісній взаємодії з *орвб* бригади [2, 15].

Проте незважаючи на достатність сил і засобів ТТЗ на його надійність в умовах бойових дій впливає ряд факторів, а саме:

- обмеженість матеріально-технічних ресурсів, зокрема дефіцит запчастин, особливо для застарілої техніки, такої як танки Т-64 чи БМП-1, які становлять значну частку парку ЗСУ;

- вогневий вплив противника, особливо застосування БпЛА;

- часові обмеження на евакуацію та проведення відновлення ОВТ;

- недостатня кваліфікація технічного персоналу;

- труднощі у постачанні МтЗ та ПММ по логістичними шляхами внаслідок впливу вогневих засобів противника тощо.

Отже, саме надійність ТТЗ безпосередньо впливає на успіх у виконанні поставлених завдань *тб*. Так вихід з ладу 20% танків батальйону (8 – 10 одиниць із 40) може зірвати наступальну операцію бригади через брак вогневої підтримки. Затримки в ремонті евакуаційної техніки ускладнюють транспортування пошкоджених машин, створюючи скупчення на полі бою. При цьому основним джерелом забезпечення ОВТ підрозділів залишається її відновлення [16].

У табл. 1 узагальнені основні фактори впливу на надійність ТТЗ *тб*.

Таблиця 1

Основні фактори впливу на надійність ТТЗ

№ з/п	Найменування	Опис впливу	Наслідки
1.	Дефіцит запчастин	Брак деталей для ОБТ	Затримки ремонту, простої техніки
2.	Вогневий вплив противника	Відсутність укриттів, ризику для особового складу ремонтних підрозділів	Переривання робіт, втрати особового складу
3.	Обмежений час	Висока інтенсивність операцій вимагає швидкого відновлення ОБТ	Зниження бойової готовності
4.	Недостатня кваліфікація особового складу ремонтних підрозділів	Недостатній досвід для ремонту сучасної техніки	Помилки в ремонті, повторні поломки
5.	Проблеми з доставкою	Вогневий вплив противника на логістичні шляхи	Затримки постачання запчастин

Отже, в цих умовах постає виникає актуальне питання щодо розробки пропозицій забезпечення надійності ТТЗ в умовах ведення бойових дій.

Одним із шляхів дослідження процесу ТТЗ та впливу визначених вище факторів на його функціонування є використання ланцюгів Маркова з представленням процесу графом станів ТТЗ.

Марківським називають випадковий процес з дискретним часом та дискретними значеннями. Такий випадковий процес можна представити як послідовність випадкових величин X_1, X_2, \dots , значеннями випадкових величин є результати $\{E_1, E_2, \dots\}$. Для зручності записи вважаються результатами $\{1, 2, \dots\}$, тобто номери результатів. Послідовність X_1, X_2, \dots утворює ланцюг Маркова, якщо

$$P(X_n = j / X_0 = k_1, X_1 = k_2, \dots, X_{n-2} = k_{n-2}, X_{n-1} = i) = P(X_n = j / X_{n-1} = i) = p_{ij}^{(n)}. \quad (1)$$

де n – кількість станів системи.

Цю властивість можна було б охарактеризувати так: за фіксованого сьогодення майбутнє не залежить від минулого. Ланцюги Маркова відображають випадковий процес, що задовольняє властивості Маркова і приймає кінцеве чи лічильне число значень (станів), у т. ч. з дискретним часом, це дозволяє проводити дослідження стану складних систем, наприклад, по днях. Ймовірності переходу p_{ij} утворюють матрицю $P = \|p_{ij}\|$ із властивостями:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, \quad (2)$$

$$p_{ij} \geq 0, \quad (3)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad (4)$$

$$j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Матриці із зазначеними властивостями називаються стохастичними. Отже, матриця P повністю визначає зміни системи за кожний крок. Розглянемо зміну системи за k кроків. Ймовірність переходу зі i стану в стан j за k кроків позначимо $p_{ij}(k) = P(X_k = j / X_0 = i)$. При $k > 1$ за формулою повної ймовірності вірним будуть вирази:

$$p_{ij}(k) = \sum_s P(X_{k-1} = s / X_0 = i) p_{sj} = \sum_s p_{is}(k-1) p_{sj}; \quad (6)$$

$$i = \overline{1, n}; \quad (7)$$

$$j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Введемо матрицю, яка утворена ймовірностями $p_{ij}(k)$:

$$P(k) = \|p_{ij}(k)\|. \quad (9)$$

Із записаної вище рівності випливає, що $P(k) = P(k-1)P$. Тоді $P(k) = P^k$. Розподіл ланцюга буде повністю визначено, якщо встановлено певний початковий розподіл величини X_0 :

$$P(X_0 = j) = p_j^0, \quad \sum_j p_j^0 = 1 \quad (10)$$

та задана матриця переходу P .

Загалом, властивості (1–10) характеризують запропонований ланцюг Маркова як безповоротний, ергодичний, поглинаючий [17], що дозволяє використовувати його для дослідження і контролінгу організаційно-технічних систем проектного управління, зокрема ЛЗ різного рівня ієрархії та функціонального змісту.

Представимо процес функціонування ТТЗ тб у вигляді графу станів цієї системи.

Для дослідження надійності роботи ТТЗ у роботі пропонується використовувати математичний апарат теорії масового обслуговування. Таке подання

системи ТТЗ сприятиме логічному і конкретному визначенню показників її надійності, у т.ч. коефіцієнтів відновлення і живучості. Отже, систему доцільно представити у вигляді простого графа переходів з відповідними інтенсивністю та ймовірністю у типових умовах застосування цієї системи за призначенням (рис. 1). За класичними положеннями теорії масового обслуговування [18] визначимо, що система ТТЗ *тб* може знаходитися в одному із таких станів:

S_1 – отримання завдання /прийняття рішення на ТТЗ *тб*;

S_2 – проведення технічної розвідки;

S_3 – проведення евакуації;

S_4 – проведення поточного ремонту техніки;

S_5 – техніка в боеготовому стані;

S_6 – безповоротні втрати техніки;

S_7 – передача техніки старшому начальнику;

S_8 – проведення ТО техніки;

S_9 – розподіл особового складу;

S_{10} – витрата запасів МТЗ;

S_{11} – списання техніки.

Перехід системи із стану в стан схематично представлений на рис. 1. Згідно з положеннями теорії масового обслуговування переходи системи з i -го в j -й стан здійснюються з ймовірністю $p_{ij} \neq 0$, $i = \overline{1, n}$,

$j = \overline{1, n}$, (n – кількість станів системи ТТЗ), які залежать від впливу зовнішнього середовища і керуючих впливів управління. Параметри відповідної математичної моделі можуть бути визначені за статистичними даними і в подальшому використовуватися для контролінгу та оптимізації функціонування системи ТТЗ батальйону [19].

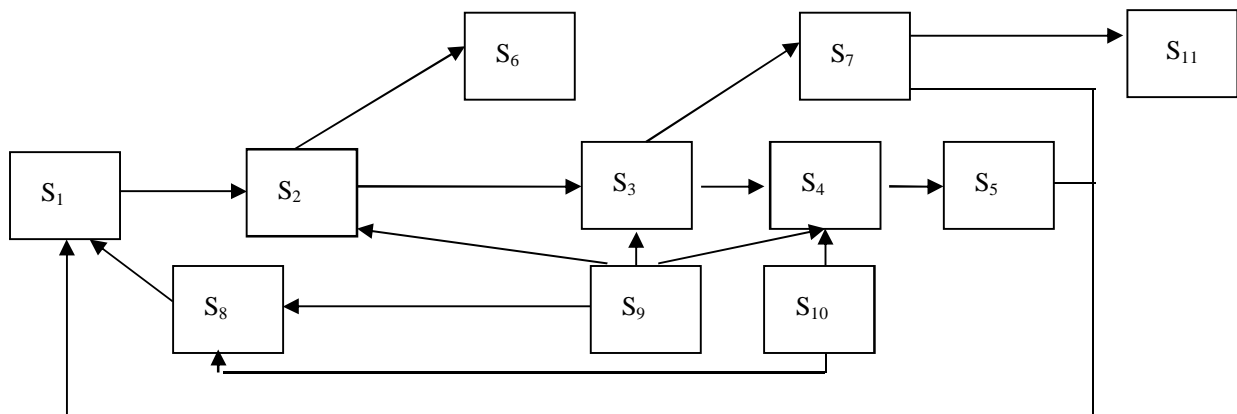


Рис. 1. Граф станів функціонування системи ТТЗ *тб*

Матриця перехідних ймовірностей запишеться таким виразом:

$$\|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & 0 & 0 & p_{1,5} & 0 & p_{1,7} & p_{1,8} & 0 & 0 & 0 \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & 0 & 0 & p_{2,6} & 0 & 0 & p_{2,9} & 0 & 0 \\ 0 & p_{3,2} & p_{3,3} & p_{3,4} & 0 & 0 & p_{3,7} & 0 & p_{3,9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{4,4} & p_{4,5} & 0 & 0 & 0 & p_{4,9} & p_{4,10} & 0 \\ p_{5,1} & 0 & 0 & p_{5,4} & p_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{6,2} & 0 & 0 & 0 & p_{6,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{7,1} & 0 & p_{7,3} & 0 & 0 & 0 & p_{7,7} & 0 & 0 & 0 & p_{7,11} \\ p_{8,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,8} & p_{8,9} & p_{8,10} & 0 \\ 0 & p_{9,2} & p_{9,3} & p_{9,4} & 0 & 0 & 0 & p_{9,8} & p_{9,9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{10,4} & 0 & 0 & p_{10,8} & p_{10,9} & 0 & p_{10,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,11} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Розмірність цієї матриці становитиме

$$\|p_{ij}\| = [n \times n], \quad (12)$$

де n – число станів системи.

Елементами матриці є ймовірність переходу з i -го в j -й стан за один крок, при цьому $p_{ij} > 0$.

Матриця, що має такі властивості, за основними визначеннями теорії масового обслуговування, називається стохастичною [19].

У марківському ланцюзі зі зміною часу (крок k) розподіл ймовірностей станів $\{p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)\}$ змінюється. При цьому обчислення розподілу ймовірностей на наступному $(k+1)$ виконується за відомою формулою повної ймовірності

$$\begin{pmatrix} p_1(k+1) \\ p_2(k+1) \\ p_3(k+1) \\ p_4(k+1) \\ p_5(k+1) \\ p_6(k+1) \\ p_7(k+1) \\ p_8(k+1) \\ p_9(k+1) \\ p_{10}(k+1) \\ p_{11}(k+1) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} p_1(k) \\ p_2(k) \\ p_3(k) \\ p_4(k) \\ p_5(k) \\ p_6(k) \\ p_7(k) \\ p_8(k) \\ p_9(k) \\ p_{10}(k) \\ p_{11}(k) \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & 0 & 0 & p_{1,5} & 0 & p_{1,7} & p_{1,8} & 0 & 0 & 0 \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} & 0 & 0 & p_{2,6} & 0 & 0 & p_{2,9} & 0 & 0 \\ 0 & p_{3,2} & p_{3,3} & p_{3,4} & 0 & 0 & p_{3,7} & 0 & p_{3,9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{4,4} & p_{4,5} & 0 & 0 & 0 & p_{4,9} & p_{4,10} & 0 \\ p_{5,1} & 0 & 0 & p_{5,4} & p_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{6,2} & p_{6,3} & 0 & 0 & p_{6,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{7,1} & 0 & p_{7,3} & 0 & 0 & 0 & p_{7,7} & 0 & 0 & 0 & p_{7,11} \\ p_{8,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,8} & p_{8,9} & p_{8,10} & 0 \\ 0 & p_{9,2} & p_{9,3} & p_{9,4} & 0 & 0 & 0 & p_{9,8} & p_{9,9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{10,4} & 0 & 0 & p_{10,8} & p_{10,9} & 0 & p_{10,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,11} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Якщо встановлено матрицю перехідних ймовірностей $\|p_{ij}\|$ і відомий розподіл ймовірностей станів $\{p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)\}$ на кроці k , то новий розподіл ймовірностей станів $\|p_i(k+1)\|$; $i = 1, 2, \dots, n$ може бути знайдено з (13).

Отже, стан системи у часі може бути відображений через матрицю $\|p_{ij}(k)\|$ на k -му кроці.

Після проведення рекурентних розрахунків за формулами (11 – 13) через певну кількість кроків K матриця $\|p_{ij}\|$ набуде свого граничного стану. Таким чином, формули (11 – 13) дають можливість досліджувати стан системи у часі: покроково та у граничному стані.

Визначення коефіцієнта відновлення системи ТТЗ *тб*

Для вирішення завдання оцінювання надійності системи ТТЗ *тб* в умовах ведення бойових дій доцільно виділити стани, що безпосередньо впливають на її живучість та відновлюваність, зокрема при досягненні граничних значень ймовірності перебування в ньому протягом визначеного часу для виконання завдань за призначенням.

Це проілюстровано на рис. 2 як фрагмент графу переходів системи логістичного забезпечення в різні її стани надійності.

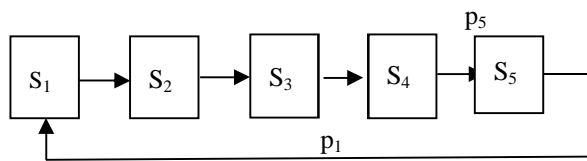


Рис. 2. Фрагмент графу переходів підсистеми ТТЗ у різні її стани надійності

Отже, коефіцієнт відновлення системи ТТЗ батальйону може бути виражений через значення ймовірностей станів p_1 та p_5 , а саме:

$$K_{\text{в}} = \left[1 + \frac{p_1}{p_5} \right]^{-1} \cdot \left(\frac{p_1}{p_5} \right). \quad (14)$$

Значимо, що аналітичні вирази визначених коефіцієнтів надійності корелюють з їх смисловим навантаженням, інтуїтивно зрозумілими можливостями відновлення системи після шкідливих зовнішніх впливів та збереження функцій, які безпосередньо залежать від якості проведення контролінгу.

Визначення коефіцієнта живучості системи ТТЗ батальйону

Під час визначення показника живучості системи доцільно будувати цей показник з двох частин:

- перша частина має бути показником ступеня збереження функцій підсистеми ЛЗ, а саме ТТЗ, під час дій противника, наприклад, ймовірністю збереження функцій цієї підсистеми під час дії противника;

- друга частина показника живучості (у разі незбереження функцій підсистеми військової логістики під час дій противника) має бути показником ступеня відновлення функцій підсистеми ТТЗ, наприклад, у вигляді показника ймовірності перебування підсистеми у стані повної готовності до ймовірності перебування цієї підсистеми у неготовому стані.

Отже, перша складова показника живучості має сенс показника стійкості під час дії противника, а друга – показника ефективності відновлення у разі пошкодження противником будь-яких складових з функцій ТТЗ.

Таким чином, цей узагальнений показник є основою для побудови в подальшому критерію з метою оцінювання рівня досягнення мети збереження живучості підсистеми ТТЗ протягом визначеного періоду часу при виконання завдань за призначенням.

Згідно з виразами (1 – 10), (13) визначимо час переходу системи із стану S_1 до S_5 як p_1 , а час переходу системи із стану S_5 до S_1 як p_5 .

Автори пропонують визначення коефіцієнта живучості системи ТЗ батальйону [4]

$$K_{\text{жс}} = \frac{1}{1 + \frac{p_5}{p_1}} + \frac{\left(1 + \frac{p_5}{p_1} \right)^{-1}}{\frac{p_1}{p_0}}. \quad (15)$$

Динамічний аналіз надійності логістичного забезпечення через розв'язання системи диференціальних рівнянь

Теоретичне підґрунтя системи масового обслуговування, зокрема ланцюгів Маркова, дозволяє досліджувати процес функціонування системи ТТЗ у часі відносно ймовірностей знаходження її у кожному i -му стані шляхом опису його системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \cdot p_{ij}, \quad (16)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$j = \overline{1, n}, \quad (18)$$

де λ_{ij} – інтенсивність переходу системи із i -го стану в j -й;

n – число станів системи.

Інтенсивність переходу системи із i -го стану в j -й може бути визначена дослідним шляхом на основі обробки статистичних даних.

Для отримання аналітичних значень коефіцієнтів надійності системи ТТЗ батальйону, а саме коефіцієнта відновлення (14) та коефіцієнта живучості (15), необхідно розв'язати систему (16) – (18), що природно пояснюється взаємовпливом елементів системи ЛЗ (рис. 2).

Розв'язанням системи (16 – 18) будуть вирази вигляду

$$p_i(t) = \exp(\lambda_{ij}, t), \quad (19)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad (20)$$

$$j = \overline{1, n}, \quad (21)$$

при чому

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = I, \quad (22)$$

$$i = \overline{1, n} \quad (23)$$

де λ_{ij} – інтенсивність переходу системи із i -го стану в j -й;

n – число станів системи.

Технічно розв'язання можливе чисельними методами або за допомогою онлайн-калькуляторів [20].

Зазначимо, що покрокове розв'язання системи рівнянь (16 – 18) надасть змогу провести динамічний аналіз показників надійності системи ТТЗ.

Так дискретизація змінної часу t у цьому випадку може символізувати, наприклад, щоденні зміни станів систем протягом визначеного граничного терміну виконання $тб$ завдань за призначенням.

Тоді досягнення граничних значень надійності того чи іншого стану системи відповідатиме певним часовим показникам.

Розглянемо систему логістичного забезпечення $тб$, що бере участь в оборонній операції у період 30 діб.

Будемо вважати, що батальйон повністю укомплектований ОВТ згідно з організаційно-штатною структурою.

Приймаємо, що справний стан – це стан зразка ОВТ – характеризується наявністю запасу технічного ресурсу і знаходженням всіх технічних параметрів у встановлених межах.

Працездатний стан відрізняється від справного стану тим, що деякі параметри зразка ОВТ, які не впливають на його функціонування, можуть не відповідати встановленим межах.

У справних (працездатних) зразків ОВТ є запас технічного ресурсу.

У разі витрати технічного ресурсу зразок ОВТ вважається несправним і його експлуатація повинна

бути припинена. Після чого зразок підлягає технічному огляду і далі, або капітальному ремонту (КР) для відновлення технічного ресурсу, або списанню та утилізації.

Ремонт ОВТ, що має запас технічного ресурсу, проводиться у військових ремонтних підрозділах (частинах) у вигляді поточного ремонту або середнього. Капітальний ремонт, пов'язаний з відновленням технічного ресурсу, здійснюється на підприємствах промисловості.

Утилізація ОВТ здійснюється в спеціальних частинах (базах) або на підприємствах промисловості.

Доробки зразків ОВТ з метою їх модернізації, спрямованої на підвищення їх бойових можливостей (надійності, експлуатаційної технологічності, бойової ефективності), здійснюються як у військах, так і на ремонтних підприємствах оборонної промисловості.

При цьому зразки ОВТ виключаються з облікового складу військових частин.

Для переоснащення військ новою технікою здійснюється поставка нових зразків ОВТ з промисловості.

Переведення ОВТ з одного стану в інший здійснюється на основі вимог технічного забезпечення.

При проведенні розрахунків слід брати до уваги, що поточний ремонт техніки, як і нескладний середній ремонт, передбачено здійснювати ремонтно-відновлювальними органами військового рівня у відносно невеликий термін.

У ході дослідження, як приклад, було використано вихідні дані відкритих джерел (табл. 2) [21, 22].

Таблиця 2

Вихідні показники станів ТТЗ на початок операції

№ з/п	Значення	Показник
1.	Кількість зразків ОВТ (танків) на початок операції, шт.	33
2.	Середній час проведення технічної розвідки, год	4
3.	Середній час проведення евакуації, діб	до 5
4.	Середня трудомісткість проведення поточного ремонту техніки, л/год	10
5.	Середній час підготовки техніки у боєготовий стан, год	4-5
6.	Середньомісячні безповоротні втрати техніки, шт.	3
7.	Середньомісячна кількість техніки, переданої старшому начальнику, од.	5
8.	Середній час проведення технічного обслуговування одиниці техніки, год/од.	7-9
9.	Чисельність о/с взводу Тхз, чол.	25
10.	Середній час відновлення запасів МтЗ, діб	до 1
11.	Середньомісячна кількість техніки, що підлягає списанню, од.	4

Модель масового обслуговування та граф станів системи ТТЗ батальйону

Враховуючи специфіку предметної області для деяких робіт, в якості числових оцінок пропонується використовувати загальнозживані параметри щодо організації ТТЗ батальйону, який виконує завдання у складі бригади. Наприклад, трудомісткість ремонту ОВТ складає: поточного ремонту – 10 люд./год; середнього ремонту – до 200 люд./год (орвб, орвп ОК) та до 400 л/год. Чисельний склад підрозділів, дані про можливості РВО певного рівня ієрархії та статистичні дані щодо виходу з ладу ОВТ вказані у керівних документах [2]. Інтенсивності (16 – 18) взято із розрахунку втрат ПР, СР(0,6), КР, БПВ за період часу 30 діб. З урахуванням рис. 1 та табл. 3 матриця (13) матиме вигляд

$$P_k = \begin{pmatrix} 1 & 0.019 & 0 & 0 & 0.033 & 0 & 0.033 & 0.030 & 0 & 0 & 0 \\ 0.019 & 1 & 0.167 & 0 & 0 & 0.091 & 0 & 0 & 0.152 & 0 & 0 \\ 0 & 0.167 & 1 & 0.007 & 0 & 0 & 0.152 & 0 & 0.152 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.007 & 1 & 0.013 & 0 & 0 & 0 & 0.007 & 0.004 & 0 \\ 0.0019 & 0 & 0 & 0.0013 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.091 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0033 & 0 & 0.152 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.12 \\ 0.030 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.034 & 0.03 & 0 \\ 0 & 0.019 & 0.152 & 0.007 & 0 & 0 & 0 & 0.034 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.004 & 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.121 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

На рис. 3 наведені Screen Short проведених розрахунків [19].

Матриця состояний

$$Ivanna = \begin{pmatrix} 1 & 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.033 & 0.001 & 0.033 & 0.03 \\ 0.019 & 1 & 0.167 & 0.001 & 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.01 \\ 0.001 & 0.167 & 1 & 0.007 & 0.001 & 0.001 & 0.152 & 0.01 \\ 0.001 & 0.001 & 0.007 & 1 & 0.013 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.019 & 1 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 & 0.001 & 0.001 \\ 0.034 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 1 & 0.001 \\ 0.0034 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 \end{pmatrix}$$

Найдём матрицу $Ivanna_{30}$ перехода за 30 шага:

$$Ivanna_{30} = Ivanna \cdot Ivanna = \begin{pmatrix} 1 & 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.033 & 0.001 & 0.033 & 0.03 \\ 0.019 & 1 & 0.167 & 0.001 & 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.01 \\ 0.001 & 0.167 & 1 & 0.007 & 0.001 & 0.001 & 0.152 & 0.01 \\ 0.001 & 0.001 & 0.007 & 1 & 0.013 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.019 & 1 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 & 0.001 & 0.001 \\ 0.034 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 1 & 0.001 \\ 0.0034 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Screen Short проведених розрахунків ймовірностей станів графу

Крок ітерації, обраний при розрахунках, дорівнює 1, що відповідає періоду однієї доби. Така ітерація дозволяє провести динамічний аналіз стану системи за період $k = \overline{1,30}$ діб. Наприклад, на рис. 4 наведений розрахунок ймовірності станів графу системи ТТЗ станом на $k=12$ -добу ведення бойових дій.

$$\begin{aligned} & -0.0034 + 5.3675 \cdot 0.001 + 0.5425 \cdot 0.001 + 1.7661 \cdot 0.001 \\ & 0.0575 \cdot 1 + 0.1996 \cdot 0.019 + 0.3452 \cdot 0.001 + 1.0314 \cdot 0.001 + 0.2124 \cdot 0.019 + 0.0569 \cdot 0.001 + 0.1729 \cdot 0.034 + 0.0627 \\ & \cdot 0.034 + 0.2584 \cdot 0.001 + 0.0705 \cdot 0.001 + 0.0518 \cdot 0.001 \\ & 0.2364 \cdot 1 + 0.103 \cdot 0.019 + 0.1468 \cdot 0.001 + 0.2202 \cdot 0.001 + 1.0954 \cdot 0.019 + 0.0374 \cdot 0.001 + 0.1148 \cdot 0.034 + 0.0616 \cdot \\ & + 0.1021 \cdot 0.001 + 0.0252 \cdot 0.001 + 0.0485 \cdot 0.001 \\ & 0.2024 \cdot 1 + 1.8161 \cdot 0.019 + 1.6253 \cdot 0.001 + 0.0707 \cdot 0.001 + 0.2185 \cdot 0.019 + 1.5953 \cdot 0.001 + 0.6377 \cdot 0.034 + 0.2009 \\ & \cdot 0.034 + 1.0067 \cdot 0.001 + 0.0906 \cdot 0.001 + 0.1654 \cdot 0.001 \\ & 1.0367 \cdot 1 + 2.669 \cdot 0.019 + 4.9137 \cdot 0.001 + 0.3895 \cdot 0.001 + 3.0418 \cdot 0.019 + 0.6154 \cdot 0.001 + 4.3008 \cdot 0.034 + 0.5304 \cdot \\ & + 2.6386 \cdot 0.001 + 0.2447 \cdot 0.001 + 2.3397 \cdot 0.001 \\ & 0.4403 \cdot 1 + 0.3691 \cdot 0.019 + 0.661 \cdot 0.001 + 0.0533 \cdot 0.001 + 0.1922 \cdot 0.019 + 0.0893 \cdot 0.001 + 0.3389 \cdot 0.034 + 1.1655 \cdot \\ & + 0.6913 \cdot 0.001 + 0.0913 \cdot 0.001 + 0.105 \cdot 0.001 \\ & 0.5025 \cdot 1 + 3.0115 \cdot 0.019 + 5.0765 \cdot 0.001 + 0.296 \cdot 0.001 + 0.971 \cdot 0.019 + 0.7266 \cdot 0.001 + 2.5197 \cdot 0.034 + 0.8559 \cdot 1 \\ & + 3.8783 \cdot 0.001 + 0.5673 \cdot 0.001 + 0.7491 \cdot 0.001 \\ & 0.0834 \cdot 1 + 0.085 \cdot 0.019 + 0.137 \cdot 0.001 + 0.0873 \cdot 0.001 + 0.057 \cdot 0.019 + 0.0326 \cdot 0.001 + 0.0819 \cdot 0.034 + 0.3551 \cdot 0. \\ & 0.1337 \cdot 0.001 + 1.0151 \cdot 0.001 + 0.0376 \cdot 0.001 \\ & 0.4124 \cdot 1 + 0.7856 \cdot 0.019 + 1.7728 \cdot 0.001 + 0.132 \cdot 0.001 + 1.3448 \cdot 0.019 + 0.1624 \cdot 0.001 + 2.3285 \cdot 0.034 + 0.1579 \cdot \\ & + 0.7647 \cdot 0.001 + 0.075 \cdot 0.001 + 2.0362 \cdot 0.001 \end{aligned}$$

 $Ivanna_{13} = Ivanna_{12} \cdot Ivanna$

$$= \begin{pmatrix} 1.3303 & 0.9321 & 1.3985 & 0.1358 & 0.9867 & 0.2698 & 1.1058 & 0.5352 & 0.905 & 0.1023 & 0.4608 \\ 0.9815 & 5.9684 & 7.9227 & 0.3807 & 1.5959 & 2.2697 & 3.9475 & 1.0507 & 5.2011 & 0.5146 & 1.2003 \\ 1.3726 & 7.0023 & 10.8604 & 0.6129 & 3.088 & 1.9979 & 6.3914 & 1.3863 & 7.0283 & 0.7315 & 2.3799 \\ 0.0752 & 0.2701 & 0.4557 & 1.0407 & 0.2551 & 0.0774 & 0.2355 & 0.0813 & 0.3339 & 0.0836 & 0.074 \\ 0.2657 & 0.1389 & 0.2015 & 0.2435 & 1.1241 & 0.0488 & 0.1524 & 0.0765 & 0.1382 & 0.031 & 0.0642 \\ 0.2741 & 2.2571 & 2.1966 & 0.0985 & 0.3295 & 1.7648 & 0.9164 & 0.2769 & 1.3802 & 0.1275 & 0.2493 \\ 1.3206 & 3.6263 & 6.4643 & 0.5134 & 3.7487 & 0.8777 & 5.3752 & 0.7345 & 3.5953 & 0.3449 & 2.8758 \\ 0.5038 & 0.511 & 0.8921 & 0.0695 & 0.2621 & 0.1266 & 0.4692 & 1.2133 & 0.8603 & 0.1156 & 0.1497 \\ 0.7042 & 4.0146 & 6.6165 & 0.3895 & 1.3893 & 1.016 & 3.4089 & 1.0905 & 4.8814 & 0.6993 & 1.0696 \\ 0.1024 & 0.1166 & 0.1882 & 0.098 & 0.0752 & 0.0423 & 0.1118 & 0.3946 & 0.1746 & 1.0203 & 0.0494 \\ 0.5423 & 1.1249 & 2.3908 & 0.1818 & 1.7199 & 0.2429 & 2.8614 & 0.227 & 1.1 & 0.1074 & 2.3234 \\ 1 & 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.033 & 0.001 & 0.033 & 0.03 & 0.01 & 0.001 & 0.001 \\ 0.019 & 1 & 0.167 & 0.001 & 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.01 & 0.063 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.167 & 1 & 0.007 & 0.001 & 0.001 & 0.152 & 0.01 & 0.152 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.001 & 0.007 & 1 & 0.013 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.019 & 0.001 & 0.001 & 0.019 & 1 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.091 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.034 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 0.152 & 0.001 & 1 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.0034 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Розрахунок ймовірності станів системи ТТЗ на $k=12$ -добу ведення БД

Розрахунки, проведені для $k = \overline{1,30}$, дозволяють отримати граничні значення ймовірності станів системи ТТЗ. На рис. 5 наведені значення $p_i(t)_{k=30}$, $i = \overline{1,n}$.

$$\begin{aligned} & 0.019p_2 + 0.001p_3 + 0.001p_4 + 0.019p_5 + 0.001p_6 + 0.034p_7 + 0.034p_8 + 0.001p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.019p_1 + 0.167p_2 + 0.001p_3 + 0.001p_4 + 0.091p_5 + 0.001p_6 + 0.019p_7 + 0.001p_8 + 0.019p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.001p_1 + 0.167p_2 + 0.007p_3 + 0.001p_4 + 0.152p_5 + 0.001p_6 + 0.167p_7 + 0.001p_8 + 0.001p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.001p_1 + 0.001p_2 + 0.007p_3 + 0.019p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.007p_8 + 0.007p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.033p_1 + 0.001p_2 + 0.001p_3 + 0.013p_4 + 0.001p_5 + 0.152p_6 + 0.001p_7 + 0.001p_8 + 0.001p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.001p_1 + 0.091p_2 + 0.001p_3 + 0.001p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.001p_8 + 0.001p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.033p_1 + 0.001p_2 + 0.152p_3 + 0.001p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.03p_8 + 0.03p_9 + 0.001p_{10} + 0.121p_{11} = 0, \\ & 0.03p_1 + 0.01p_2 + 0.01p_3 + 0.001p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.03p_8 + 0.03p_9 + 0.001p_{10} + 0.121p_{11} = 0, \\ & 0.01p_1 + 0.063p_2 + 0.152p_3 + 0.007p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.034p_8 + 0.001p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & 0.001p_1 + 0.001p_2 + 0.001p_3 + 0.004p_4 + 0.001p_5 + 0.001p_6 + 0.001p_7 + 0.001p_8 + 0.03p_9 + 0.001p_{10} + 0.001p_{11} = 0, \\ & p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + p_8 + p_9 + p_{10} + p_{11} = 1 \\ & p_1 = 0.03, \\ & p_2 = 0.06, \\ & p_3 = 0.06, \\ & p_4 = 0.12, \\ & p_5 = 0.01, \\ & p_6 = 0.12, \\ & p_7 = 0.16, \\ & p_8 = 0.1, \\ & p_9 = 0.11, \\ & p_{10} = 0.12, \\ & p_{11} = 0.11 \end{aligned}$$

Рис. 5. Граничні значення ймовірності станів системи ТТЗ

Граничні ймовірності знаходження системи ТТЗ батальйону відображені у табл. 3.

Таблиця 3

**Граничні ймовірності станів системи ТТЗ
танкового батальйону**

№ з/п	Стан системи ТТЗ	Значення ймовірності стану
1.	отримання завдання / прийняття рішення на ЛЗ т(м)б	0,03
2.	проведення технічної розвідки	0,06
3.	проведення евакуації зразків ОВТ	0,06
4.	проведення поточного ремонту техніки	0,12
5.	техніка в боеготовому стані	0,01
6.	безповоротні втрати техніки	0,12
7.	передача техніки старшому начальнику	0,16
8.	проведення технічного обслуговування техніки	0,1
9.	розподіл особового складу	0,11
10.	витрата запасів МТЗ	0,12
11.	списання техніки	0,11

Зазначимо, що умова (22) виконується, тобто сума $p_1 = 0,03$, $p_5 = 0,01$.

Розрахунок показників надійності ТТЗ тб

За формулами (14) та (15) вираховуємо через 30 діб:

$$K_{ж} = \frac{1}{1 + \frac{p_5}{p_1}} + \frac{\left(1 + \frac{p_5}{p_1}\right)^{-1}}{\frac{p_1}{p_0}} = \frac{1}{1 + \frac{0,01}{0,03}} + \frac{\left(1 + \frac{0,01}{0,03}\right)^{-1}}{\frac{0,03}{0,01}} =$$

(25)

$$= \frac{1}{1 + \frac{1}{3}} + \frac{\left(1 + \frac{1}{3}\right)^{-1}}{3} = \frac{3}{4} + \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{3} = 1$$

$$K_{\theta} = \left[1 + \frac{p_1}{p_5}\right]^{-1} \cdot \left(\frac{p_1}{p_5}\right) =$$

$$= \left[1 + \frac{0,03}{0,01}\right]^{-1} \cdot \left(\frac{0,03}{0,01}\right) = \frac{1}{4} \cdot 3 = \frac{3}{4}$$

(26)

Інтерпретація результатів розрахунків показників надійності для контролінгу системи ТТЗ тб

Нижче наведені результати розрахунків показників надійності системи ТТЗ тб за описаною методикою.

Графічно зміни показників надійності роботи системи показані на рис. 5 і 6.

Таблиця 4

Показники надійності для контролінгу ЛЗ т(м)б, що бере участь в оборонній операції у період 30 діб

№ з/п	Ітерація (доба)	$K_{ж}$	K_{θ}
1.	1	1,5	0,9
2.	2	1,4	0,88
3.	3	1,35	0,861
4.	4	1,34	0,842
5.	5	1,34	0,832
6.	6	1,33	0,82
7.	7	1,32	0,819
8.	8	1,315	0,809
9.	9	1,31	0,8
10.	10	1,22	0,79
11.	11	1,18	0,785
12.	12	1,15	0,76
13.	13	1,14	0,759
14.	14	1,14	0,758
15.	15	1,12	0,757
16.	16	1,11	0,756
17.	17	1,11	0,755
18.	18	1,11	0,754
19.	19	1,1	0,7534
20.	20	1,05	0,753
21.	21	1,05	0,7529
22.	22	1,04	0,7525
23.	23	1,04	0,75245
24.	24	1,06	0,7524
25.	25	1,05	0,7521
26.	26	1,04	0,752
27.	27	1,03	0,7512
28.	28	1,02	0,751
29.	29	1,01	0,75
30.	30	1	0,75



Рис. 5. Коефіцієнт живучості системи ТТЗ

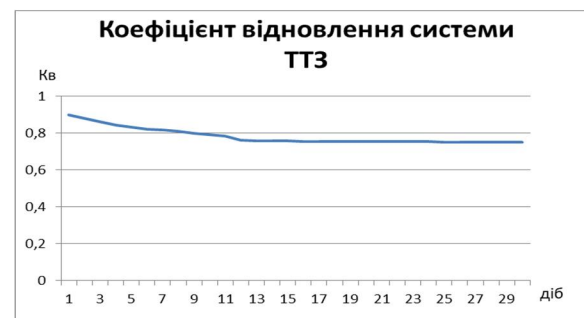


Рис. 6. Коефіцієнт відновлення системи ТТЗ

Аналіз графіків залежності коефіцієнта відновлення показує їх повільне зниження протягом часу ведення бойових дій. Це може бути обумовлено зниженням ймовірності перебування системи у стані, при якому техніка боєготова. Але найбільший вплив за результатами проведеного динамічного аналізу на показники надійності мають “проведення технічної розвідки” та “середній час відновлення запасів МТЗ”.

Рекомендації щодо забезпечення показників надійності системи ТТЗ батальйону

Аналіз результатів розрахунків, проведений за методикою, яка запропонована в роботі, показав, що основними проблемами, які знижують показники стійкості та живучості системи ТТЗ, є затримки в технічній розвідці, тривалий час відновлення запасів матеріально-технічних засобів (МТЗ), а також уразливість логістичних об'єктів до ворожих засобів ураження.

Для підвищення коефіцієнтів надійності (K_v і $K_{ж}$) у роботі пропонується комплекс заходів, спрямованих на оптимізацію логістичних процесів, зокрема через розосередження об'єктів ЛЗ, використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та впровадження сучасних технологій.

Одним із ключових заходів для підвищення живучості системи ЛЗ є розосередження та взаємовіддалення об'єктів логістичного (технічного) забезпечення, таких як пункти технічного обслуговування (ПТО), склади МТЗ, ремонтні майстерні та пункти управління логістикою. Це дозволяє знизити ймовірність ураження кількох об'єктів одним боєприпасом противника, що є критичним у сучасних бойових умовах, де застосовуються високоточні засоби ураження, артилерія та дрони-камікадзе. Так пропонується логістичні об'єкти розміщувати на відстані, що перевищує радіус ураження типових боєприпасів (наприклад, 152-мм артилерійських снарядів або дронів із зарядом до 5 кг). Рекомендована відстань між об'єктами – не менше 500-1000 м, залежно від рельєфу та типу загрози.

Розосередження знижує ризик одночасної втрати кількох об'єктів, що підвищує коефіцієнт відновлення (K_v) системи ТТЗ. У роботі показано, що цей захід дозволяє досягти $K_v = 0,78$, порівняно з базовим значенням 0,75. Наприклад, у зоні ООС 2022 року концентрація складів МТЗ в одному районі призводила до втрат до 30% запасів від одного артилерійського удару. Розосередження зменшує такі втрати до 5 – 10%, що забезпечує безперебійність постачання.

Застосування БпЛА є інноваційним рішенням для підвищення стійкості та живучості системи ТТЗ підрозділу. Безпілотні літальні апарати дозволяють

виконувати ключові завдання ЛЗ, мінімізуючи ризики для особового складу та скорочуючи час реакції на логістичні виклики. У роботі зазначено, що ЗСУ у 2023 році успішно тестували БпЛА для доставки вантажів вагою до 5 кг, що підтверджує їхню ефективність.

Функції БпЛА в ТТЗ, і зокрема у всій системі ЛЗ, пропонується визначити як такі:

- доставка МТЗ, а саме: БпЛА транспортують дрібні запчастини (електронні компоненти, фільтри, інструменти), медикаменти та інші критично важливі матеріали до передової. Прогнозується час доставки: 20-30 хв – на відстань до 10-20 км, порівняно з 3-5 годинами для наземних конвоїв. Зокрема, скорочення часу доставки підвищує K_v до 0,80, оскільки забезпечує швидке відновлення ОБТ;

- технічна розвідка, а саме БпЛА з камерами та датчиками оцінюють стан пошкодженої техніки на полі бою, визначаючи пріоритети для евакуації чи ремонту. Наприклад, дрон Leleka-100 здатен за 10-15 хв оцінити стан танка, що зменшує час технічної розвідки (S_2) з 4 до 1 години;

- моніторинг маршрутів, під час якого БпЛА відстежують стан доріг, виявляють міні поля чи ворожі засідки, що знижує ризик атак на конвої. Прогнозується, зменшення втрат МТЗ до 5% на маршрутах постачання;

- використання БпЛА передбачає передачу даних у реальному часі до пунктів управління логістикою та дозволяє оперативно коригувати плани постачання і ремонту.

У табл. 5 на основі використаної методики наведено значення K_v і $K_{ж}$ з урахуванням запропонованих рекомендацій.

Таблиця 5

Прогнозоване покращення показників надійності системи логістичного забезпечення танкового (механізованого) батальйону

№ з/п	Заходи	K_v		$K_{ж}$	
		до	після	до	після
1.	Розосередження об'єктів	0,75	0,78	1,0	1,05
2.	Використання БпЛА	0,75	0,81 – 0,83	1,0	1,1
3.	Оптимізація ресурсів	0,75	0,82	1,0	1,08
4.	Сучасні технології	0,75	0,80	1,0	1,1

Отже, наведені дослідження забезпечення надійності функціонування системи ТТЗ дозволяє визначати «вузькі» місця, зокрема в ході бойових дій, та оперативно реагувати на її відновлюваність і живучість за рахунок впровадження організаційно-технічних заходів та сучасних технологій.

Висновки

1. Система ТТЗ *тб* як підсистема ТЗ ЛЗ є складною структурою, що забезпечує бойову готовність техніки у сучасних умовах ведення бойових дій. Основним джерелом поповнення втрат ОВТ за досвідом війни рф проти України є своєчасне відновлення техніки та повернення її в стрій, що підкреслює актуальність дослідження.

Аналіз функціонування системи ТТЗ показує, що вона потребує чіткої організації та оцінки надійності для подолання ризиків.

Контролінг ТТЗ дозволяє виявляти слабкі місця, такі як затримки в постачанні чи збільшення часу відновлення техніки, за допомогою статистичних методів. Показники надійності, зокрема коефіцієнт відновлення та живучості, є основою для підвищення надійності системи ТТЗ загалом.

2. Аналіз функціонування системи ТТЗ свідчить про її ключову роль у забезпеченні техніки *тб* у постійній готовності до застосування. Проте виявлено ряд факторів, що впливають на її функціонування, зокрема, дефіцит ресурсів і складність умов ремонту.

3. Для дослідження надійності системи ТТЗ *тб* у роботі пропонується використовувати математичний апарат теорії масового обслуговування. В роботі система ТТЗ представлена у вигляді графа переходів з відповідними інтенсивністю та ймовірністю у типових умовах застосування цієї системи за призначенням. Параметри математичної моделі, що відповідає графу станів системи ТТЗ *тб*, можуть бути визначені за статистичними даними і в подальшому використовуватися для контролінгу та оптимізації її функціонування. Таке подання системи ТТЗ *тб* сприяє логічному і конкретному визначенню показників її надійності, у т.ч. коефіцієнтів відновлення і живучості. Динамічний аналіз дає можливість досліджувати стан системи у часі як покроково, так і у граничному періоді.

4. У роботі наведено дослідження надійності системи ТТЗ *тб*, що бере участь в оборонній операції протягом 30 діб. Результати дослідження показують повільне зниження коефіцієнтів відновлення. Результати розрахунків за запропонованою методикою показують, що факторами, які знижують ці показники, є затримки в технічній розвідці, тривалий час відновлення запасів матеріально-технічних засобів (МТЗ), а також уразливість логістичних об'єктів та шляхів до ворожих засобів ураження.

5. З метою підвищення коефіцієнтів надійності (K_v та $K_{ж}$) у роботі пропонується комплекс заходів, спрямованих на оптимізацію логістичних процесів, зокрема через розосередження об'єктів ЛЗ (ТЗ),

використання безпілотних літальних апаратів та впровадження сучасних технологій.

6. Найбільший ефект забезпечується за рахунок БПЛА, які скорочують час доставки МТЗ і розвідки, знижують втрати особового складу підрозділів технічного забезпечення. Комплексне застосування заходів підвищує K_v до 0,85 та $K_{ж}$ до 1,2, що сприяє надійному функціонуванню системи ТТЗ на прикладі танкового батальйону в умовах бойових дій.

Подальшими напрямками досліджень забезпечення надійного функціонування підсистеми ТЗ може бути розробка організаційно-штатних структур органів технічного забезпечення, методів і способів відновлення ОВТ з урахуванням досвіду війни рф проти України та застосування сучасних інноваційних технологій ремонту (відновлення) ОВТ.

Список літератури

1. Бойовий статут Сухопутних військ Збройних сил України. Частина II (батальйон, рота). Київ: Вид-во. «Центр учбової літератури», 2022. 304 с.
2. Бойовий статут “Логістика Сухопутних військ Збройних Сил України” (тактичний рівень). БП 4-32(11).01. 2021. 165 с.
3. Білетов В. І. Проблема побудови єдиної системи логістичного забезпечення військових формувань України. Труді університету оборони України. 2010. Вип. 4 (91). С. 81-89.
4. Сисоєв В.В. Концепція моделювання логістичного управління постачанням сил сектора безпеки і оборони держави. Проблеми економіки. 2015. № 3. С. 342–351. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_3_47
5. Старцев В.В., Мусієнко О.П., Гурін О.М., Просяник В.В., Коломійцев О.В. Методики оцінювання ефективності відновлення озброєння та військової техніки Повітряних Сил Збройних Сил України. Збірник наукових праць ДНДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2022. Вип. № 2 (12). DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.14>
6. Старцев В.В., Коломійцев О.В., Гурін О.М., Третяк В.Ф., Пустоваров В.В., Олійник Р.М. Напрями щодо удосконалення системи логістичного забезпечення військових частин (підрозділів) при розміщенні у польових умовах в сучасних збройних конфліктах. Збірник наукових праць ДНДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. Том 14. № 4. 2022. DOI: [10.37701/dndivsovt.14.2022.13](https://doi.org/10.37701/dndivsovt.14.2022.13)
7. Павловський І.В., Твердохлібов В.В., Башкиров О.М. Пропозиції щодо удосконалення системи логістичного забезпечення Збройних Сил України. Озброєння та військова техніка. № 1 (13), 2017. С. 50–54.
8. Баранов Ю., Баранов А., Кузьмичев А. Вибір та обґрунтування показників оцінки ефективності функціонування системи логістичного забезпечення. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. 2019. Том 81. № 3. pp. 291–301. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.477>

9. Баранов Ю., Баранов А., Андрієнко А., Яльницький О., Пашковський В., Корольов О. Рекомендації щодо ліквідації збоїв у процесі управління технічним станом військової техніки в умовах ведення бойових дій. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*. № 2, 3 (85). 2021. С. 239-251.

10. Колесникова Е.В. Прикладные аспекты применения цепей Маркова для моделирования слабо структурированных систем проектного управления. *Информ. технологий в освіті, науці та вир-ві: зб. наук. пр.* Одеса. 2013. Вип. 4 (5). С. 77-82.

11. Максимова М.В. Теоретичні підходи до визначення сутності поняття "контролінг" у банківській діяльності. URL: http://fk.d.khivs.edu.ua/pdf/2012_2/6.pdf

12. Доктрина застосування Сил логістики. Військова публікація : ВКП 4-32(03).01. 2021. 47 с.

13. Доктрина «Об'єднана логістика». Військова публікація : СП 4-00(30)03.01. 2020. 46 с.

14. Юркова Б.Н. Исследование операций. М.: ВИКА, 1990. 528 с.

15. Скільки часу може займати відновлення. URL: https://defence-ua.com/army_and_war/na_remont_odniji_m777_dovelos_brati_chastini_iz_8_poshkodzhenih_tse_hronichna_problema-14734.html

16. Войтенко С.С., Бабич О.О. Метод планування технічного обслуговування і військового ремонту озброєння та військової техніки в сучасних умовах. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 3 (69). С. 50-54. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.06>

17. Кельберт М. Я., Сухов Ю. М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. М.: МЦНМО, 2010. 295 с.

18. Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.

19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

20. Сервіс з вирішення завдань з вищої математики. URL: <https://dio.fan/problems/MCclassicproblem>

21. Serhieiev Alexander, Makogon Helen, Yuri Babkin, Vradii Ivanna, Pelekhatyi Mykyta, Haldobin Oleksandr. Using of mass service models for controlling enterprise logistics systems. *I international scientific conference. "Innovative scientific forum"*. Helsinki. Finland. March 13-14. 2025. pp. 97-99. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15048056>

22. З кожним роком все більше, як купували безпілотними коштом бюджету у 2024. 2025. URL: <https://dozorro.org/blog/z-kozhnim-rokom-vse-bilshe-yak-kupuvali-bezpilotniki-koshtom-byudzhetu-u-2024>

References

1. The Armed Forces of Ukraine (2022), "*Boyovyy statut sukhoputnykh viys'k Zbroynykh syl Ukrayiny. Chastyna II. (Batal'yon, rota)*" [Combat regulations of the ground forces of the Armed Forces of Ukraine. Part II], Tsentr uchbovoyi literatury, Kyiv, 304 p. [in Ukrainian].

2. The Armed Forces of Ukraine (2021), "*Boyovyy statut "Lohistyka Sukhoputnykh viys'k Zbroynykh Syl Ukrayiny"* (tactychnyy riven'). BP 4-32(11).01 [Combat regulations "Logistics of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine" (tactical level). BP 4-32(11).01], Viys'kova akademiya (m. Odesa), Odesa, 165p. [in Ukrainian].

3. Bilyetov V. I. (2010), "Problema pobudovy yedynoi systemy lohistychnoho zabezpechennia viiskovykh formuvan Ukrayiny" [The problem of building a unified system of logistical support for military formations of Ukraine], *Universytet oborony Ukrayiny*, vol. 4(91), pp. 81-89. [in Ukrainian]

4. Sysoyev V. V. (2015), "Kontseptsiiia modeliuvannia lohistychnoho upravlinnia postachanniam syl sektora bezpeky i oborony derzhavy" [The concept of modeling the logistics management of the supply of forces of the security and defense sector of the state]. *Problemy ekonomiky*, vol. 3, pp. 342-351. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_3_47 [in Ukrainian]

5. Startsev V.V., Musiyenko O.P., Hurin O.M., Prosyanyk V.V. and Kolomytsev O.V. (2022), "Metodyky otsynuvannya efektyvnosti vidnovlennya ozbroynnyia ta viys'kovoyi tekhniky Povitryanykh Syl Zbroynykh Syl Ukrayiny" [Methods for assessing the effectiveness of the restoration of weapons and military equipment of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine]. *Derzhavnyy nauko-doslidnyy instytut vyprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroynnyia ta viys'kovoyi tekhniky*, № 2 (12). DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.12.2022.144> [in Ukrainian]

6. Startsev V.V., Kolomytsev O.V., Hurin O.M., Tretyak V.F., Pustovarov V.V. and Oliynyk R.M. (2022), "Napriamy shchodo udoskonalennia systemy lohistychnoho zabezpechennia viiskovykh chastyn (pidrozdiliv) pry rozmishchenni u polovykh umovakh v suchasnykh zbroynykh konfliktakh" [Directions for improving the system of logistical support for military units (subunits) when deployed in field conditions in modern armed conflicts]. *Derzhavnyy nauko-doslidnyy instytut vyprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroynnyia ta viys'kovoyi tekhniky*, vol. 14, № 4, pp. 118-134 DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.14.2022.13> [in Ukrainian]

7. Pavlovskyy I. V., Tverdokhlbov V. V. and Bashkyrov O. M. (2017), "Propozytsii shchodo udoskonalennia systemy lohistychnoho zabezpechennia Zbroynykh Syl Ukrayiny" [Proposals for improving the logistics system of the Armed Forces of Ukraine], *Ozbroynnyia ta viys'kova tekhnika*, № 1 (13), pp. 50-54. [in Ukrainian]

8. Baranov Yu., Baranov A. and Kuz'mychev A. (2019), "Vybir ta obgruntuvannia pokaznykiv otsinky efektyvnosti funktsio-nuvannia systemy lohistychnoho zabezpechennia" [Selection and justification of indicators for assessing the effectiveness of the logistics system], *Natsional'na akademiya Derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrayiny*, vol. 81, № 3, pp. 291-301. <https://doi.org/10.32453/3.v81i3.477> [in Ukrainian]

9. Baranov Yu, Baranov A., Andriyenko A., Yal'nyts'kyy O., Pashkovskyy V. and Korol'ov O. (2021), "Rekomendatsii shchodo likvidatsii zboiv u protsesi upravlinnia tekhnichnym stanom viiskovoi tekhniky v umovakh vedennia boiovykh dii" [Recommendations for eliminating failures in the process of managing the technical condition of military equipment in combat conditions], *Natsional'na akademiya Derzhavnoyi*

prykordonnoyi sluzhby Ukrainy, № 2, 3 (85), pp. 239 - 251. [in Ukrainian]

10. Kolesnykova E.V. (2013), "Prykladnye aspekty pryimeneniya tsepei Markova dlia modelirovaniya slabo strukturyrovannykh system proektnoho upravleniya" [Applied aspects of using Markov chains for modeling weakly structured project management systems], *Inform. tekhnolohiyi v osviti, nausti ta vyr-vi: zb. nauk. pr.*, № 4 (5), pp.77–82. [in Russian]

11. Maksymova M. V. (2014), "Teoretychni pidkhody do vyznachennia sutnosti poniattia "kontrolinh" u bankivskii diialnosti" [Theoretical approaches to defining the essence of the concept of 'controlling' in banking], *Financial and credit activity problems of theory and practice*, Vol. 2 (13), pp. 39–47. DOI: 10.18371/fcaptp.v2i13.25120 [in Ukrainian]

12. *Doctrine of the use of Logistics Forces. VKP 4-32(03).01* (2021), "Doktryna zastosuvannia Syl lohistyky. Viiskova publikatsiia : VKP 4-32(03).01". Komanduvannya Syl lohistyky Zbroynykh Syl Ukrainy, Kyiv, 47 p. [in Ukrainian].

13. *Combat regulations "Logistics of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine" (tactical level). BP 4-32(11).01.* (2021), "Doktryna «Obiednana lohistyka». Viiskova publikatsiia : SP 4-00(30)03.01". Hol. upr. lohistyky HSH ZSU, TSNDI ZSU, 46p. [in Ukrainian].

14. Yurkova B.N. (1990), "*Issledovaniye operatsiy*" [Operations research]. VIKA, Moscow, SU. [in Russian]

15. "Skil'ky chasu mozhe zaymaty vidnovlennya?" [How long can recovery take?], available at: URL: https://defence-a.com/army_and_war/na_remont_odniji_m777_dovelos_bra ti_chastini_iz_8_poshkodzhениh_tse_hronichna_problema-14734.html [in Ukrainian]

16. Voytenko S.S. and Babich O.O. (2021), "Metod planuvannia tekhnichnoho obsluhovuvannia i viiskovoho remontu ozbroien-nia ta viiskovoi tekhniki v suchasnykh

umovakh" [Method of planning technical maintenance and military repair of military equipment in modern minds]. *Kharkivs'kyi natsional'nyi universytet Povitryanykh Syl*, vol. № 3(69), pp. 50-54, DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.066> [in Ukrainian]

17. Kel'bert M. Ya. and Sukhov Yu. M. (2010), "*Veroyatnost' i statistika v primerakh i zadachakh. T. II: Markovskiye tsepi kak otpravnyaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya*" [Probability and statistics in examples and problems. Vol. II: Markov chains as a starting point for the theory of random processes and their applications], MTSNMO, RU. [in Russian]

18. Taha Hamdy A. (2005), "*Vvedenie v issledovanie operatsiy*" [Operations Research: An Introduction], Publishing House "Williams", RU. [in Russian]

19. Ventcel' E. S. (1969), "*Teoriya veroyatnostey*" [Probability theory], Nauka, SU. [in Russian]

20. Service for solving problems in higher mathematics, "Servis z vyrishennia zavdan z vyshchoi matematyky". URL: <https://dio.fan/problems/MCclassicproblem> [in Ukrainian]

21. Serhieiev A., Makogon H., Babkin Yu., Vradii I. Pelekhayti M. and Haldobin O. (2025), "Using of mass service models for controlling enterprise logistics systems", *I international scientific conference. "Innovative scientific forum"*. Helsinki. Finland. March 13-14. 2025. pp. 97-99. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.150480566>

22. More and more every year yak-kupuvali-bezpilotniki-koshtom-byudzhetu-u-2024 (2025), "Z kozhnym rokom vse bilshe, yak kupuvaly bezpilotnymy koshtom biudzhetu u 2024". URL: <https://dozorro.org/blog/z-kozhnim-rokom-vse-bilshe-yak-kupuvali-bezpilotniki-koshtom-byudzhetu-u-2024> [in Ukrainian]

ADVANCED RELIABILITY INDICATORS OF THE OF TANK-TECHNICAL SUPPORT SYSTEM FUNCTIONALITY FOR A TANK BATTALION IN THE MINDS OF COMBAT ACTIVITIES

Helen Makogon, Mykyta Pelekhayti, Yuriy Krasnoshapka, Serhii Kyrychuk, Ivan Mashchenko, Volodymyr Kryvtsun, Yaroslav Mishchenko

The subject of study in the article is a tank (mechanized) battalion logistical support. The goal of the article is to develop a logistics support model allows obtaining quantitative reliability estimates of a tank (mechanized) battalion conducting combat operations in modern conditions. The tasks to be solved are: to present the process of a tank (mechanized) battalion logistical support using the mass service model; to draw the the system states graph and derive analytical dependencies of the LS system recovery coefficient of the survivability coefficient on the time of its transition from one state to another; by solving an optimization problem to investigate the reliability indicators in a tank (mechanized) battalion logistical support system in certain conditions of combat operations, to draw appropriate conclusions and provide recommendations.

The methodological basis of the study was general scientific (analysis and synthesis, systematic approach, logical generalization) and special (reliability theory, mathematical modeling, elements of probabilistic analysis) methods of scientific knowledge. In addition, the practical combat experience of the Armed Forces of Ukraine, the results of analytical reports as well as open source materials were taken into account.

The following results were obtained: the conducted study of the logistics support system reliability of a tank (mechanized) battalion participating in a defensive operation for a period of 30 days revealed a slow decrease in the recovery coefficient and survivability coefficient. Analysis of the calculation results, carried out using the methodology proposed in the work, showed that the main problems reduce the indicators of the stability and survivability of the LS are delays in technical reconnaissance, a long time to restore stocks of material and technical means (MTM), as well as the vulnerability of logistical facilities to enemy weapons. To increase the reliability coefficients (survivability coefficient K_s and recovery coefficient K_r), the work proposes a set

of measures aimed at optimizing logistical processes, in particular through the dispersal of LS facilities, the use of unmanned aerial vehicles and the introduction of modern technologies. The greatest effect is provided by UAVs, which reduce the time for the delivery of MTM and reconnaissance, reducing risks to personnel. The comprehensive application of measures increases K_r to 0.85 and K_s to 1.2, which contributes to the uninterrupted support of the battalion in combat conditions.

Conclusions. 1. A tank (mechanized) battalion logistics support system is a complex structure ensures combat readiness in modern conditions of combat operations. It includes material and technical support that operate in difficult conditions of hybrid warfare, enemy attacks and resource constraints. The analysis shows that the logistics support system requires a clear organization and reliability assessment to overcome challenges. Controlling the logistics support system allows you to identify weaknesses, such as delays in delivery or slow equipment recovery, using statistical methods. Reliability indicators, in particular the recovery and survivability coefficient, are the basis for increasing the reliability of the logistics support system as a whole.

2. Technical support, as a subsystem of the logistics support system, plays a key role in maintaining equipment in working condition, but faces problems of resource shortage and difficult repair conditions. To study the reliability of the logistics support system of a tank (mechanized) battalion, it is proposed to use the mathematical apparatus of the theory of mass service. It is advisable to present the system in the form of a simple graph of transitions with the corresponding intensity and probability in typical conditions of application of this system for its intended purpose. The parameters of the mathematical model, which corresponds to the graph of states of the system $LS\ t(m)b$, can be determined from statistical data and subsequently used for controlling and optimizing its functioning.

3. Dynamic analysis makes it possible to study the state of the system in time both step by step and in the limit period. The implementation of recommendations obtained on the basis of the calculations requires investment, training and coordination with higher levels, but their practical value is confirmed by the experience of the Armed Forces of Ukraine and quantitative calculations.

Keywords: logistics support system, branded chain, dynamic model, reliability indicators, survivability coefficient, recovery coefficient.

УДК 621.452.2, 621.43.019.4

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.49-54>

Ю.М. Мельник^{1*}, В.Д. Ніколюк²

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

² Міністерство оборони України, м. Київ, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МОДЕЛЬНОМУ ПУЛЬСУЮЧОМУ ДЕТОНАЦІЙНОМУ ДВИГУНІ ДО БПЛА

Представлено результати чисельного моделювання термогазодинамічних процесів у модельному пульсуючому детонаційному двигуні за новою будовою. Пульсуючий детонаційний двигун живиться стисненою пально-повітряною сумішшю через обертовий клапан та забезпечує ініціювання детонації за допомогою детонаційної труби. Виявлено можливість створення підвищеного тиску у детонаційній камері, що відкрита з однієї сторони, за рахунок подачі стисненого горючого газового заряду та застосування обертового клапана. В умовах проведених розрахунків отримано на момент закриття обертового клапана підвищений тиск у переддетонаційній камері близько 0,145 МПа та тиск у детонаційній камері близько 0,13 МПа. Виявлено особливості детонаційного згорання у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна, що полягають у загасанні детонації під час виходу детонаційної хвилі з ініціюючої детонаційної труби у переддетонаційну камеру з подальшим реініціюванням детонації у детонаційній камері. Наявність реініціювання детонації підтверджується за розподілом тиску у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна. Реініціювання детонації відбувається через 700 мкс від початку закриття обертового клапана. За результатами числових досліджень підтверджено реалізацію двигуна такого типу.

Ключові слова: детонація, двигун, чисельне дослідження, газодинамічні процеси.

Постановка проблеми

Висока ефективність ударних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) щодо точного ураження цілей та відносно низька їх вартість зумовили інтенсивний розвиток та масове застосування БПЛА в російсько-Українській загарбницькій війні. На початку другої активної фази війни у 2022–2023 рр. переважно застосовувались цивільні БПЛА, які у готовому стані поставлялись до України з незначною їх доробкою під засоби ураження в Україні. З 2024 року в Україні розпочалось масове виробництво власних БПЛА. Разом з тим українські виробники БПЛА стикнулись з проблемою комплектації таких виробів агрегатами та деталями, що переважно виробляються за кордоном. Одним із таких основних агрегатів БПЛА є двигун.

Широке різноманіття БПЛА, яке викликано різноманіттям бойових задач, що вони виконують, зумовлює використання двигунів до БПЛА різних типів (електричні, поршневі, газотурбінні тощо). Організація виробництва типових двигунів до БПЛА

потребує значних фінансових витрат, витрат часу та може бути економічно недоцільною через відсутність конкурентних переваг. Цю проблему можна вирішити шляхом розвитку двигунів в Україні, що можуть бути конкурентоздатними на світовому ринку. Як напрям вирішення цієї проблеми в роботі пропонується розвиток пульсуючих детонаційних двигунів, що можуть бути застосовані на БПЛА середньої маси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У США розробку пульсуючих детонаційних двигунів здійснює компанія NASA's Marshall Space Flight Center за виробничої підтримки компаній United Technology Research Corp. of Tullahoma та Adroit Systems Inc. of Seattle [1]. Ці компанії розробили малорозмірний пульсуючий детонаційний двигун для наземних випробувань у 2005 році. Двигун працює на суміші водню з киснем та створює детонаційні імпульси з частотою 100 Гц. У подальшому було розроблено двигун на обертовій детонації, який станом

Article history: Income 21 April 2025; Revised 11 September 2025; Accepted 01 October 2025; Print 05 December 2025

Мельник Ю.М., ORCID ID: 0009-0003-2918-9505, Ніколюк В.Д. ORCID ID: 0000-0002-6063-692X

* Corresponding author yurii.melnyk@mit.khpi.edu.ua

© Мельник Ю.М., Ніколюк В.Д.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

на 2023 рік безперервно працював протягом 10 хвилин. Залучення провідних розробників світу до таких робіт свідчить про потенційну важливість створення детонаційних двигунів.

Порівняння характеристик пально-повітряних детонаційних двигунів з застосуванням першого та другого законів термодинаміки зроблено в роботі [2]. Порівняння теплової ефективності здійснювалось між детонаційним двигуном на обертовій детонації та пульсуючим детонаційним двигуном. За результатами аналізу виявлено, що пульсуючий детонаційний двигун має перевагу на дозвукових швидкостях, з поступовим наближенням до ефективності двигуна на обертовій детонації зі зростанням швидкості.

Чисельне дослідження пульсуючого детонаційного двигуна здійснено в роботі [3]. Дослідження проводилось з застосування програмного продукту ANSYS. У якості паливної суміші розглянуто стехіометричну суміш водню з повітрям, запалювання якої відбувається в умовах атмосферного тиску. Розглянуто особливості розповсюдження продуктів детонації у разі їх виходу з детонаційної труби через сопло з кутом розкриття 6,5 град. Детонаційна труба мала внутрішній діаметр 36 мм та довжину 1520 мм. Довжина сопла склала 460 мм. За результатами розрахунку виявлено, що під час виходу продуктів детонації через сопло відбувається зниження швидкості руху газового потоку з 1900 м/с до 1225 м/с. Хоча застосування водню робить двигун екологічно чистим, але через складність зрідження такого палива його застосування ускладнено на літальних апаратах.

Аналіз тенденцій розвитку пульсуючих детонаційних двигунів проведено в роботі [4]. Відмічається, що теплова ефективність і співвідношення тяги/маси детонаційного двигуна мають переваги в порівнянні з традиційними реактивними двигунами. Зокрема, теплова ефективність детонаційного двигуна досягає 49% у порівнянні з 29% для двигунів з ізобаричним згоранням.

Враховуючи потенційну перспективність розвитку детонаційних двигунів, в даній роботі запропоновано пульсуючий детонаційний двигун нової будови та представлено результати чисельного моделювання термогазодинамічних процесів у такому двигуні.

Мета досліджень

Метою роботи є чисельне дослідження термогазодинамічних процесів у модельному пульсуючому детонаційному двигуні за новою будовою з виявленням особливостей стиснення горючої суміші та ініціювання детонації у такому двигуні.

Виклад основного матеріалу

Будова та принцип роботи модельного пульсуючого детонаційного двигуна. Модельний пульсуючий детонаційний двигун забезпечує підвищення детонаційної чутливості пально-повітряної суміші шляхом стиснення цієї суміші у камері згорання перед ініціюванням детонації. Для вирішення задачі зростання тиску у камері згорання пульсуючого детонаційного двигуна необхідно забезпечити швидке нагнітання стисненої горючої газової суміші у камеру згорання за короткий час. Умова зростання тиску полягає в тому, що масова витрата газу на вході в детонаційну камеру перевищує масову витрату газу на виході з камери. При цьому необхідно забезпечити швидке закриття детонаційної камери за такий час, щоби під час закриття тиск у камері не знизився до зовнішнього тиску. Цей час повинен бути меншим, ніж характерний час вирівнювання тиску у об'ємі. Для досягнення цієї мети пропонується наступна будова модельного пульсуючого детонаційного двигуна, елементи газодинамічного тракту якого представлено на рис. 1.

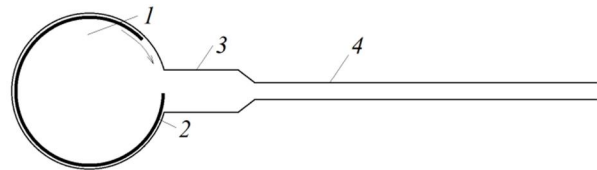


Рис. 1. Елементи газодинамічного тракту модельного пульсуючого детонаційного двигуна:

1 – камера змішування; 2 – обертовий клапан;
3 – переддетонаційна камера; 4 – детонаційна камера

За цією будовою передбачається, що у камері змішування 1 горюча газова суміш перебуває під підвищеним тиском стосовно зовнішнього середовища, а обертовий клапан 2 виходить на фіксовану частоту обертання. Під час перебування вікна клапана напроти входу переддетонаційної камери 2 відбувається наповнення переддетонаційної 3 та детонаційної 4 камер стисненим газом. А за час закриття обертового клапана 2 тиск газової суміші залишається збільшеним стосовно зовнішнього тиску. Після закриття обертового клапана 2 здійснюється ініціювання детонації у переддетонаційній 3 та детонаційній 4 камерах, з подальшим виходом продуктів детонації з пульсуючого двигуна. Джерело ініціювання детонації на рис. 1 не представлено. Далі процес повторюється.

Параметри модельного пульсуючого детонаційного двигуна та умови моделювання. Виходячи з визначеної будови пульсуючого детонаційного

двигуна у програмному продукті ANSYS було створено відповідну модель. Геометрія моделлю двигуна представлено на рис. 2. Згідно з моделі, створено рухоме вікно 1 клапана, яке рухається навколо камери 2 зі стисненою горючою сумішшю. Під час знаходження вікна між камерою 2 та переддетонаційною камерою 3 відбувається виток стисненої горючої суміші з камери 2 у камеру 3 та детонаційну камеру 5. Для ініціювання детонації передбачено ініціатор 4. Передбачається застосування методу ініціювання детонації шляхом переходу детонації з ініціатора 4 в переддетонаційну камеру 3, тобто з труби малого діаметру в трубу великого діаметра. На практиці як ініціатор детонації планується застосування пульсуючої компресійно-детонаційної установки, що описана в роботах [5–8].

Приймалось, що довжина детонаційної камери дорівнює 1 м, а її діаметр складає 40 мм. Розмір переддетонаційної камери складає: діаметр – 80 мм, довжина камери – 0,1 м.

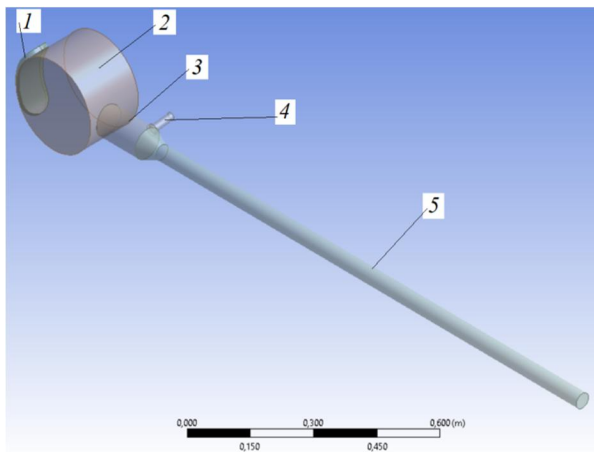


Рис. 2. Газодинамічний тракт модельного пульсуючого детонаційного двигуна у програмному продукті ANSYS:

1 – вікно обертового клапана; 2 – камера зі стисненою горючою сумішшю; 3 – перед-детонаційна камера; 4 – ініціатор детонації; 5 – детонаційна камера

Частота обертання клапана дорівнювала робочій частоті системи ініціювання детонації, яка дорівнює 44 Гц. Діаметр обертового клапана дорівнював 0,22 м, а максимальна довжина вікна обертового клапана по дузі дорівнювала 122 мм. В моделі приймалось, що нагнітання повітря відбувається через бокову поверхню камери зі стисненою горючою сумішшю, що має температуру 303 К. Відповідно, на цій поверхні задавалась гранична умова наявності постійного абсолютного тиску у газі, який дорівнює 0,182 МПа. Як початкові умови приймалось, що переддетонаційна та детонаційна камери заповнені газом під абсолютним тиском 101325 Па.

На виході з детонаційної камери приймалась гранична умова наявності абсолютного тиску, що дорівнює атмосферному. В граничних умовах приймалась стала температура стінок камери, що дорівнювала 303 К. За 1 розрахунковий крок здійснювалось обертання вікна клапана на 0,41 град. Розглядалась суміш пропану з повітрям з масовою долею пропану 0,0643. Для дослідження термогазодинамічного стану газового потоку у модельному пульсуючому двигуні з виходом його на режим з періодичною повторюваністю робочих циклів розрахунок здійснювався протягом 10 с. Процес детонації досліджувався з кроком 0,1 мс протягом 0,1 с. Теплообмін між газом та поверхнями камер не враховувався.

Результати чисельного дослідження нагнітання стисненого газового заряду в детонаційну камеру. Процес ініціювання детонації у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна супроводжується наступними процесами: газодинамічними процесами у газі, що стискається, процесами нерівноважних хімічних реакцій, процесами теплообміну. Ці процеси протікають в умовах дифузії, в'язкості, турбулентних потоків тощо [7, 8]. Виходячи з фізичних процесів, що відбуваються у задачі моделювання, в даній роботі дослідження проведено з застосуванням програмного продукту ANSYS CFX, що є CFD-пакетом для моделювання, в тому числі течії газів з урахуванням турбулентності, теплообміну, хімічних реакцій та згорання. Процес стиснення газового заряду окремо моделювався без урахування процесу згорання з застосуванням програми ANSYS Fluent.

Результати дослідження нагнітання стисненого газового заряду в детонаційну камеру представлено після розрахунку 5 циклів подавання стисненого газового заряду, щоб врахувати вплив попередніх циклів на термогазодинамічний стан газового середовища у камері зі стисненою горючою сумішшю, переддетонаційній та детонаційній камерах перед початком їх заповнення новою порцією газу. Тому в наведених нижче результатах розрахунку умовно прийнято, що заповнення переддетонаційної та детонаційної камер розпочинається з моменту часу, що дорівнює нулю, хоча фактичний час розрахунку на цей момент склав 28,4 мс.

Розподіл тиску на час $t = 1,4$ мс представлено на рис. 3.

На час $t = 1,4$ мс обертовий клапан досягає більше, ніж половину перетину переддетонаційної камери. Спостерігаємо практично рівномірне підвищення тиску у переддетонаційній камері до 0,125–0,14 МПа. В детонаційній камері зростання тиску відбувається лише з боку переддетонаційної камери на ділянці довжиною до 0,175 м, де абсолютний тиск досягає близько 0,1254 МПа.

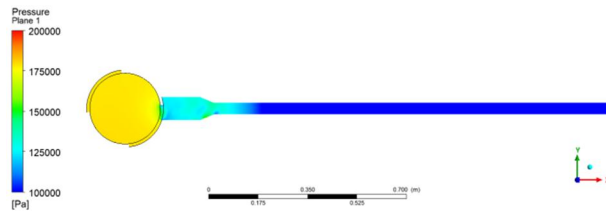


Рис. 3. Поле тиску газу у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна на час $t = 1,4$ мс

Розподіл тиску на час $t = 3,8$ мс представлено на рис. 4.

На час 3,8 мс обертовий клапан перебуває в середині його відкритого стану. Витрата газу з камери зі стисненим газом у напрямку переддетонаційної камери призводить до його незначного зниження до 0,175 МПа.

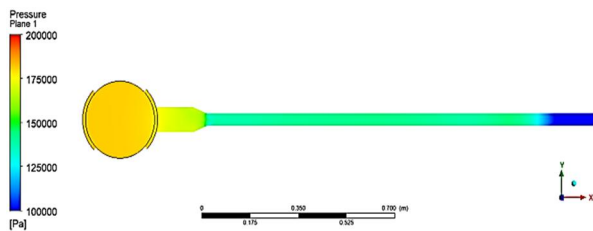


Рис. 4. Поле тиску газу у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна на час $t = 3,8$ мс

Хвиля тиску далі розповсюджується по детонаційній камері, досягнувши понад 1 м цієї камери. Середній тиск у детонаційній камері складає близько 0,15 МПа.

Спостерігаємо, що закриття клапана відбулось за 2 мс, а повний час від початку відкриття до повного закриття обертового клапана склав 7,4 мс. За час закриття відбулось зниження тиску як у переддетонаційній, так і детонаційній камерах. При цьому тиск у переддетонаційній камері знизився до 0,14-0,15 МПа, а в детонаційній камері найбільше зниження тиску відбулось біля виходу з неї.

Розподілу тиску вздовж осі переддетонаційної та детонаційної камер на час 7,4 мс представлено на рис. 5.

За детальним розподілом тиску спостерігаємо наявність підвищеного тиску у детонаційній камері з середнім значенням близько 0,13 МПа, а в переддетонаційній камері середній тиск дорівнює 0,145 МПа. У порівнянні з середніми значеннями тиску на час 4,4 мс маємо зниження тиску у детонаційній камері на 3,8%, та на 20% у переддетонаційній камері. Таке зниження викликано процесом закриття обертового клапана, під час якого нагнітання газу з камери зі стисненим газом обмежується, а виток газу через детонаційну камеру не зупиняється.

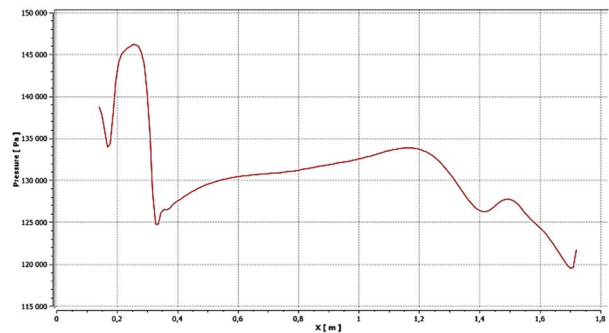


Рис. 5. Розподіл тиску газу вздовж осі переддетонаційної та детонаційної камер на час $t = 7,4$ мс

Розглянемо процес ініціювання детонації у модельному пульсуючому детонаційному двигуні. Розподіл тиску газу на час $t = 520$ мкс від початку закриття обертового клапана представлено на рис. 6.

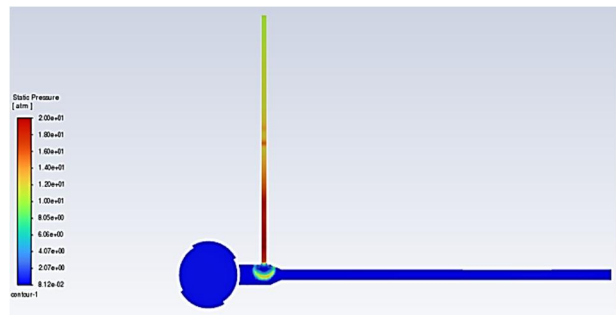


Рис. 6. Поле тиску газу у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна на час $t = 520$ мкс від початку закриття обертового клапана

Спостерігаємо, що детонаційна хвиля досягла краю детонаційної труби та почала розповсюдження по переддетонаційній камері. На довжині детонаційної труби 1 м середня швидкість детонаційної хвилі склала понад 1800 м/с. Перехід одновимірного розширення ударної хвилі, яке є характерним для руху у детонаційній трубу, у майже тривимірне розширення у переддетонаційній камері зумовлює різке зниження тиску на фронті ударної хвилі. Спостерігаємо тиск газу на фронті, що дорівнює 1,2-1,4 МПа. Між фронтом ударної хвилі та входом детонаційної труби у переддетонаційну камеру виникає значне падіння тиску до 0,2 МПа через різке розширення газового потоку. Це свідчить про зрив детонації та розповсюдження по переддетонаційній камері ударної, а не детонаційної, хвилі.

Вздовж детонаційної труби має місце поступове зниження тиску у продуктах детонації в напрямку від фронту детонаційної хвилі та закритого торця детонаційної труби з 2 МПа до 0,8-1 МПа. Такий розподіл тиску є характерним для продуктів детонації, чим підтверджується достовірність розрахунків.

Результати розрахунку тиску газу на час $t = 628$ мкс від початку закриття обертового клапана представлено на рис. 7.

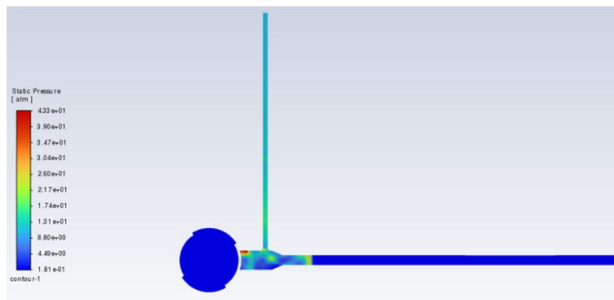


Рис. 7. Поле тиску газу у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна на час $t = 628$ мкс від початку закриття обертового клапана

Вибухове згорання палива у переддетонаційній камері зумовлює зростання тиску в ударній хвилі, що розповсюджується по детонаційній камері, до 2,6 МПа.

Результати розрахунку тиску газу на час $t = 700$ мкс від початку закриття обертового клапана представлено на рис. 8.

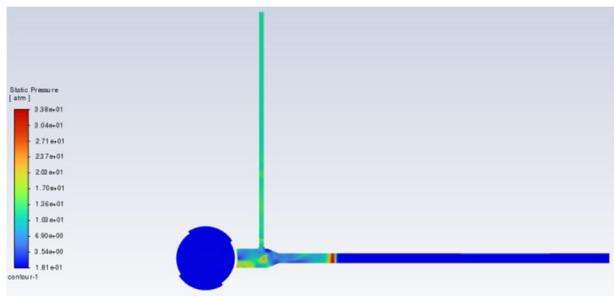


Рис. 8. Поле тиску газу у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна на час $t = 700$ мкс від початку закриття обертового клапана

На час $t = 700$ мкс спостерігаємо зростання інтенсивності ударної хвилі, що розповсюджується по детонаційній камері. Таке зростання відображається у досягненні тиску у 3,38 МПа на фронті ударної хвилі. За цими значеннями можна припустити виникнення детонаційної хвилі. Таким чином, реініціювання детонації відбулось на ділянці детонаційної камери довжиною не більше, ніж 300 мм. Також в області переддетонаційної камери мають місце локальні зростання тиску, що можуть бути пояснені наявністю складних процесів відбиття ударних хвиль від стінок цієї камери.

Висновки

Запропоновано будову пульсуючого детонаційного двигуна з живленням стисненою паливо-повітряною сумішшю через обертовий клапан та з ініціюванням за допомогою детонаційної труби, в якому

забезпечується підвищення детонаційної чутливості паливо-повітряної суміші шляхом стиснення цієї суміші у камері згорання перед ініціюванням детонації, що синхронізовано зі стисненням.

За результатами чисельного моделювання виявлено можливість створення підвищеного тиску у детонаційній камері, що відкрита з однієї сторони, за рахунок подачі стисненого горючого газового заряду та застосування обертового клапана. В умовах проведених розрахунків отримано на момент закриття обертового клапана підвищений тиск у переддетонаційній камері у понад 0,145 МПа та тиск у детонаційній камері близько 0,13 МПа.

За результатами чисельного моделювання виявлено особливості детонаційного згорання у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна, що полягають у загасанні детонації під час виходу детонаційної хвилі з ініціюючої детонаційної труби у переддетонаційну камеру з подальшим реініціюванням детонації у детонаційній камері. Наявність реініціювання детонації підтверджується за розподілом тиску у газодинамічному тракті модельного пульсуючого детонаційного двигуна.

Подальший напрям досліджень буде зосереджений на експериментальній перевірці результатів розрахунків на модельному пульсуючому детонаційному двигуні та практичним впровадженням енергосилової установки на даному типі двигуна у БпЛА та аерозольному генераторі.

Список літератури

1. NASA Validates Revolutionary Propulsion Design for Deep Space Missions - NASA: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-validates-revolutionary-propulsion-design-for-deep-space-missions/> [in English].
2. Braun E., Lu F., Wilson D. Detonation engine performance comparison using first and second law analyses. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 25 - 28 July 2010, Nashville, TN, AIAA 2010-7040. [in English].
3. Macieland E. C., Marques C. S. T. 2-D Simulation with OH* Kinetics of a Single-Cycle Pulse Detonation Engine. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 1249-1263. DOI: 10.29252/jafm.12.04.29593 [in English].
4. Garg A., Dhiman A. Innovative trends in pulse detonation engine, its challenges and suggested solution. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*. 2014, Vol. 1, No 4, pp. 6-10. [in English].
5. Korytchenko K.V., Kucherskyi V.Yu., Krasnoshapka R.Y., Dubinin D.P., Shevchenko S.M., Kovalenko R.I. Comparing of the characteristics of thermal spray coating technologies: air-fuel detonation aluminum spraying onto steel with other technologies. *Funct. Mater.* 2023; 30 (1). pp. 65 – 73. [in English].

6. Maxwell Br. McN, Korytchenko K.V., Shypul O. Numerical Simulation of Compression and Detonation Strokes in a Pulse Compression Detonation System. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. pp. 169 – 178. [in English].

7. Bang B.H., Ahn C.S., Kim Y.T., Lee M.H., Kim M.W., Yarin A.L., Yoon S.S. Deflagration-to-detonation transition in pipes: The analytical theory. *Applied mathematical modelling*. 2018, Vol. 66. pp. 332–343. [in English].

8. Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube. *Journal Combustion and Flame*. 2019, Vol. 204. pp. 227–236. [in English].

References

1. NASA Validates Revolutionary Propulsion Design for Deep Space Missions - NASA: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-validates-revolutionary-propulsion-design-for-deep-space-missions/> [in English].

2. Braun E., Lu F. and Wilson D. (2010), Detonation engine performance comparison using first and second law analyses. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE *Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 25 - 28 July 2010, Nashville, TN, AIAA 2010-7040. [in English].

3. Macieland E. C. and Marques C. S. T. (2019), 2-D Simulation with OH* Kinetics of a Single-Cycle Pulse

Detonation Engine. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. Vol. 12, No. 4, pp. 1249-1263. DOI: 10.29252/jafm.12.04.29593.

4. Garg A. and Dhiman A. (2014), Innovative trends in pulse detonation engine, its challenges and suggested solution. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*. Vol. 1, No 4, pp. 6-10. [in English].

5. Korytchenko K.V., Kucherskyi V.Yu., Krasnoshapka R.Y., Dubinin D.P., Shevchenko S.M. and Kovalenko R.I. (2023); Comparing of the characteristics of thermal spray coating technologies: air-fuel detonation aluminum spraying onto steel with other technologies. *Funct. Mater.* 30 (1). pp. 65-73. [in English].

6. Maxwell Br. McN, Korytchenko K.V. and Shypul O. (2020), Numerical Simulation of Compression and Detonation Strokes in a Pulse Compression Detonation System. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 169 – 178. [in English].

7. Bang B.H., Ahn C.S., Kim Y.T., Lee M.H., Kim M.W., Yarin A.L. and Yoon S.S. (2018), Deflagration-to-detonation transition in pipes: The analytical theory. *Applied mathematical modelling*. Vol.66. pp. 332–343. [in English].

Kiverin A.D. and Yakovenko I.S. (2019), Ignition and detonation onset behind incident shock wave in the shock tube. *Journal Combustion and Flame*. Vol. 204. pp. 227 – 236. [in English].

NUMERICAL STUDY OF THERMOGASDYNAMIC PROCESSES IN A MODEL PULSE DETONATION ENGINE

Yu. Melnyk, V. Nikoliuk

The results of numerical simulation of thermogasodynamic processes in a model pulsed detonation engine of a new design are presented. The pulsed detonation engine is fed with a compressed fuel-air mixture through a rotary valve and provides detonation initiation using a detonation tube. The possibility of creating increased pressure in a detonation chamber that is open on one side by supplying a compressed combustible gas charge and using a rotary valve has been revealed. Under the conditions of the calculations, an increased pressure in the pre-detonation chamber of more than 0.145 MPa and a pressure in the detonation chamber of about 0.13 MPa were obtained at the moment of closing the rotary valve. The peculiarities of detonation combustion in the gas-dynamic tract of a model pulsed detonation engine have been revealed, which consist in the damping of detonation during the exit of the detonation wave from the initiating detonation tube into the pre-detonation chamber with subsequent re-initiation of detonation in the detonation chamber. The presence of detonation re-initiation is confirmed by the pressure distribution in the gas-dynamic tract of the model pulsed detonation engine. Re-initiation of detonation occurs 700 μs from the beginning of the closing of the rotary valve. The results of numerical studies have confirmed the feasibility of this type of engine.

Keywords: detonation, engine, numerical study, gas-dynamic processes.

УДК 623.4+519.852

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.55-67>

О. Серпухов¹, О. Макогон^{1*}, М. Васильєв¹, С. Піскун¹, О. Марченко², О. Лавруг²,
Б. Матушко², М. Чорний²

¹Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Харків

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ СИСТЕМИ АМАР-ADS ДЛЯ ЗРАЗКІВ БТОТ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ПЕРЕВІРКИ СТАТИСТИЧНИХ ГІПОТЕЗ

Стаття присвячена обґрунтуванню технологічних рішень щодо адаптації системи активного захисту АМАР-ADS для використання на зразках ОВТ, що є на озброєнні ЗС України. За рахунок використання математичного апарату перевірки статистичних гіпотез вдалося отримати підхід щодо підбору оптимального набору елементів САЗ АМАР-ADS із гнучкими (SMART) налаштуваннями для мінімізації ймовірності хибного спрацювання давачів шляхом їх диференційованого спрацювання при забезпеченні достатнього рівня завадостійкості.

Дослідження дало змогу отримати наступні результати: 1. Час спрацювання давачів і, відповідно, порогові значення напруги, за яких спрацьовують виконавчі елементи системи захисту АМАР-ADS, визначені як випадкові величини, що дало підґрунтя для використання математичного апарату перевірки багатоальтернативних статистичних гіпотез для розв’язання задачі прийняття рішення на спрацювання давачів та уникнення “дружнього” (за рахунок роботи своїх засобів РЕБ) придушення САЗ. 2. На основі аналізу математичних розрахунків запропонований можливий склад перспективної адаптованої системи активного захисту основних зразків озброєння та військової техніки. 3. Проведена оцінка прогнозованого ефекту від реалізації технічних рішень щодо адаптації САЗ АМАР-ADS до використання її на зразках ОВТ, що є на озброєнні ЗС України, за рахунок мінімізації ймовірності хибного спрацювання давачів при забезпеченні достатнього рівня надійності (пропуску удару) та завадостійкості (впливу “дружнього” придушення).

Ключові слова: система активного захисту бронеоб’єктів, адаптація, диференційоване виявлення загрози, перевірка статистичних гіпотез, лінійне програмування, помилка першого та другого роду.

Постановка проблеми

Досвід більш ніж десятирічної російсько-Української війни свідчить, що ефективна захищеність особового складу є запорукою успішного виконання бойових завдань, і, як наслідок, збереження життя і здоров’я військовослужбовців. Як один із ефективних методів захисту ОВТ (танків, ББМ, БТР тощо) зарекомендували себе системи активного захисту [1]. Вони здатні зберегти екіпаж за рахунок виявлення та нейтралізації різноманітних загроз.

Система активного захисту (САЗ) АМАР-ADS (Advanced Modular Armor Protection Active Defense System) є високотехнологічним продуктом, придатним для визначення різних загроз безпосередньо у ближній зоні машини, а також для аналізу загрози та для її відображення ефективними заходами, які забезпечують виведення з ладу матеріальної частини з високим ступенем надійності. Вона поєднує в собі методи обробки великих обсягів даних, використання сенсорних технологій, математичні методи аналізу, а також автоматизацію прийняття рішень.

Article history: Income 23 July 2025; Revised 01 September 2025; Accepted 09 September 2025; Print 05 December 2025

Серпухов О.В. ORCID ID: 0000-0002-5029-1016, Макогон О.А. ORCID ID: 0000-0003-1112-8707,
Васильєв М.І. ORCID ID: 0000-0003-4635-9257, Піскун С.В. ORCID ID: 0000-0003-1039-8422,
Марченко О.В. ORCID ID: 0000-0003-3718-263X, Лавруг О.О. ORCID ID: 0000-0002-4909-6723,
Матушко Б.П. ORCID ID: 0000-0002-9942-2080, Чорний М.В. ORCID ID: 0000-0001-6024-9340

* Corresponding author helmk@ukr.net

Завдяки модульній конструкції ADS може бути адаптована до широкого спектра зразків бронетанкового озброєння та військової техніки і здатна захистити техніку від великокаліберної зброї, яку не зупинить легка броня [2 – 5].

Між тим у системі AMAP-ADS не передбачені SMART-технології, зокрема виявлення і розпізнання піхоти, яка знаходиться у зоні контролю. Безумовно, надлишкове використання захисту підвищує його надійність, але не є оптимальним з точки зору ресурсозатратності.

Ефективне використання AMAP-ADS на різноманітних зразках ОБТ, у т.ч. тих, що є на озброєнні ЗСУ, можливо при диференційованому спрацюванні давачів. Однак, такий підхід вимагає розроблення алгоритму дій, який би мінімізував ймовірність хибного спрацювання давачів при забезпеченні достатнього рівня надійності (пропуску удару) та завадостійкості (“дружнього”, за рахунок роботи своїх засобів РЕБ, придушення), що свідчить про актуальність дослідження.

Метою дослідження є обґрунтування технічних рішень щодо адаптації (підбору оптимального набору елементів) системи активного захисту AMAP-ADS для ефективного використання на зразках ОБТ, що є на озброєнні ЗСУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

САЗ AMAP-ADS розроблена німецькою компанією ADS Gesellschaft für aktive Schutzsysteme, дочірньою компанією Rheinmetall і IBD Deisenroth Engineering в рамках концепції Advanced Modular Armor Protection. Система також відома під назвою AAC (Active Armor Concept) у Швеції та як Shark у Франції.

У 2019 році була представлена нова версія ADS, відома як Hybrid Protection Module, яка інтегрує компоненти системи активного захисту в пасивну рознесену броню. Він продається на міжнародному ринку під назвою Strike Shield.

AMAP-ADS має переваги перед аналогами (Quick Kill, Iron Fist або Trophy), оскільки діє швидше та створює нефрагментований потік матеріалу. В цьому випадку є можливість мінімізувати побічний збиток військам або цивільним особам, які знаходяться поблизу. Ці обставини є важливим аспектом при веденні бойових дій в міському середовищі, але для їх реалізації передумовлене вдосконалення механізму прийняття рішення про спрацювання системи. Розташування давачів і засобів протидії забезпечує напівсферичний захист [2-5]. Перекриття секторів модулів давач-протидія дозволяє системі перемагати атаки з кількох напрямів. У порівнянні з іншими системами жорсткого знищення тут немає рухомих

частин, що робить ADS легким за вагою і зменшує потреби в електроенергії. У існуючому варіанті система не призначена для повної заміни пасивної броні, оскільки снаряди більшого калібру будуть лише роздроблені, а не повністю відхилені, і для поглинання залишкової енергії осколків потрібна пасивна броня.

За даними розробника, комплекс AMAP-ADS здатний уражати кумулятивні боєприпаси засобів ближнього бою типу РПГ-7, ПТУР, а також бронебійні підкаліберні снаряди протитанкової зброї.

Конструкція комплексу є модульною і може бути адаптована практично до широкого спектра транспортних засобів, її маса – 140 кг для легкових автомобілів і до 500 кг для важких машин (рис. 1).

Водночас згідно з заявою Ульфа Дайзенрота Ulf Deisenroth, президента та генерального директора компанії IBD Deisenroth Engineering, слід враховувати, що “...навіть високоефективний комплекс активного захисту (КАЗ) широкого спектра дії завжди має “спиратися” на значну масу пасивного захисту, яка залежить від вагової категорії машини. Наприклад, в даний час можна говорити, що для ББМ легкої вагової категорії, оснащених КАЗ від ураження кумулятивними засобами ближнього бою та легень ПТУР, рівень 4 STANAG 4569 є мінімально необхідним” [6, 14].



Рис. 1. CV90120, оснащений AMAP-ADS

Відповідно, до захисту машин середньої категорії висуваються більш високі вимоги, включаючи вимоги щодо захисту від імпровізованих вибухових пристроїв певного типу та інших засобів ураження, вимоги, які можна виконати виключно за рахунок збільшення маси пасивної броні.

Основним недоліком САЗ AMAP-ADS є частковий захист проекції бойової машини – тільки на поверхні, розташованій нижче лінії кріплення блоків вибухової речовини. Крім того, спрацювання будь-якого блока повністю знімає захист із площі поверхні, над якою він був закріплений.

Аналіз переваг та недоліків розглянутих реалізацій активного захисту зразків ОВТ дає змогу зробити висновок про доцільність розробки методики їх компонування для підвищення ефективності використання.

Порівняємо з САЗ АМАР-АДС системи активного захисту кінетичного впливу вітчизняного виробництва, такі як “Заслон”, “Бастіон”, “Шершень”. Як переваги зразків САЗ українського виробництва визначасмо те, що вони створюють зону захисту до 5 м від пострілів РПГ, ПТКР, артснарядів до 125 мм навколо ОВТ.

Як основні недоліки комплексів визначимо такі:

- нездатність захищати ОВТ від загроз з верхньої півсфери;
- можливість спрацювання динамічного захисту;
- загроза при спільній дії з власною піхотою;
- схильність до хибних спрацювань;
- значна вага комплексу при недостатній кількості контрбоєприпасів [7].

Зокрема, комплекс активного захисту “Заслон” при установці на танк складається з пульта керування в башті, а також модулів захисту, в кожному з яких знаходиться по два боєприпаси з уражаючими елементами. На танку розміщується кілька таких модулів, при цьому чотири з них розміщуються на надгусеничних нішах танка, що забезпечує прихованість такої установки. У самому боєприпасі, окрім уражаючих елементів, також знаходиться радар виявлення цілі, що працює в міліметровому діапазоні. А в самому броньованому корпусі модуля, що забезпечує захист блока КАЗ від куль стрілецької зброї і осколків, знаходиться і висувний пристрій. Його електродвигуни висувають боєприпаси з похідного в бойове положення після приведення системи в робочий режим екіпажем танка.

На думку експертів [7-9], “виконавчі” елементи САЗ є більш надійнішими у порівнянні з їх аналогами. У якості порівняльного прикладу пропонується розглянути протидронову сіткометну систему НВП “Валлар”, яка класифікується як активний захист кінетичного впливу ближньої дії [8].

Як переваги протидронової сіткометної системи для активного захисту визначимо такі:

- невисока вартість протидронових сіток;
- доцільно встановлювати на неброньовані зразки ОВТ;
- не несе загрозу при використанні на ОВТ спільно з власною піхотою.

Як недоліки визначимо здатність перехоплювати лише FPV-дрони в горизонтальному польоті на висоті до 5 м над зразком ОВТ.

Як приклад реалізації підсистеми виявлення, ідентифікації та цілевказівки у складі САЗ наведемо такі елементи:

- радіолокаційна станція міліметрового діапазону або лазерна станція типу “ЛІДАР”;
- оптичелектронні та радіолокаційні давачі виявлення, ідентифікації та цілевказання;
- бортова обчислювальна підсистема;
- підсистема відображення та передавання інформації.

Як приклад реалізації підсистеми некінетичного впливу можна розглянути такі елементи:

- засоби радіоелектронного придушення в різних частотах, що сумісне з обладнанням ОВТ;
- обладнання для постановки інфрачервоних та лазерних перешкод, знищення електромагнітною або променевою зброєю;
- димові/аерозольні гранати;
- обладнання для зменшення помітності ОВТ в оптичному та тепловому спектрі.

Таким чином, для адаптації САЗ АМАР-АДС до використання його на вітчизняних зразках ОВТ необхідно вирішити завдання визначення оптимального набору елементів підсистеми кінетичного впливу та підсистеми управління із гнучкими (SMART) налаштуваннями для мінімізації ймовірності хибного спрацювання давачів шляхом їх диференційованого спрацювання при забезпеченні достатнього рівня завадостійкості (шкоди “дружнього” придушення).

Виклад основного матеріалу

Структура та основні функції САЗ АМАР-АДС

Традиційно у складі САЗ можна виділити підсистему кінетичного впливу, до якої відносяться такі елементи:

- реактивні гранати (контрбоєприпаси);
- дистанційні артилерійські (кулеметні, гранатометні, гарматні) модулі;
- сіткометні заряди;
- контрбоєприпаси, що встановлюються по периметру корпусу ОВТ.

Зазначимо, що саме варіативним набором цих модулів можуть бути оснащені різні зразки ОВТ, що є на озброєнні ЗС України.

Між тим, оскільки система АМАР-АДС призначена для автоматизованого керування засобами ППО, вона може працювати у взаємодії з модулями підсистеми управління та/або підсистеми виявлення, ідентифікації та цілевказання [7]:

- виявлення і слідування, що виконує функції інтеграції з РЛС, оптичними та інфрачервоними давачами; виявлення, класифікація та супроводження цілей;

- обробка даних і аналіз загроз, що виконує функції оцінки типу загрози, пріоритезація цілей та прогноз траєкторій руху об'єктів;

- управління вогнем з функцією розподілення цілей за вогневими засобами; синхронізація роботи різних установ ППО; автоматизація наведення і пуску ракети;

- інтерфейс оператора із панеллю ситуаційної обізнаності, інтерактивними картами та візуалізацією повітряної обстановки та функцією управління в ручному та автоматичному режимах;

- зв'язка та обмін даними з функцією інтеграції з єдиною системою ППО, шифрований обмін інформацією та зв'язок із зовнішніми командними пунктами та союзними силами;

- симуляція та навчання з функцією створення віртуальних сценаріїв для тренування операторів, аналіз ефективності дій ППО;

- самодіагностика та моніторинг стану системи з функцією контролю працездатності устаткування та автоматичного повідомлення про помилки або несправності.

Як прототип може бути розглянуті СІЗ "Strike Shield", основні ТТХ якої проаналізовані вище, та ADS-Gen3, що використовує новіші радарні давачі, що працюють із меншою потужністю; це зменшує радіус дії радару лише до 30 метрів (98 футів) і призводить до того, що ADS-Gen3 має значно меншу електромагнітну сигнатуру, ніж інші APS з жорстким ураженням. Радарні давачі працюють у діапазоні хвиль від 20 до 30 ГГц і мають вихідну потужність лише 1 Вт. Це призводить до того, що давачі ESM противника можуть виявити ADS-Gen3 лише на відстані до 350 – 400 метрів.

Менший радіус дії радарів також означає, що можна досягти вищої роздільної здатності, дозволяючи системі точніше визначати тип вхідних снарядів і реагувати на ступінчасті атаки систем зброї, такі як РПГ-30. Нижча сигнатура ЕМ зменшує ймовірність збоїв в роботі електроніки транспортних засобів, що знаходяться поблизу [15, 16].

Фактори, що впливають на відстань виявлення загрози

Визначимо, що основними факторами, що впливають на відстань виявлення загрози у системі АМАР-АДС, є швидкість цілі, розмір та ефективна площа розсіювання, траєкторія польоту та тип давача.

Розглянемо основні тактико-технічні характеристики об'єктів, які система АМАР-АДС розпізнає як загрозу.

Протитанкові керовані ракети (ПТКР) мають відносно низьку швидкість (200 – 300 м/с) і великі габарити, що робить їх легшими для виявлення.

Відстань розпізнавання такої загрози радарними давачами становить 100 – 300 м; оптико-електронними

давачами – 50 – 150 м; інфрачервоними давачами – до 100 м. Як особливість при роботі АМАР-АДС є той факт, що завдяки стабільній траєкторії ПТКР часто є основними цілями для систем КАЗ.

Кумулятивні снаряди (з РПГ або гранатометів) мають високошвидкісний старт і відносно малий розмір, а їх розпізнавання складніше через обмежений час на реакцію. Відстань розпізнавання такої загрози: радарними давачами становить 30 – 100 м; оптико-електронними давачами – 20 – 70 м; інфрачервоними давачами – 20–50 м. Особливістю є той факт, що кумулятивні снаряди (з РПГ або гранатометів) зазвичай використовуються на близьких відстанях (до 500 м), що вимагає швидкодіючих сенсорів і систем знищення.

Танкові снаряди (кінетичні підкаліберні боеприпаси) мають дуже високу швидкість (понад 1500 – 1700 м/с), мінімальний розмір і тепловий слід, що ускладнює виявлення. Відстань розпізнавання такої загрози радарними давачами становить 10 – 50 м; оптико-електронними давачами – 10 – 30 м. Особливість і успішне перехоплення цих снарядів є викликом для САЗ, тому більшість систем фокусуються на м'якших загрозах.

Броньбійні осколкові боеприпаси мають менші розміри, ніж ПТКР, але більші, ніж кінетичні боеприпаси. Зазвичай рухаються зі швидкістю 800 – 1000 м/с. Відстань розпізнавання такої загрози радарними давачами становить 50 – 150 м; оптико-електронними давачами – 30 – 100 м. Особливістю виявлення загрози від бронебійних осколкових боеприпасів є те, що вони можуть бути складними для виявлення через нестабільну траєкторію.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) мають великі габарити, низьку швидкість (50 – 150 м/с), чіткий тепловий і радіолокаційний слід. Відстань розпізнавання такої загрози радарними давачами становить 200 – 500 м; оптико-електронними давачами – 150 – 300 м; інфрачервоними давачами – 100 – 250 м. Як особливість зазначимо, що БПЛА можуть бути використані як носії боеприпасів, тому їх виявлення є важливим завданням для сучасних САЗ [7, 8].

Швидкість цілі – чим більш швидший боеприпас, тим менше часу на його виявлення та перехоплення. Наприклад, АРФСДС-снаряди виявляються на мінімальних відстанях через надзвукову швидкість.

Розмір та ефективна площа розсіювання (ЕРР) – великі об'єкти (дрони, ПТКР) виявляються раніше за часом через більший радіолокаційний слід. Малі снаряди (підкаліберні бронебійні) вважаються складнішими для виявлення.

Траєкторія польоту – прямолінійні траєкторії складніші для виявлення, ніж повільні параболічні.

Тип давача – радар ефективний для швидкісних цілей на середніх і далеких відстанях; оптико-електронний давач краще працює на ближчих відстанях; інфрачервоний давач добре виявляє теплові сліди від двигунів ПТКР або дронів.

Отже, великі повільні цілі (ПТКР, дрони) виявляються на відстанях 100 – 300 м; середні, середньошвидкісні цілі (РПГ, мінометні міни) виявляються на 50 – 150 м; малі швидкісні цілі (підкаліберні снаряди) виявляються на 10 – 50 м (рис. 2).



Рис. 2. Можливі засоби ураження озброєння та військової техніки

Як і інші сучасні САЗ (Trophy (Ізраїль), Iron Fist (Ізраїль) та Афганіт (рф) АМАР-АДС має багатоканальні системи давачів, що дозволяють працювати з різними типами загроз на різних відстанях, але ймовірність прийняття хибного рішення внаслідок “накладання” характеристик об’єктів загрози є високою [11, 12].

Узагальнююча інформація про об’єкти загрози у системі АМАР-АДС наведена у табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця відстаней розпізнавання об’єктів загрози у системі АМАР-АДС (м)

Тип боєприпасу	Тип давача/відстань (м)		
	Радарні	Оптико-електронні	Інфрачервоні
Протитанкові ракети (ПТКР)	100–300	50–150	до 100
Кумулятивні снаряди	30–100	20–70	20–50
Танкові снаряди	10–50	10–30	до 20
Бронебійні боєприпаси	50–150	30–100	20–80
БПЛА	200–500	150–300	100–250

Для ефективного розпізнавання об’єкта загрози та унеможливлення прийняття хибного рішення щодо спрацювання виконавчих механізмів системи АМАР-АДС пропонується скористатися математичним апаратом теорії перевірки статистичних гіпотез [13].

Таблиця 2

Характеристики розпізнавання боєприпасів різними давачами САЗ

Тип боєприпасу	Відстань розпізнавання (м)	Особливості виявлення
Протитанкові керовані ракети (ПТКР)	100-300	Великі розміри, середня швидкість (200-400 м/с)
Реактивні гранати (РПГ)	50-150	Менші розміри, низька швидкість (100-300 м/с)
Кумулятивний снаряд (з гармати)	30-100	Висока швидкість (800-1000 м/с), складність виявлення
Підкаліберний бронебійний снаряд (APFSDS)	10-50	Дуже висока швидкість (1500-1800 м/с), мінімальний час на реакцію
Дрон-“камікадзе”	100-300	Низька швидкість (50-200 м/с), можливість маневрування
Мінометна міна	30-150	Параболічна траєкторія, середня швидкість (100-300 м/с)

Робота давачів у системі АМАР-АДС

Система давачів, яка відповідає за протидію загрозі, відстежує, вимірює та визначає тип загрози. Усі дані передаються на центральний комп’ютер, який видає команду на запуск протиснаряда.

Комплекс АМАР-АДС складається з двоступінчастої системи давачів, в якій давач попередження сканує свій конкретний сектор щодо наявності будь-яких об’єктів, що наближаються, аж до 10 м, і в разі виявлення передає дані на другий давач.

Спеціальний детектор визначає, звідки ведеться вогонь, потім бортовий комп’ютер обчислює траєкторію польоту боєприпасу та дає команду пристрою, який знищує його на підльоті. АМАР-АДС вимагає лише 0,56 мс для всієї процедури захисту, починаючи від виявлення та повної ліквідації загрози.

В якості елемента, що виявляє загрозу та виробляє сигнал на спрацювання виконавчих елементів системи АДС, розглядаються набір з пасивних давачів інфрачервоного випромінювання дальнього радіуса дії, лазерні випромінювачі ближнього радіуса дії, захисні боєприпаси у вигляді нерухомих блоків вибухової речовини з металевим облицюванням заданого дроблення, закріплених під нахилом по периметру корпусу бойової машини і електронної апаратури керування.

Пасивні інфрачервоні давачі виявляють інфрачервоне випромінювання від об’єктів в полі зору або відбите від них. На відміну від активних давачів, РІР-сенсори не випромінюють енергію самі, а покладаються на виявлення наявного випромінювання.

Це робить їх енергоефективними та економічно вигідними рішеннями для виявлення руху. PIR-сенсори складаються з детектора та лінзи, яка фокусує інфрачервоне випромінювання на детекторі.

При цьому мікропроцесор виробляє сигнал, пропорційний кількості пікселів, які змінили колір (рис. 3). Динаміка руху формалізується у вигляді кількості пікселів, які змінили колір.

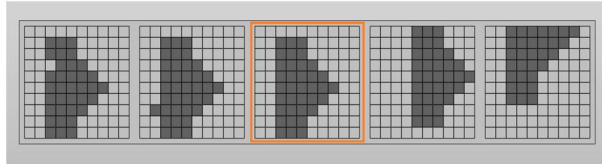


Рис. 3. Зміна кольору пікселів у пасивному інфрачервоному давачі при русі об'єкта загрози

Принцип дії лазерних випромінювачів заснований на здатності електромагнітного випромінювання поширюватися з постійної швидкістю і дає можливість визначати дальність до об'єкта. Так використовується наступне співвідношення

$$L = ct / 2, \quad (1)$$

де L – відстань до об'єкта, м;

c – швидкість поширення випромінювання, м/с;

t – час проходження імпульсу до цілі і в зворотному напрямі [9, 10].

Можна стверджувати, що час проходження імпульсу до цілі і назад у системі АМАР-АДС також є випадковою величиною і використання апарата математичної статистики для моделювання її роботи є обґрунтованим.

Математична модель роботи системи АМАР-АДС щодо прийняття рішення на спрацювання виконавчих елементів

Існує величезне різноманіття умов спрацювання давачів, розпізнання об'єкта загрози, дальність до нього і швидкість його руху тощо, що впливає на ефективність функціонування системи. АМАР-АДС передбачає розпізнання об'єкта загрози, дальність до нього і швидкість його руху. Таким чином, можна вважати випадковими величинами час спрацювання давачів і відповідно порогове значення напруги, за яким спрацювають виконавчі елементи системи захисту.

Виходячи з міркувань, що об'єкт загрози виявляється системою АМАР-АДС у два етапи, і на першому етапі спрацює інфрачервоний давач, то можна прийняти щільність ймовірності визначення відстані до будь-якого об'єкта загрози як $f(x_0) = N(m_0, \sigma_0)$ за статистичними даними спрацювання цього давача

(де x_0 – порогове значення відстані спрацювання інфрачервоного давача).

У цьому випадку ймовірність справдження гіпотези становитиме

$$P(x_0 / H_0) = \int_{x \in \bar{\Omega}} f(x_0) dx. \quad (2)$$

В даному випадку приймаємо, що $f(x_0) = N(125, 25)$.

Аналогічно, щільність ймовірності $f(y_1)$ спрацювання лазерного давача на вогонь РПГ та/або снарядів, що летять зі швидкістю до 2000 м/с, з урахуванням (1) та з метою уніфікації аргументів визначимо як $N(m_{y_1}, \sigma_{y_1}) = N(35, 1)$, де y – порогове значення відстані спрацювання лазерного давача.

Таким чином, щільність ймовірності виявлення загрози у вигляді вогню РПГ та/або снарядів, що летять зі швидкістю до 2000 м/с, становить

$$f(x_0, y_1) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_0}\sigma_{y_1}\sqrt{1-r_{x_0,y_1}^2}} e^{-\frac{\left[\frac{(x_0-m_{x_0})^2}{\sigma_{x_0}^2} - 2r_{x_0,y_1}\frac{(x_0-m_{x_0})(y_1-m_{y_1})}{\sigma_{x_0}\sigma_{y_1}} + \frac{(y_1-m_{y_1})^2}{\sigma_{y_1}^2}\right]}{1-r_{x_0,y_1}^2}}}, \quad (3)$$

$$f(x_0 / y_1) = \frac{f(x_0, y_1)}{f(y_1)},$$

де r_{x_0, y_1} – коефіцієнт кореляції величин x_0 та y_1 .

Природно припустити, що випадкові величини x_0 та y_1 мають додатний кореляційний зв'язок. За [17] припустимо, що $r_{x_0, y_1} = 0,78$.

$$f(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x_0}} e^{-\frac{(x_0-m_{x_0})^2}{2\sigma_{x_0}^2}}, \quad (4)$$

де σ_{x_0}, m_{x_0} – параметри закону розподілу випадкової величини x_0 , який вважатимемо нормальним.

$$f(y_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y_1}} e^{-\frac{(y_1-m_{y_1})^2}{2\sigma_{y_1}^2}}, \quad (5)$$

де σ_{y_1}, m_{y_1} – параметри закону розподілу та параметри закону випадкової величини y_1 , який вважатимемо нормальним.

Аналогічно, виявлення ПТУР розглядаємо як випадкову величину $f(x_0/y_2)$, умовну відносно x_0 та y_2 , де $f(y_2) = N(\sigma_{y_2}, m_{y_2})$:

$$f(y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{y_2}} e^{-\left[\frac{(y_2 - m_{y_2})^2}{\sigma_{y_2}^2}\right]}, \quad (6)$$

тобто

$$f(x_0, y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_0}\sigma_{y_2}\sqrt{1-r_{x_0,y_2}^2}} e^{-\left[\frac{(x_0 - m_{x_0})^2}{\sigma_{x_0}^2} - \frac{2r(x - m_{x_0})(y_2 - m_{y_2})}{\sigma_{x_0}\sigma_{y_2}} + \frac{(y_2 - m_{y_2})^2}{\sigma_{y_2}^2}\right]} \quad (7)$$

Приймаємо, що $N(m_{y_2}, \sigma_{y_2}) = N(30, 0.5)$, а $r_{x_0, y_2} = 0.69$.

Аналогічно загроза, спричинена виявленням кумулятивного заряду, буде обчислена як ймовірність випадкової величини

$$f(x_0, y_3) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_0}\sigma_{y_3}\sqrt{1-r_{x_0,y_3}^2}} e^{-\left[\frac{(x_0 - m_{x_0})^2}{\sigma_{x_0}^2} - \frac{2r(x - m_{x_0})(y_3 - m_{y_3})}{\sigma_{x_0}\sigma_{y_3}} + \frac{(y_3 - m_{y_3})^2}{\sigma_{y_3}^2}\right]} \quad (8)$$

$$N(m_{y_3}, \sigma_{y_3}) = N(15, 1.5);$$

$$r_{x_0, y_3} = 0.78.$$

БпЛА та/або авіаційного боєприпасу

$$f(x_0, y_4) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x_0}\sigma_{y_4}\sqrt{1-r_{x_0,y_4}^2}} e^{-\left[\frac{(x_0 - m_{x_0})^2}{\sigma_{x_0}^2} - \frac{2r(x - m_{x_0})(y_4 - m_{y_4})}{\sigma_{x_0}\sigma_{y_4}} + \frac{(y_4 - m_{y_4})^2}{\sigma_{y_4}^2}\right]} \quad (9)$$

$$r_{x_0, y_4} = 0.61.$$

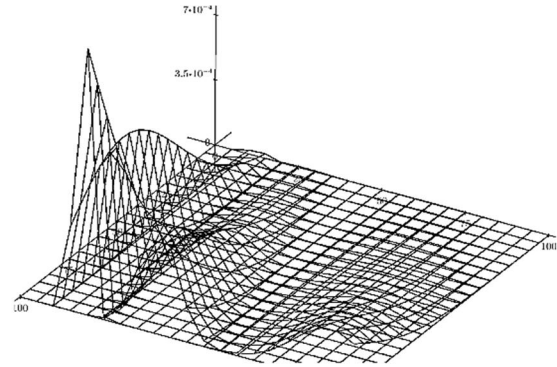
Графічно двовірні щільності ймовірності $f(x, y_i)$, $i = \overline{1,4}$ представлено на рис. 4.

Для визначення оптимального моменту прийняття рішення про запобігання удару – спрацювання давачів та виконавчих механізмів пропонуємо скористатися відомим апаратом теорії ймовірності та перевірки статистичних гіпотез.

Це припущення дозволить робити розрахунки за даними існуючої статистичної вибірки.

За класичною теорією перевірки статистичних гіпотез приймаємо:

H_0 – гіпотеза, яка полягає в тому, що відстань до об'єкта загрози безпечна і спрацювання системи активного захисту не потрібно.



$f1(x, y1, 125, 40, 45, 8, 0.72)$
 $f2(x, y2, 125, 40, 100, 16, 0.69)$
 $f3(x, y3, 125, 40, 20, 3, 0.78)$
 $f4(x, y4, 125, 40, 225, 25, 0.61)$

Рис. 4. Двовірні щільності ймовірності об'єктів загрози у системі АМАР-АДС

Цю гіпотезу будемо перевіряти проти таких альтернатив:

H_1 – гіпотеза, яка полягає в тому, що об'єктом загрози є вогонь РПГ та/або наряди, що летять зі швидкістю до 2000 м/с;

H_2 – гіпотеза, яка полягає в тому, що об'єктом загрози є ПТУР;

H_3 – гіпотеза, яка полягає в тому, що об'єктом загрози є кумулятивний заряд іншого зразка БТОТ;

H_4 – гіпотеза, яка полягає в тому, що об'єктом загрози є авіаційний об'єкт, у т.ч. БпЛА.

Зауважимо, що використання методів прийняття статистичного рішення вимагає визначення основної гіпотези, вірність якої проти інших (альтернативних) і буде перевірятися.

В даній роботі вибір основної гіпотези здійснено із міркувань безперервного здійснення моніторингу за навколишнім середовищем на предмет виявлення загрози.

Тоді, за класичною теорією перевірки статистичних гіпотез приймаємо, що відстань до загрози $x \in \Omega$ є випадковою величиною із щільністю розподілу $f(x/H_0)$, $f(x, y_1/H_1)$, $f(x, y_2/H_2)$, $f(x, y_3/H_3)$, $f(x, y_4/H_4)$.

Звичайно, прийняття тієї чи іншої гіпотези може бути вірним чи помилковим. З урахуванням (3) – (9), ймовірність прийняття i -ї ($i = \overline{1, n}$) гіпотези обраховується як

$$P(x/H_i) = \int \int_{x, y_i} f(x, y_i) dx dy_i. \quad (10)$$

Апріорні ймовірності гіпотез вважаємо відомими $P(H_i)$, $i = \overline{1, n}$.

Завдання полягає у відшукуванні правила, відповідно до якого на підставі спостережень приймається чи відхиляється гіпотеза H_0

Для спрощення ілюстрації механізму прийняття рішення щодо вірності тієї чи іншої гіпотези представимо їх на рис. 5 як одномірні [17].

За правилом Неймана – Пірсона [5] визначимо потужність критерію

$$M(x) = \sum_{i=1}^n \mu_i(x) = \sum_{i=1}^n \int P(H_i) f(x/H_i) dx. \quad (11)$$

Прийняття та відхилення гіпотез H_i , $i = \overline{1, n}$ супроводжується помилками.

Помилка першого роду (“хибна тривога”) виражається як

$$\alpha(x) = \int_{\Omega} P(H_0) f(x/H_0) dx. \quad (12)$$

Помилка другого роду (“невірне визначення загрози”)

$$B(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i(x) = 1 - \sum_{i=1}^n \int P(H_i) f(x/H_i) dx. \quad (13)$$

В цьому випадку задача прийняття рішення на спрацювання давачів може бути сформульована як оптимізаційна задача прийняття рішення за критерієм максимальної потужності при фіксованій безумовній ймовірності помилки першого роду, тобто слід знайти порогове значення x^* , що максимізує вираз (11) за умови

$$\alpha(x) \leq \alpha_{зад} \quad (14)$$

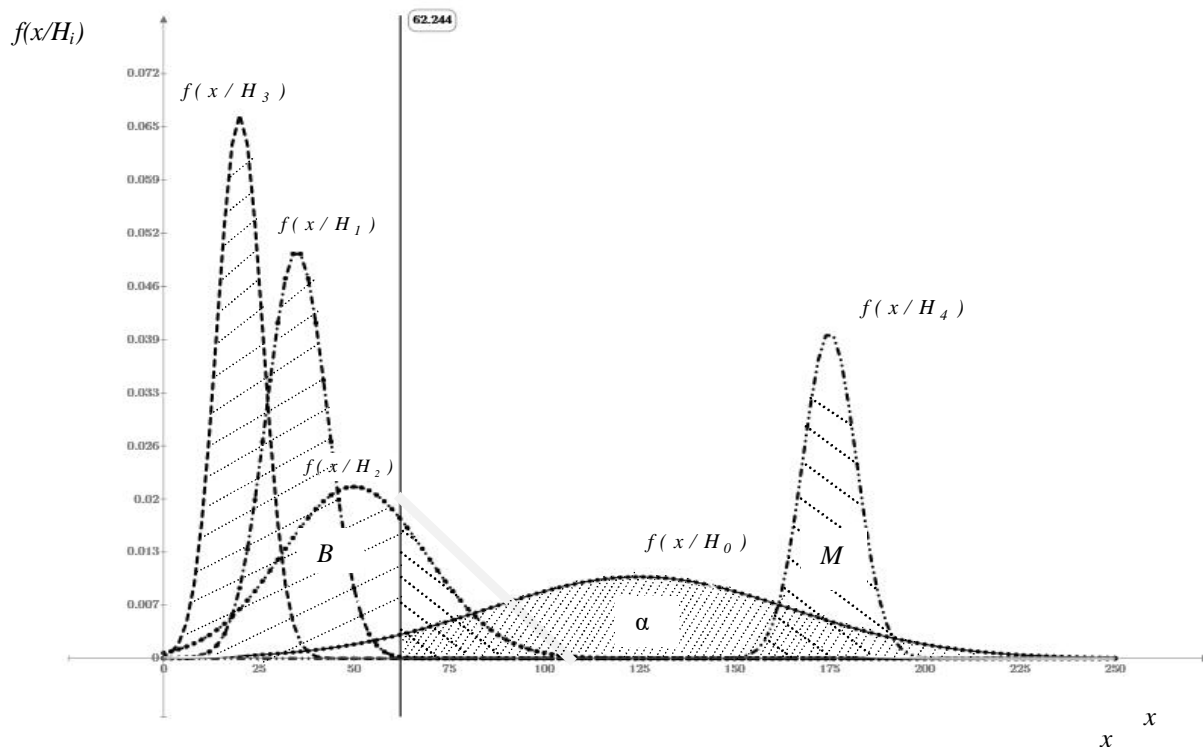


Рис. 5. Перевірка статистичних гіпотез виявлення загрози в системі АМАР-АДС

Шляхом дискретизації безперервної змінної x та заміни інтегралів відповідними інтегральними сумами задача може бути трансформована до класичної розподільної задачі транспортного типу, методи розв’язання якої відомі [18, 19].

Математичне формулювання задачі узгодження роботи елементів САЗ

Припустимо, що до роботи розглянутих елементів САЗ залучається РЛС, яка працює на частоті, близькій до частоти засобу РЕБ, який працює на позиції поряд в напрямку противника, і, відповідно, виникає задача уникнення “дружнього” придушення САЗ.

В термінології задачі перевірки статистичних гіпотез пропонується додати гіпотезу $H_{РЕБ}$, яка полягатиме в тому, що РЕБ працює на частоті, яка є випадковою величиною, підкорену нормальному закону з визначеними параметрами. Для прийняття рішення на спрацювання виконавчих елементів САЗ обмеження (14) буде визначено виразом

$$\alpha_{зад} = 1 - \int_{\Omega} P(H_0) f(x/H_{РЛС}) dx, \quad (15)$$

де $f(x/H_{РЛС})$ – щільність ймовірності роботи РЛС, частота роботи якої є випадковою величиною, що підкорена нормальному закону з параметрами

$N(m_{PLC}, \sigma_{PLC})$. Значення m_{PEB}, σ_{PEB} можна визначити за результатами статистичної обробки спостережень роботи РЛС.

За аналогією можна розглянути роботу декількох РЛС та РЕБ. Тоді до математичної моделі буде додана задача перевірки багатоальтернативних статистичних гіпотез [20].

Ілюстративно врахування обмежень щодо ймовірності “дружнього” придушення САЗ зображено на рис. 6. Безпосередній розрахунок сформульованої за (1) – (15) задачі можливо провести за допомогою вбудованих в ПК офісних застосунків та онлайн калькулятора [21].

Ймовірність помилки другого роду може бути інтерпретовано як визначення порогового значення виявлення загрози за умови мінімізації ймовірності “дружнього” придушення роботи САЗ.

На основі аналізу математичних розрахунків може бути обґрунтований можливий склад перспективної системи активного захисту основних зразків озброєння та військової техніки.

На рис. 7 наведений Screen Short, що ілюструє статистичну обробку результатів даних щодо захисту/ураження об’єктів БТОТ при веденні бойових дій [22, 23].

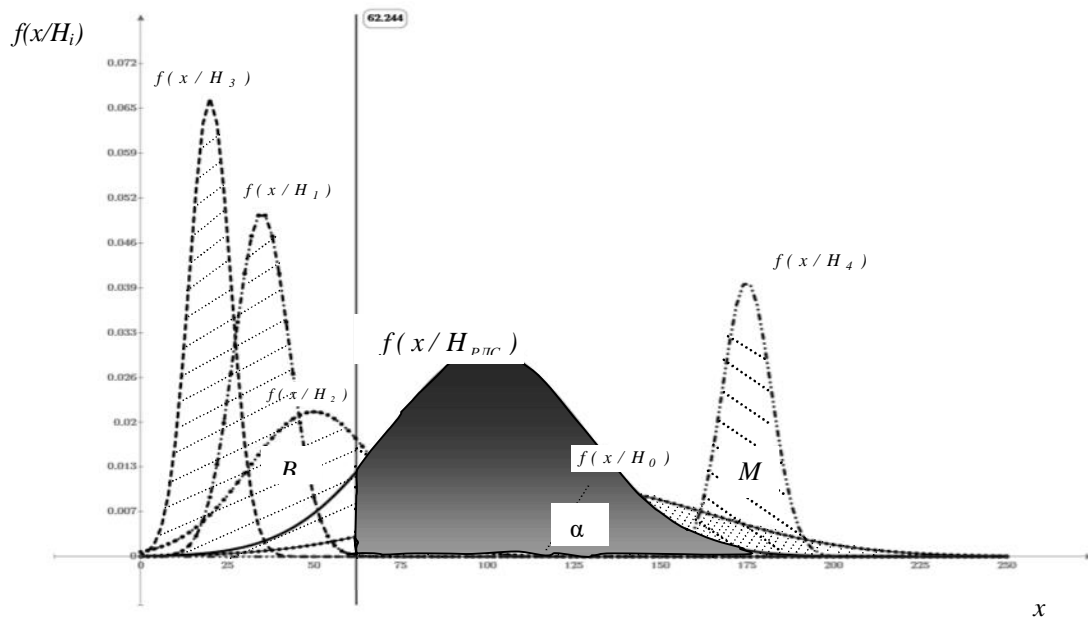


Рис. 6. Врахування обмежень щодо ймовірності “дружнього” придушення САЗ

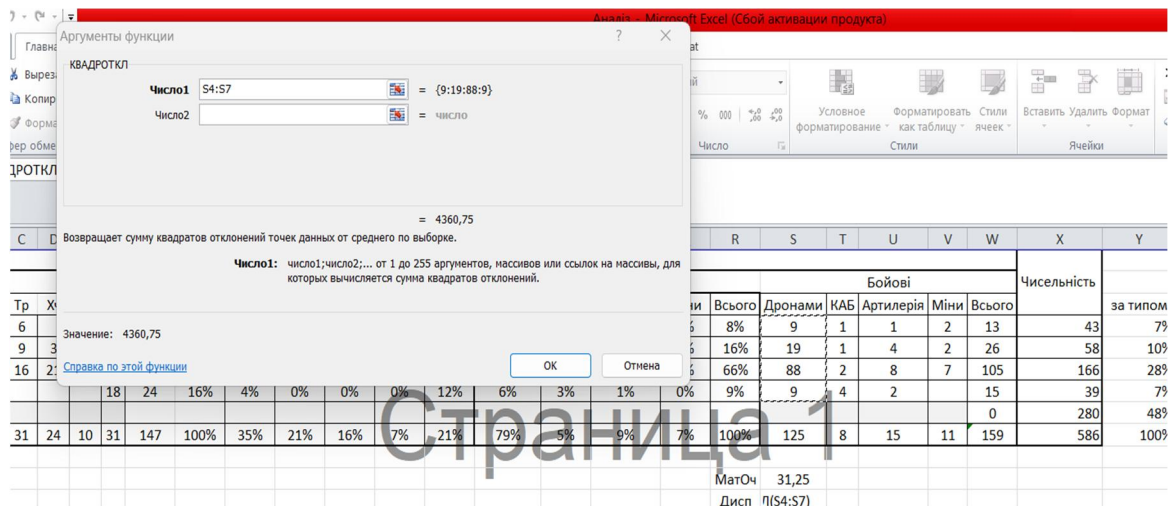


Рис. 7. Статистична обробка результатів даних щодо захисту/ураження об’єктів ОВТ при веденні бойових дій

Можливий склад перспективної системи активного захисту основних зразків озброєння та військової техніки запропонований на основі аналізу математичних розрахунків (табл. 3 та табл. 4) за формулами (1)–(15).

Як приклад, розглянемо таку комплектацію САЗ для Т-64 Б:

- підсистема виявлення об’єктів загрози, до складу якої входять пасивні давачі інфрачервоного

випромінювання дальнього радіуса дії, лазерні випромінювачі ближнього радіуса дії;

- підсистема аналізу ідентифікації та цілевказівки;

- дві APS “Strike Shield” з додатковим SMART-налаштування (за попередніми дослідженнями [22, 23], встановлення при цьому додаткова плати управління та елементів живлення не потрібно);

- або оптико-електронний комплекс “FILIN-O” та додаткової SMART-контролер для реалізації математичних розрахунків перевірки статистичних гіпотез.

Таблиця 3

Ймовірність помилки першого роду при застосуванні елементів підсистеми виявлення, ідентифікації та цілевказання та CA3 AMAP-ADS

№ з/п	Найменування	Ймовірність помилки I роду
1.	РЛС “СНОВ”	0,35
2.	РЛС “БІСКВІТ-КБ”	0,19
3.	РЛС “Лис-М”	0,2
4.	Оптико-електронний комплекс “FILIN-O”	0,11
5.	Оптико-прицільна станція наведення “ОПСН-И”	0,13
6.	APS Strike Shield	0,08
7.	ADS-Gen3	0,09

Таблиця 4

Ймовірність помилки першого роду при застосуванні елементів підсистеми кінетичного і некінетичного впливу та CA3 AMAP-ADS

№ з/п	Найменування	Ймовірність помилки I роду	Ймовірність помилки II роду
1.	“Iron Fist”	0,25	0,38
2.	“Slinger”	0,2	0,35
3.	РЕБ SkyWiper OMNI NT	0,29	0,36
4.	РЕБ “Буковель-ПП”	0,3	0,3
5.	AD Kraken U	0,3	0,3
6.	КОЕП “Штора”	0,33	0,35
7.	“Варта”	0,2	0,3
8.	AMAP-ADS	0,2	0,29

Для апаратної реалізації алгоритму пропонується використання 32-розрядного мікроконтролера PIC32 компанії Microchip. Hardware блока управління дозволяє використовувати його за температури від -45 °C до +50 °C. Використання плати індикації даного контролера в даній статті не розглядається [24].

У якості “дружньої” РЕБ рекомендується розглянути ADS-Gen3.

Підсистема кінетичного впливу у складі:

- реактивні гранати (контрбоеприпаси);
- дистанційні артилерійські (кулеметні, гранатометні, гарматні) модулі;
- сіткометні заряди;
- контрбоеприпаси, що встановлюються по периметру корпусу ОБТ.

Прогнозований ефект від реалізації технічних рішень щодо адаптації CA3 AMAP-ADS до використання її на зразках ОБТ, що є на озброєнні ЗСУ

За розрахунками реалізація запропонованих технічних рішень дозволить отримати такі результати [8, 23]:

- висота виявлення БпЛА та засобів ураження ОБТ (I рівень підсистеми виявлення) становитиме не менш 1,5 км;

- дальність виявлення БпЛА та засобів ураження ОБТ (I рівень підсистеми виявлення) становитиме не менше 1,5 км;

- висота виявлення БпЛА та засобів ураження ОБТ (II рівень підсистеми виявлення) складатиме від 15 до 250 м;

- дальність виявлення БпЛА та засобів ураження ОБТ (II рівень підсистеми виявлення) в горизонтальній проекції складатиме 4-4,5 м.

Крім того, передбачається такий ефект від реалізації технічних рішень щодо підсистеми кінетичного впливу;

- зона впливу на БпЛА та засоби ураження ОБТ використанням реактивних контрбоеприпасів досягатиме радіуса до 45 м та висоти до 90 м;

- зона впливу на БпЛА та засоби ураження ОБТ використанням дистанційних артилерійських модулів досягатиме радіуса до 2,3 км та висоти до 1 км;

- зона впливу на БпЛА та засоби ураження ОБТ використанням контрбоеприпасів ближньої дії досягатиме радіуса до 10 м та висоти до 60 м.

Крім того, передбачається:

- дальність виявлення БпЛА за його радіосигналами в умовах прямої видимості та придушення бортових приймачів сигналів супутникової навігації (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) складатиме не менше 3 км;

- висота придушення бортових приймачів сигналів управління БпЛА в умовах прямої видимості складатиме не менше 40 м;

- дальність придушення бортових приймачів сигналів управління БпЛА в умовах прямої видимості складатиме не менше 150 м.

Комплекс активного захисту може бути механічно інтегрований у гібридні броньові плити зразка БТОТ.

Як приклад, на рис. 8 показано, як комплекс Strike Shield буде механічно інтегрований у гібридні навісні броньові плити на БМП Lynx.



Рис. 8. Комплекс активного захисту, механічно інтегрований у гібридні броньові плити

Замість звичайних додаткових модулів пасивної броні платформа буде мати рознесені пасивні броньові плити, що будуть включати компоненти комплексу активного захисту між зовнішніми та внутрішніми шарами броні, встановленими на корпусі бронетехніки [25].

Висновки

1. Система активного захисту ADS в останньому варіанті виконання інтегрує компоненти системи активного захисту в пасивну рознесену броню. Завдяки модульній конструкції ADS може бути адаптована до широкого спектра зразків бронетанкового озброєння та військової техніки і здатна захистити техніку від великокаліберної зброї, яку не зупинить легка броня. Розташування давачів і засобів протидії забезпечує півсферичний захист. Перекриття секторів модулів давач-протидія дозволяє системі відбивати атаки з кількох напрямів. У порівнянні з іншими системами жорсткого знищення тут немає рухомих частин, що робить ADS легким за вагою і зменшує потребу в електроенергії.

2. У існуючому варіанті система не призначена для повної заміни пасивної броні, оскільки снаряди більшого калібру будуть лише роздроблені, а не повністю відхилені, і для поглинання залишкової енергії осколків потрібна пасивна броня. У системі AMAP-ADS не передбачені SMART-технології, зокрема виявлення і розпізнання піхоти, яка знаходиться в зоні контролю.

Безумовне, надлишкове використання захисту підвищує його надійність, але не є оптимальним з точки зору ресурсозатратності. Ефективне застосування AMAP-ADS можливо при диференційованому спрацюванні давачів. Однак, такий підхід вимагає розроблення алгоритму дій, який би мінімізував ймовірність хибного спрацювання давачів або пропуску удару та “дружнього” придушення. Аналіз переваг та недоліків розглянутих реалізацій активного захисту зразків ОВТ дає змогу зробити висновок про доцільність розробки методики їх компонування для підвищення ефективності застосування.

3. Сенс адаптації САЗ AMAP-ADS до використання її на зразках ОВТ, що є на озброєнні ЗСУ, полягатиме у визначенні оптимального набору компонентів і підсистем та додаткових елементів для забезпечення їх взаємодії із заданим рівнем надійності. В цьому випадку виникає завдання об’єднання інформації, отриманої від модулів підсистеми управління та/або підсистеми виявлення, ідентифікації та цілевказання без втрати якості. Саме з цією метою в роботі пропонується скористатися математичним апаратом перевірки статистичних гіпотез.

4. Введення додаткових елементів у роботу системи пропонується передбачити з метою дотримання балансу потужності та забезпечення SMART-взаємодії існуючих та доданих елементів захисту. Комплекс активного захисту може бути механічно інтегрований у гібридні броньові плити зразка БТОТ.

5. Ефект від реалізації технічних рішень щодо адаптації САЗ AMAP-ADS до використання її на зразках ОВТ, що є на озброєнні ЗСУ, полягатиме у мінімізації ймовірності хибного спрацювання давачів шляхом їх диференційованого спрацювання при забезпеченні достатнього рівня надійності (шкоди “дружнього” придушення).

В подальшому пропонується сформулювати технічні вимоги до системи активного захисту броньованої техніки від FVP-дронів та дронів зі скидами за допомогою постановки радіоелектронних перешкод, кінетичного впливу, відстрілу антидронових сіток та протидронових систем з автономними модулями.

Список літератури

1. СВП 7-00(11). Інформаційний бюлетень з вивчення та впровадження досвіду. Листопад 2024. Київ: КСВ. 56 с.
2. AMAP-ADS. *Defense Update*. 16 Sep 2004–21 Mar 2024. URL: <http://www.defense-update.com/products/a/ads-ibd.htm> (дата звернення: 21. 04.2025).
3. Rheinmetall takes up a majority share in ADS GmbH. *Rheinmetall Defense*. 2011. URL: <https://web.archive.org/web/20120315170646/http://www.rheinmetall-detec.de/index.php?fid=5502&lang=3> (дата звернення: 21. 04.2025).
4. AMAP ADS Active Defence System part demo. *IBD Deisenroth Engineering*. July 7, 2012. Archived from the original on 2021-12-21. Retrieved 1 August 2013. URL: <https://ghostarchive.org/varchive/vTmas41tVhY> (дата звернення: 21. 04.2025).
5. Rust M. Passive Protection Concepts. *Protection technologies*. 2011. URL: https://web.archive.org/web/20111008031621/http://www.ibd-deisenroth-engineering.de/press-coverage.html?file=tl_files%20Fresources%20content-pdfs%20Fpassiv_protection.pdf (дата звернення: 10. 02.2025).
6. IBD Unveils Active Armour Tech to Protect Main Battle Tank. *Defense Mirror*. URL: www.defensemirror.com (дата звернення: 10. 02.2025).

7. Лупандін В.А., Мегельбей Г.В., Самойленко В.М., Тюріна В.Ю. Обґрунтування напрямків захисту об'єктів та озброєння і військової техніки від роїв безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. № 4(45). С. 58-64. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.07>

8. Соломатін Д., Седляр А., Пасічник В., Луцевят О., Слюсаренко М., Попков С. Обґрунтування технічних характеристик до систем активного захисту броньованої техніки від FPV-дронів та дронів зі "скидами". *Міжнародний науковий журнал "Military Science"*. 2025. 2(4). С. 99-116. DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.4.9>

9. Merriam-Webster definition for countermeasure. *Merriam-webster*. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/countermeasure> (дата звернення: 10. 02.2025).

10. Modern alarm security systems URL: *Top Guard Security*. URL: <https://topguard.ua/ua/korysne/416-suchasni-systemy-okhronnoyi-syhnalizatsiyi> (дата звернення: 23.01.2025).

11. Jackson R.G. Novel sensors and sensing, Institute of Physics publishing. Bristol and Philadelphia, USA. 2004. 512 с. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429138348>

12. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О., Дзядевич С.В. та ін. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних давачів нового покоління. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.

13. Вентцель О.С. Теорія ймовірностей. 4-те вид, М.: Наука, 1969. 576 с.

14. Raytheon's Quick Kill Active Protection System defeats one of the most lethal armor-piercing Rocket Propelled Grenades. *Raytheon Company*. URL: <https://raytheon.mediaroom.com/index.php?s=43&item=2251> (дата звернення: 10. 02.2025).

15. Rheinmetall представила комплекс активного захисту Strike Shield. *Military*. 2011. URL: <https://military.com/uk/news/rheinmetall-predstavyla-kompleks-aktyvnogo-zahystu-strike-shield/#:~:text=Strike%20Shield%20-%20третє%20і%20останнє,до%20розміщення%20на%20різні%20бронетехніці> (дата звернення: 10. 02.2025).

16. ADS - Gesellschaft fur aktive Schutzsysteme mbH. *Army Guide*. 2018. <http://www.army-guide.com/rus/product.php?prodID=5967&printmode=1> (дата звернення: 10. 02.2025).

17. Вентцель О.С. Введення в дослідження операцій: підручник. М.: Радянське радіо, 1964. 390 с.

18. Раскин Л.Г. Математические методы исследования операций и анализа сложных систем вооружения ПВО. Х.: ВИРТА, 1988. 177 с.

19. Кириченко И.О., Макогон Е.А. Задача проверки статистических гипотез как задача линейного программирования. *Труды академии*. 1999. Вип. 13. С. 78-82.

20. Кириченко И.О., Раскин Л.Г. Математичні основи теорії вогневих дуелей: монографія. Харків: BIBB MBC України. 2005. 290 с.

21. Programme 4 you. URL: <https://programforyou.ru/calculators/simplex-method>.

22. Oleksandr Serpukhov, Pavlo Horodnichenko, Dmytro Dyachenko Kukhtin Mikola, Oleksandr Marchenko, Melnyk Ivan, Andrii Rudyi, Oleg Trush. Improvement of the perimeter protection system based on the mathematical apparatus of the theory of verification of statistical hypotheses.

XX International Scientific and Practical Conference "Challenges and problems of modern science". January 30-31, 2025. London, United Kingdom. PP. 129-134. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14803299>

23. Городниченко П.С., Серпухов О.В., Пелехатий М. А. Аналіз можливостей адаптації системи АМАР-АДС для зразків озброєння та військової техніки ЗСУ. *XXXIII Міжнародна науково-практична конференція: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD – 2025"*. Харків, НТУ "ХПІ". С. 1751.

24. Документація контролера PIC 32 PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet (05/09/2001). URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviseDoc/61156G.pdf>

25. Нові БМП Lynx для Угорщини отримають активний захист. *Military*. URL: <https://military.com/uk/news/novi-bmp-lynx-dlya-ugorshhyny-otrymayut-aktyvnyj-zahyst/> (дата звернення: 21. 04.2025).

References

1. SVP 7-00(11). (2024), "Informatsiyni biuleten z vyvchennia ta vprovadzhennia dosvidu" [Information bulletin on learning and implementing experience]. KSV. Kyiv. 56 p. [in Ukrainian].

2. AMAP-ADS. *Defense Update*. 16 Sep 2004–21 Mar 2024. URL: <http://www.defense-update.com/products/a/ads-ibd.htm>. (Accessed 21 April 2025).

3. Rheinmetall takes up a majority share in ADS GmbH. *Rheinmetall Defense*. (2011), URL: <https://web.archive.org/web/20120315170646/http://www.rheinmetall-detec.de/index.php?fid=5502&lang=3> (Accessed 21 April 2025).

4. (2013), AMAP ADS Active Defence System part demo. *IBD Deisenroth Engineering*. July 7, 2012. Archived from the original on 2021-12-21. Retrieved 1 August 2013. URL: <https://ghostarchive.org/varchive/vTmas41tVhY>. (Accessed 21 April 2025).

5. Rust M. (2011), "Passive Protection Concepts". *Protection technologies*. URL: https://web.archive.org/web/20111008031621/http://www.ibd-deisenroth-engineering.de/press-coverage.html?file=tl_files%2Fresources%2Fcontent-pdfs%2Fpassiv_protection.pdf (Accessed 10 February 2025).

6. IBD Unveils Active Armour Tech to Protect Main Battle Tank. *Defense Mirror*. URL: www.defensemirror.com. (Accessed 10 February 2025).

7. Lupandin V.A., Mehelbei H.V., Samoilenko V.M. and Tiurina V.Yu. (2021), "Obgruntuvannia napriamkiv zakhystu ob'ektiv ta ozbroiennia i viiskovoi tekhniki vid roiv bezpilotnykh litalnykh aparativ" [Justification of the directions of protection of facilities and weapons and military equipment from swarms of unmanned aerial vehicles]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2021. № 4(45). P. 58-64. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.07> [in Ukrainian].

8. Solomatin D., Sedliar A., Pasichnyk V., Lutseviat O., Sliusarenko M. and Popkov S. (2025), "Obgruntuvannia tekhnichnykh kharakterystyk do system aktyvnogo zakhystu bronovanoi tekhniki vid FPV-droniv ta droniv zi "skydamy" [Justification of technical characteristics for active protection systems for armored vehicles against FPV drones and drones with "resets"]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Military Science"*. 2025. 2(4). P. 99-116. DOI: <https://doi.org/10.62524/msj.2024.2.4.9> [in Ukrainian].

9. Merriam-Webster definition for countermeasure. *Merriam-webster*. URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/countermeasure>. (дата звернення 10. 02.2025). (Accessed 10 February 2025).
10. Modern alarm security systems URL: *Top Guard Security*. URL: <https://topguard.ua/ua/korysne/416-suchasni-systemy-okhoronnoyi-synhnalizatsiyi/> (Accessed 23 January 2025).
11. Jackson R.G. (2004), "Novel sensors and sensing, Institute of Physics publishing". Bristol and Philadelphia, USA. 512 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429138348>
12. Lepikh Ya.I., Hordiienko Yu.O., Dziadevych S.V. ta in. (2011), "Intelektualni vymiriuvalni systemy na osnovi mikroelektronnykh davachiv novoho pokolinnia" [Intelligent measuring systems based on new generation microelectronic sensors]. *Odesa: Astroprint*, 2011. 352 p. [in Ukrainian].
13. Ventsel O.S. (1969), "Teoriia ymovirnostei" [Probability theory]. ed. 4. M.: Nauka, 1969. 576 p. [in Ukrainian].
14. Raytheon's Quick Kill Active Protection System defeats one of the most lethal armor-piercing Rocket Propelled Grenades. *Raytheon Company*. URL: <https://raytheon.mediareom.com/index.php?s=43&item=2251> (Accessed 10 February 2025).
15. (2011), Rheinmetall predstavyla kompleks aktyvnoho zakhystu Strike Shield [Rheinmetall introduced the Strike Shield active defense complex]. *Militarnyi*. URL: <https://militarnyi.com/uk/news/rheinmetall-predstavyla-kompleks-aktyvnogo-zahystu-strike-shield/#:~:text=Strike%20Shield%20-%20trete%20i%20ostanne,%20rozmiщення%20na%20rizniy%20bronetekhnici> (data zvernennia 10. 02.2025). [in Ukrainian].
16. (2018), ADS - Gesellschaft fur aktive Schutzsysteme mbH. *Army Guide*. <http://www.army-guide.com/rus/product.php?prodID=5967&printmode=1>. (Accessed 10 February 2025).
17. Ventsel O.S. (1964), "Vvedennia v doslidzhennia operatsii: pidruchnyk" [Introduction to Operations Research: Textbook]. M.: Radianske radio, 1964. 390 p. [in Ukrainian].
18. Raskyn, L.H. (1988), "Matematycheskye metody yssledovaniia operatsyi u analiza slozhnykh system vooruzhenia PVO" [Mathematical methods of operations research and analysis of complex air defense weapons systems]. Kh.: VYRTA, 1988. 177 p. [in Russian].
19. Kyrychenko Y.O. and Makohon E.A. (1999), "Zadacha proverky statystycheskykh hipotez kak zadacha lyneinoho prohammyrovaniia" [The problem of testing statistical hypotheses as a linear programming problem]. *Trudy akademii*. 1999. Vyp. 13. P. 78-82. [in Russian].
20. Kyrychenko I.O. and Raskin L.H. (2005), "Matematychni osnovy teorii vohnevnykh duelei: monohrafiia" [Mathematical foundations of the theory of fire duels: monograph]. Kharkiv: VIVV MVS Ukrainy. 2005. 290 p. [in Ukrainian].
21. Programme 4 you. URL: <https://programforyou.ru/calculators/simplex-method> (Accessed 10 February 2025).
22. Oleksandr Serpukhov, Pavlo Horodnichenko, Dmytro Dyachenko, Kukhtin Mikola, Oleksandr Marchenko, Melnyk Ivan, Andrii Rudyi and Oleg Trush (2025), "Improvement of the perimeter protection system based on the mathematical apparatus of the theory of verification of statistical hypotheses". *XX International Scientific and Practical Conference "Challenges and problems of modern science"*. January 30-31. London, United Kingdom. PP. 129-134. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14803299>
23. Horodnychenko P.S., Serpukhov O.V. and Pelekhatyi M.A. (2025), "Analiz mozlyvosti adaptatsii systemy AMAP-ADS dlia zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki ZSU" [Analysis of the possibilities of adapting the AMAP-ADS system for samples of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine]. *XKhKhIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia: "Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiiia, osvita, zdorovia. MicroCAD – 2025"*. Kharkiv, NTU "KhPI". P. 1751. [in Ukrainian].
24. (2025), "Dokumentatsiia kontrolera" [Documentation of the PIC 32 controller PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet (05/09/2001)]. RIS 32 PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet (05/09/2001). URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviseDoc/61156G.pdf> [in Ukrainian].
25. (2025), "Novi BMP Lynx dlia Uhorschyny otrymaiut aktyvnyi zakhyst" [New Lynx infantry fighting vehicles for Hungary will receive active protection]. *Militarnyi*. URL: <https://militarnyi.com/uk/news/novi-bmp-lynx-dlya-ugorshhyny-otrymayut-aktyvnyi-zahyst/>. (Accessed 21 April 2025). [in Ukrainian].

RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF ADAPTATION OF THE AMAP-ADS SYSTEM FOR BTOT SAMPLES BASED ON THE MATHEMATICAL APPARATUS FOR VERIFICATION OF STATISTICAL HYPOTHESES

O. Serpukhov, H. Makogon, M. Vasyliiev, S. Piskun, O. Marchenko, O. Lavrut, B. Matuzko, M. Chornyi

The article is devoted to the justification of technological solutions for adapting the AMAP-ADS active protection system for use on munitions in service with the Armed Forces of Ukraine. By using the mathematical apparatus for testing statistical hypotheses, it was possible to obtain an approach to selecting the optimal set of elements of the AMAP-ADS SAZ with flexible (SMART) settings to minimize the probability of false sensor activation by their differentiated activation while ensuring a sufficient level of noise immunity.

The study yielded the following results: 1. The sensor response time and, accordingly, the voltage threshold values at which the actuators of the AMAP-ADS protection system are triggered as random variables, which provided the basis for using the mathematical apparatus for testing multi-alternative statistical hypotheses to solve the problem of making a decision on the operation of sensors and avoiding "friendly" (due to the operation of one's own electronic warfare means) suppression of the SAZ. 2. Based on the analysis of mathematical calculations, a possible composition of a promising adapted active protection system for the main types of weapons and military equipment is proposed. 3. An assessment of the predicted effect of the implementation of technical solutions for adapting the AMAP-ADS SAZ for use on samples of munitions in service with the Armed Forces of Ukraine was carried out by minimizing the probability of false sensor activation while ensuring a sufficient level of reliability (missing a hit) and noise immunity (the influence of "friendly" suppression).

Keywords: active protection system for armored objects, adaptation, differentiated threat detection, statistical hypothesis testing, linear programming, first and second type errors.

UDC 358.1; 358:007.35; 534.6

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.68-89>

T. Stakh, D. Khaustov, V. Bahan, Ya. Khaustov, O. Kyrychuk, Yu. Nastishin*

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

METHOD FOR ESTIMATING PROBABILITIES OF TARGET DETECTION AND RECOGNITION BY THEIR DIMENSIONAL SIGNATURES IN DIGITAL IMAGES FROM THE SIGHTSEEING COMPLEX OF ARMoured VEHICLE WEAPON SYSTEMS

The rapid development of computer vision technologies and artificial intelligence (AI) has opened up new opportunities for real-time battlefield monitoring, while simultaneously creating the challenge of efficiently selecting meaningful electronic images from massive data sets. This paper addresses the problem of automated assessment of the quality of target displaying in a digital image (QTDDI) to improve the efficiency of detecting and recognizing weapons and military equipment (WME). A system of indices of target conspicuity and salience is proposed, which enables quantitative measurement of QTDDI and the introduction of success criteria for performing visual detection and recognition tasks based on a 50% threshold probability of detection and recognition. It is claimed that only such images that meet the success criteria of visual task performance should be considered suitable for further AI-based target recognition, consequently reducing the number of false recognitions.

Special attention is paid to recognition as an intermediate stage in target data acquisition. It is proposed to employ geometric distinctive features of WME samples as their recognition signatures. An analytical expression for the recognition probability as a function of signature dimensions has been theoretically derived, and a criterion for successful performance of the visual recognition task has been established. Such an approach significantly reduces the number of false object identifications in images that do not provide the QTDDI sufficient for AI processing.

The practical implementation of the method has been demonstrated with experimental data obtained from images of the T-64BV main battle tank, collected under field conditions. Images were captured with a digital camera at various distances from the target. For these images, detection probabilities were determined based on the overall target size as the object of interest, and recognition probabilities were determined based on shape anisometry and the dimensions of characteristic signatures. The results confirmed the consistency of the theoretically developed criteria with visual analysis.

The practical significance of the work consists in establishing the methodological basis for the automated selection of sufficient-quality digital images without the involvement of an operator, which allows one to significantly reduce the amount of processed data, increase the accuracy and speed of computer vision systems, and decrease the number of false recognitions. Perspective directions for further research include extending the methodology to thermal images and using digital images for the determination of the distance to a target based on the dimensions of its signatures in electronic images.

Keywords: target data acquisition, digital image, image processing, image fusion, artificial intelligence, visibility, conspicuity by a signature, target saliency, detection, recognition, identification, reconnaissance, unmanned aerial vehicle.

1. Introduction and Problem Statement

With the rapid development of computer technologies and their penetration into the sphere of military applications, previously inaccessible capabilities have emerged for real-time battlefield monitoring and

detection of military equipment and weapon (MEW) systems, including our armored weaponry (AW) by the enemy, as well as for detection of enemy anti-tank weapons (ATW) by our own AW using computer vision and artificial intelligence (AI) technologies.

Article history: Income 01 October 2025; Revised 02 October 2025; Accepted 03 October 2025; Print 05 December 2025

Стах Т.М. ORCID ID: 0000-0001-6421-9755, Хаустов Д.Є. ORCID ID: 0000-0001-5542-2831,

Баган В.Р. ORCID ID: 0000-0002-9265-8445, Хаустов Я.Є. ORCID ID: 0000-0003-4553-0702

Киричук О.А. ORCID ID: 0000-0002-1743-4978, Настишин Ю.А. ORCID ID: 0000-0001-7521-3906

* Corresponding author nastyshyn_yuriy@yahoo.com

© Стах Т.М., Хаустов Д.Є., Баган В.Р., Хаустов Я.Є., Киричук О.А., Настишин Ю.А.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

These modern computer technologies imply the registration of the target-background situation in the form of a digital image, at least in two spectral bands: visible and thermal (infrared).

The enormously bulky flow of TFE images obtained from multiple sources requires a tremendous amount of human labor to review, reject low-quality frames, and select meaningful video materials. Currently, this selection process – identifying frames suitable for target data acquisition (detection, recognition, and identification) – is still being performed manually by the operator.

The presence of low-quality video content can be caused by various factors such as adverse weather conditions, excessively low or blinding video/thermal signal levels, or FPV unmanned aerial vehicles leaving the target's field of view. Without prior rejection of poor-quality video materials, the AI's task of target data extraction becomes analogous to a prospector sifting vast amounts of sand in search of a few grains of gold.

In addition to substantial time consumption and computing resource load, the absence of preliminary selection of video/thermal imagery inevitably leads to a significant increase in the number of false target recognitions by AI – for instance, misidentifying buildings, buses, or trucks as armored vehicles (AV). This selection process of choosing the most significant and high-quality images should therefore be delegated to the computer.

To accomplish this, it is necessary to have methods for assessing the quality of target displaying in a digital image (QTDDI). Available image quality assessment (IQA) methods for civilian use are unsuitable for this purpose. For evaluating the QTDDI, specialized target-oriented express methods are in great demand [1–3].

The system of quantitative indices of the QTDDI developed at the Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy (NASV) [4, 5] – in the form of target conspicuity indices by individual features and saliency indices by a set of distinctive features – enables quantitative evaluation of target detection performance based on saliency indices computed from image brightness tables. According to this system, an image with a higher target saliency index is considered of better quality for detection purposes.

The computation time required to determine the target conspicuity and saliency indices on a single digital image is less than 1 ms and can potentially be reduced to 1 μ s [6], enabling evaluation of up to 10^3 – 10^6 video frames per second. The developed QTDDI index system allows for quantitative estimation of the probability of target detection (varying within the range [0,1]) in a digital image.

However, not every non-zero detection probability implies successful detection during reconnaissance. Developing quantitative criteria of detection success

based on the target's distinctive features – such as its luminance-contrast signature and apparent size in the digital image – constitutes one of the key objectives of this work. As such success criteria, we propose the values of target conspicuity indices corresponding to a 50% probability of detection by a given distinctive feature.

The next stage in the target data acquisition process after detection is recognition. In this study, we introduce distinctive geometric features of the object's design – the so-called recognition signatures – which allow differentiation of a specific MEW sample from other objects. Analytical expressions for the probability of target recognition as a function of signature dimensions have been derived. Based on this analytical form, a recognition success criterion is proposed – the threshold signature size corresponding to a 50% probability of recognition of a given MEW (including AW) sample.

One of the main causes of false target recognition on electronic images by AI systems is the neglect of the fact that not every object in the image is recognizable. According to our concept, a necessary condition for successful recognition is that the probability of recognition by a given signature must exceed 50%. This threshold applies to both the size and the contrast of the signature in the image.

Before applying AI tools for object recognition on an image, it is necessary to verify that its saliency and recognition indices by the given signatures meet the criteria of successful solution of visual detection and recognition tasks. Images that fail to meet these criteria should be considered unsuitable for recognition. This will enable automatic rejection of low-quality imagery and significantly reduce the number of AI misrecognitions.

To demonstrate the practical application of the proposed approach, we conducted an experimental collection of images of the main battle tank (MBT) T-64BV at various observation distances. Using these images, we measured the probabilities of tank detection based on its overall dimensions and the probabilities of recognition based on the anisometry of its shape and the dimensions of different recognition signatures.

Aim of the Study

This study aims to derive theoretically an analytical expression for the probability of recognizing an AV in a digital image based on the characteristic geometric features (signatures) of its shape, to develop a method for estimating the probabilities of target detection and recognition by its dimensional distinctive features, and, on this basis, to establish criteria for successful accomplishing visual detection and recognition tasks in digital images as well as to verify the obtained theoretical results experimentally.

2. Method for assessing the quality of target representation based on its dimensional features of detection and recognition in digital images

2.1. Target data acquisition by digital means of target-field environment imaging.

2.1.1. Indices of target conspicuity by specific features, saliency, and concealment of the military equipment sample in a digital image. In military information sources, several approaches were reported for the quantitative determination of saliency and concealment indices of a military equipment sample. What all these approaches have in common is that the saliency/concealment of an object (a military equipment sample considered as a target) reflects the success/failure of the target data acquisition procedure.

Accordingly, the quantitative level of target saliency or concealment is defined as the probability of success or failure of the statistical random event of collecting information about the military equipment sample as a target.

The probability of the failure event in target data acquisition is defined through the probability of its antipodal (complementary) event Q – the successful event of target data acquisition. The statistical event Q of target data acquisition is the result of three independent internal component events – detection (D), recognition (R), and identification (I) of the target, which correspond to the three stages of the target data acquisition process.

Each of these events – the overall event Q and the internal component events D , R , and I – is associated with a probability (index) of its occurrence, denoted respectively as P_Q and P_D , P_R , P_I .

The internal component events D , R , and I are independent and favorable to the overall event Q . Moreover, these events are such that the failure of any one of the three component events results in the failure of the overall event Q of target data acquisition, which is mathematically expressed as

$$P_Q|_{P_D=0} = P_Q|_{P_R=0} = P_Q|_{P_I=0} = P_Q|_{P_D=0, P_R=0, P_I=0} = 0. \quad (1)$$

Indeed, if the target cannot be detected ($P_D = 0$), then it cannot be recognized ($P_R = 0$) nor, much less, identified ($P_I = 0$), which implies the failure of the overall target data acquisition event ($P_Q = 0$). If the target is detected ($P_D = 1$) but cannot be recognized ($P_R = 0$), then it also cannot be identified ($P_I = 0$), which again implies failure of the overall target data acquisition event ($P_Q = 0$). If the target is detected ($P_D = 1$) and recognized ($P_R = 1$) – for example, as a tank – but cannot be identified as a hostile target

($P_I = 0$), then the entire target data acquisition process is nevertheless unsuccessful ($P_Q = 0$), because these data cannot be used to make a strike decision: the inability to identify the target as hostile creates a risk of fratricide (friendly fire).

Expression (1) is a sufficient condition for classifying the events D , R , and I as being multiplicative with respect to the overall event Q of target data acquisition.

In this case, according to the methodology presented in [7], the probability P_Q of the target data acquisition event Q is equal to the product of the probabilities P_D , P_R , and P_I , which correspond respectively to the events of detection, recognition, and identification

$$P_Q = P_D \cdot P_R \cdot P_I. \quad (2)$$

The probability P_D of target detection depends on the method of target observation, which in turn is determined by the type of image formed as a result of observation. If the observation is carried out by the operator's eye (including with the use of optical observation devices such as binoculars or optical sights) or by an analog video camera with image output to a cathode-ray-tube (CRT) monitor, then the observation deals with an analog image. The procedure for calculating the probability of object detection on an analog image has been described in numerous monographs (see, for example, [8–10]). One of the approaches to determining the probabilities of accomplishing visual target acquisition tasks (detection, recognition, and identification of a hostile target) in an analog image is based on the methodology proposed by John Johnson [11, 12] or its more modern version – the so-called TTP model (*Targeting Task Performance*) [13]. An analysis of these models was presented in [12, 14, 15].

The essence of Johnson's criterion lies in the assumption that *visual target acquisition tasks* – namely *detection*, *recognition*, and *identification* – are considered successfully accomplished if the probability of solving the corresponding visual task exceeds 50% (0.5 on the probability scale [0;1]). The same criterion is followed within the framework of the TTP model (*Targeting Task Performance*). To apply this criterion, a target saliency criterion on the image is introduced. In Johnson's approach, the saliency of the target is represented by the apparent size of the target on the image, expressed in terms of the number N of line-pair divisions of a reticle that cover the target image. The number of line pairs corresponding to a 50% probability of successfully solving a given visual task is denoted as N_{50}^{task} . In the TTP model, the corresponding integral saliency indices, denoted ν and ν_{50}^{task} , are introduced. The target saliency index ν is defined by a specific expression representing the integral of the functions of target contrast and size. The probability of successfully accomplishing the

corresponding visual target acquisition task is then determined by the following expression [16, 17]

$$P_{task}(x) = \frac{\left(x/x_{50}^{task}\right)^y}{1 + \left(x/x_{50}^{task}\right)^y}, \quad (3)$$

where the variables x , x_{50}^{task} take the corresponding values $x = N$, $x_{50}^{task} = N_{50}^{task}$ and $y = 2.7 + 0.7(N/N_{50}^{task})$ in the Johnson model, and $x = v$, $x_{50}^{task} = v_{50}^{task}$, $y = 1.51 + 0.24(v/v_{50}^{task})$ – in the TTP model. The quantities N_{50}^{task} and v_{50}^{task} are considered to be tabulated values. It was shown experimentally in [16] and proved theoretically in [17] that the variables in the Johnson and TTP models are related by the following relationship

$$v = \chi N - v^{(0)}. \quad (4)$$

When performing calculations for a specific visual task, the superscript of the *task* in expression (3) should be replaced by the index corresponding to the respective visual task – *detection* (*D*), *recognition* (*R*), or *identification* (*I*). According to the literature data [17] the resolution thresholds for *detection* N_{50}^D , *recognition* N_{50}^R , and *identification* N_{50}^I are related as $N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = 1 : 4 : 8$. It is important to note that this ratio $N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = 1 : 4 : 8$ numerically coincides with the ratio $\varepsilon_D : \varepsilon_R : \varepsilon_I = 1 : 4 : 8$ of the threshold contrast values for the human visual system [16]. This indicates that, although *de jure* in Johnson's methodology the parameter N_{50}^{task} is ascribed the physical meaning of the target size in the image, *de facto* it is also indirectly related to the target's contrast in the image. The reason is that the quantities N_{50}^{task} are determined experimentally, based on expert visual observations, where observers subconsciously react not only to the target's apparent size but also to its contrast. Therefore, it is not surprising that the same ratios $N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = 1 : 4 : 8$ were found to hold both for the threshold contrast values $\varepsilon_D : \varepsilon_R : \varepsilon_I = 1 : 4 : 8$ and for the resolution parameters $v_{50}^D : v_{50}^R : v_{50}^I = 1 : 4 : 8$.

Indeed, the experimental data obtained in [16] indicate that the value of v_{50}^{task} can be considered related to N_{50}^{task} by the approximate relation $v_{50}^{task} \approx 2.7 N_{50}^{task}$ for all three visual tasks – detection, recognition, and identification. From this it follows that, for the resolution thresholds of *detection* v_{50}^D , *recognition* v_{50}^R , and

identification v_{50}^I within the framework of the TTP model, the same ratio also holds $v_{50}^D : v_{50}^R : v_{50}^I = 1 : 4 : 8$.

The presence of the common variable x in expressions (3) for all visual tasks (detection, recognition, and identification), together with the fulfillment of relations

$$x_{50}^D : x_{50}^R : x_{50}^I = N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = v_{50}^D : v_{50}^R : v_{50}^I = 1 : 4 : 8 \quad (5)$$

may suggest that the probabilities of detection $P_D(x)$, recognition $P_R(x)$, and identification $P_I(x)$ are not *independent functions*. This, in turn, would mean that the statistical events *D*, *R*, and *I* are not independent. Intuitively, it may seem that the higher the probability of detection, the higher one can expect the probability of recognition to be; and the higher the detection and recognition probabilities, the greater – at first glance – appears to be the probability of target identification. Such a relationship could imply that the probabilities $P_D(x)$, $P_R(x)$, and $P_I(x)$ are dependent functions.

In that case, the analytical dependence of the functions $P_D(x)$, $P_R(x)$ and $P_I(x)$, given by expression (3) could imply that expressions (3) and (5) form a system of equations. If this were true, then by eliminating the common variable from this system of equations, one could expect to analytically express the probability of accomplishing one visual task through the probability of accomplishing another visual task. The possibility of analytically expressing one visual task's probability in terms of another would cast doubt either on the validity of expressions (3) and (5) themselves, or on the assumption that the events of detection, recognition, and identification are statistically independent.

Verification of the assumption that the events of detection (*D*), recognition (*R*), and identification (*I*) are independent is important, since the existence of a functional relationship between different visual tasks contradicts the generally accepted premise that the statistical random events of detection, recognition, and identification are independent.

For example, if the numerical value of the target *detection* probability p_D on an electronic image was obtained as a result of measuring the target saliency index Γ for a specific image, one might expect that the probabilities of *recognition* p_R and *identification* p_I could be determined through the known value of p_D , taking into account the relationship (5), according to which $x_{50}^D : x_{50}^R : x_{50}^I = 1 : 4 : 8$. However, such an approach is impossible for several reasons, and there is no contradiction between expressions (3), (5), and the statement that the events of detection, recognition, and identification are independent. The arguments supporting this statement are presented below.

It should be noted that the term *dependence/independence of functions* has a broader meaning than the term *linear dependence/independence of functions*.

Two functions (x) and $g(x)$ sharing a common variable x may be *linearly independent* but still might exhibit a *nonlinear dependence*. A rigorous mathematical proof of the independence of the functions $P_D(x)$, $P_R(x)$ and $P_I(x)$, defined by expression (3), goes beyond the scope and objectives of this paper; therefore, it will be the subject of our subsequent publication. Here, however, we briefly present several arguments that support the mathematical *independence* of the probabilities corresponding to different visual tasks.

Firstly, the presence of a common variable x in the dependencies $P_D(x)$, $P_R(x)$ and $P_I(x)$ is only a necessary condition for their functional dependence, but not a sufficient one. There exist analytical functions of a common argument that remain independent. For example, the functions $f(x) = x$ and $g(x) = \sin(x)$ are independent, even though both are functions of the same variable x .

Secondly, one of the ways to test functions with a common argument for dependence is to construct the inverse dependencies of the argument with respect to the functions, that is, $x(P_D)$, $x(P_R)$, and $x(P_I)$.

Since x is the common argument for all three functions, the relationship $x(P_D) = x(P_R) = x(P_I)$, should hold, from which the dependencies $P_R(P_D)$, $P_I(P_D)$ or $P_I(P_R)$ could, in principle, be determined. However, according to formula (3), the dependencies $P_D(x)$, $P_R(x)$ and $P_I(x)$ are transcendental sigmoid functions, and therefore, it is impossible to express the inverse functions $x(P_D)$, $x(P_R)$, and $x(P_I)$ in analytical quadratures. The impossibility of expressing the common argument x of the functions $f(x)$ and $g(x)$ in terms of the functions f and g themselves within analytical quadratures is an indication that the functions $f(x)$ and $g(x)$ are *independent*.

Thirdly, in order to determine, for example, the dependence $P_R(P_D)$ by eliminating the common variable x , the values of the function $x(P_D)$ must be evaluated at those values of $x > x_{50}^R$ for which, according to the Johnson criterion, the visual task of recognition is considered successful. Taking into account relation (5), this condition can be written as $x > 4x_{50}^D$. Since the probabilities $P_{task}(x)$ are sigmoid functions, in the case when $x > 4x_{50}^D$, the detection probability $P_D(4x_{50}^D) = 4^y / (1 + 4^y)$ approaches

saturation, so that $P_D \rightarrow 1$. In the Johnson model, $y(4N_{50}^D) = 2.7 + 0.7(N/N_{50}^{зadachi}) = 5.5$, and therefore, as,

we obtain $P_D(4x_{50}^D) = 0.9995$. For large values of $x > 4x_{50}^D$, as the argument x increases, the computational error in determining the value of $x(P_D)$ from expression (3) tends to infinity. Indeed, the error in determining x from the function $P_D(x)$ can be expressed as follows

$$\Delta x|_{x > 4x_{50}^D} = \frac{\Delta P_D}{\left(\frac{dP_D}{dx}\right)|_{x > 4x_{50}^D}}, \quad (6)$$

where the numerator ΔP_D – the error in determining the detection probability as the target saliency in a digital image according to expression (8) – is a nonzero finite number within the range $]0;1[$, and the denominator represents the derivative of the detection probability with respect to its argument at a given value of $x > 4x_{50}^D$. For the lower limit of the Johnson criterion $N = 4N_{50}^D$,

within the Johnson model we obtain a relative error in determining the parameter N on the order of $2 \times 10^4\%$, which increases following a power-law dependence as the value of N grows. For the lower threshold of the criterion corresponding to the successful accomplishment of the identification task $N = 8N_{50}^D$, the relative error is on the order of $2 \times 10^8\%$. Thus, for large values of $x > 4x_{50}^D$, as x increases, the value of the derivative in the denominator of expression (6)

$\left(\frac{dP_D}{dx}\right)|_{x > 4x_{50}^D} \rightarrow 0$, and consequently, the error in

calculating the value of $x(P_D)$ from expression (3) tends to infinity. A value of $x(P_D)$ determined with infinite error, when substituted into the dependence $P_R(x(P_D))$, results in an infinite error in determining the recognition probability $P_R(P_D)$ as a function of the detection probability P_D . An infinite error in determining $P_R(P_D)$ and $P_I(P_D)$ therefore indicates that, in reality, there is no functional relationship between the probabilities P_D , P_R and P_I , and hence, that the events of detection (D), recognition (R), and identification (I) are independent.

Fourthly, another argument in favor of the independence of the events of detection, recognition, and identification is that, according to definition (3), the probabilities of all these events take on the same value when the corresponding argument assumes the same value

$$P_{task} \big|_{v_{x_{50}^{task}}} = \frac{1}{2} \quad (7)$$

or all values of N_{50}^{task} or v_{50}^{task} , despite the fact that a functional relationship (5) exists between the quantities N_{50}^{task} , and v_{50}^{task} . Thus, under the imposed condition (7), the entire range of values of x_{50}^{task} corresponding to different visual tasks (detection, recognition, and identification) is projected onto a single point $P_{task} = 1/2$. In other words, a single value of the probability $P_{task} = 1/2$ corresponds to a nontrivial domain (set) of values of x_{50}^{task} for different visual tasks. In turn, this means that there is no functional relationship between the quantities corresponding to different visual tasks, i.e., the functions P_D , P_R and P_I are independent, and therefore the statistical events D , R , and I are independent.

The probability P_D of detecting a target in a digital image defines the target's saliency index Γ for that image. Note that hereafter in the text the term *target* denotes an *object of interest* in the image, as commonly used in computer vision theory – a notion broader than the term *military target*. On the battlefield, an object of interest may be a *potential* military target. An object of interest becomes a military target only after the data-collection process for that object has been successfully completed, i.e., when the object has been detected, recognized and identified as hostile and therefore warranting engagement.

The saliency index Γ of a target in a digital image is defined as the probability of detecting the target based on the set of conspicuity features, and is computed from the individual conspicuity indices associated with each feature

$$\Gamma = V \cdot P_s \cdot P_{clutter}, \quad (8)$$

where V is the target visibility index, which in essence represents the conspicuity index based on luminance contrast; P_s is the conspicuity index based on the target's size in the digital image; and $P_{clutter}$ is the conspicuity index of the target against a cluttered background. The procedure for determining the conspicuity indices and the overall saliency index is described in detail in works [4–7, 18].

It is important to note that in the model of the QTDDI, the size-based conspicuity index P_s is an analogue of the probability $P_{task} \left(N/N_{50}^{task} \right)$, which is determined by the target size N on an analog image in the Johnson model, as given by expression (3). However, the experimental determination of the parameter N_{50}^{task} through visual observation and expert evaluation imposes

an implicitly (hidden) expressed functional dependence of this value on the local contrast of the target.

Therefore, in practice, $P_{task} \left(N/N_{50}^{task} \right)$ represents an implicit combination of the target visibility index V and the size-based conspicuity index P_s .

In the TTP model, the dependence $P_{task} \left(\frac{v}{v_{50}^{task}} \right)$ explicitly

incorporates the parameter's dependence on both the target's local contrast and its size. Thus, the probability

$P_{task} \left(\frac{v}{v_{50}^{task}} \right)$ in that model corresponds to a combination

of the indices V and P_s . The advantage of our QTR-EI model is that the indices V and P_s are treated as independent functions, whereas in the TTP model they are functionally combined under the integral sign. This combination makes it impossible to determine separately the individual contributions of conspicuity due to contrast and conspicuity due to size.

The saliency Γ of an armored vehicle (AFV) sample in an electronic image can be evaluated through experimental measurements performed on images obtained from the digital cameras of the tank's sighting and observation complex (SOC), as well as from cameras mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV), using expression (8).

3. Criterion for successful accomplishment of the visual task of target detection by a conspicuity feature

For analog images, the Johnson criterion has proven to be an effective measure, according to which the visual task of target data acquisition is considered successfully accomplished if its probability exceeds 50%. Similarly, in the QTDDI model, parameters can be introduced for the conspicuity indices corresponding to different features, which represent a 50% probability of accomplishing the visual task based on a given conspicuity feature.

3.1. Criterion for successful target detection by the luminance contrast feature.

Similar to the Johnson criterion, the task of target detection by the luminance contrast feature is considered successfully accomplished if the target visibility index

$$V > V_{50} = \frac{1}{2}. \quad (9)$$

According to definitions [15, 16], the target visibility index is determined by the expression

$$V = \begin{cases} \frac{|K| - |K_{th}|}{|K| + |K_{th}|(1 - 2|K|)} & \text{at } |K| \geq |K_{th}|, \\ 0 & \text{at } |K| < |K_{th}| \end{cases} \quad (10)$$

where $|K|$ is the absolute value of the target's local contrast, and $|K_{th}|$ is the threshold value of local contrast that can still (or just) be distinguished by the human eye.

By substituting expression (10) into expression (9), we obtain an expression for the normalized local contrast $|K_{50}|$, which corresponds to a 50% probability of target detection by the luminance contrast feature

$$|K_{50}| = \frac{3|K_{th}|}{1 + 2|K_{th}|}, \quad (11)$$

and consequently, the expression for the criterion of successful target detection by the luminance contrast feature

$$|K| > |K_{50}| = \frac{3|K_{th}|}{1 + 2|K_{th}|}. \quad (12)$$

The value of the threshold contrast $|K_{th}|$ is determined by the so-called Fisher threshold p -level $|K_{th}| = 0.05$ [19, 20]. By substituting the value of $|K_{th}| = 0.05$ into expression (12), we find that the visual task of target detection by the luminance contrast feature is considered successfully accomplished if the normalized local contrast of the target satisfies the condition

$$|K| > 0.14. \quad (13)$$

3.2. Probability and criterion for successful target detection by the size feature in the image.

Detection of a target as an object of interest in a digital image is reduced to the perception of the object as a whole; therefore, its 2D size – the area S – is the key dimensional parameter in the case of target *detection*. For this reason, within the framework of the QTDDI model, the size-based conspicuity index for target *detection* is defined as a Bayesian *geometric probability* [4, 5].

$$P_s = \frac{\frac{S}{S} \left(1 - \frac{s_{th}}{S}\right) - \frac{s_{th}}{S} \left(1 - \frac{S}{S}\right)}{\frac{S}{S} \left(1 - \frac{s_{th}}{S}\right) + \frac{s_{th}}{S} \left(1 - \frac{S}{S}\right)}, \quad (14)$$

where S , s and s_{th} are the 2D sizes, the areas of the target, the target expectation zone (TEZ) [21], and the minimum threshold image element area that can still be distinguished by size, either by a human observer or a computer, respectively. When target detection is performed by a human operator, $s_{th} = l_{th}^2$ corresponds to the area of a square subtending a solid angle of one square arcminute, which represents the average angular

resolution of the human eye. The minimum distance between two points that can be resolved by the human eye at a viewing distance of 50cm from the monitor, corresponding to the average angular resolution of one arcminute, is $l_{th} = 0.145mm$. Hence, for target detection by an operator on an image displayed on a computer monitor, the condition is $l > 0.145mm$. On the image plane, the average visual resolution of one arcminute corresponds to an area of $s_{th} = l_{th}^2 = 0.145^2(mm^2) = 0.021(mm^2)$.

For a 13.3-inch Retina laptop monitor with a resolution of 2560×1600 pixels, the threshold length $l_{th} = 0.145mm$ is approximately comparable to the size of one pixel ($\approx 0.112mm$). For monitors with significantly lower resolutions, for example 800×600 pixels, the pixel size is larger and equals $0.254mm$ for a 10-inch diagonal, $0.381mm$ for a 15-inch diagonal, and $0.432mm$ for a 17-inch diagonal. Since a digital image is displayed on a monitor, the visual resolution of the human eye cannot be better than one pixel. In addition, according to Nyquist [22, 23], the maximum spatial resolution frequency (1 line pair per millimeter), which corresponds to the minimum resolvable spatial period of the monitor (or a video/thermal camera), equals $l_{th} = 2pixels$ (px). Accordingly, the visual resolution of the eye when observing an image on a monitor should not be assumed to be better than two pixels. Therefore, in the following, we assume that $l_{th} = 2px$ and $s_{th} = l_{th}^2 = 4(px^2)$.

Before proceeding, it is necessary to clarify the meaning of the terms TEZ and *geometric probability*. The TEZ refers to a strip (region) within the image where it makes sense to search for the target. The reasoning is that a significant portion of an image may correspond to areas of space where the target definitely cannot be located. For example, it is unreasonable to search for an armored vehicle in the sky, on a water surface, in tree canopies, or in dense forest areas. Therefore, TEZ is typically much narrower than the entire image frame. In most cases, the vertical dimension – the height of the TEZ H – is smaller than the image height, while its length may equal the image frame length L , or it may be smaller $L_s < L$ if there are reasons to restrict the search area on one or both sides of the image. For instance, this may occur when a road along which armored vehicles move passes through a forest, or when there is deep water on both sides of the road.

As for the term *geometric probability*, according to definition [24], it is the probability that a random point will fall within a certain region when that region is defined by a geometric figure. In the case of target search within an image, the “*falling of a random point*” is understood as *the random gaze of an observer falling* within the area of interest (the target) with an area s , which is located within TEZ of area $S = L_s \times H_s$ in the

image. Therefore, the ratio s/S is nothing else but the geometric probability of detecting a target with area s located within the TEZ background of area S . The quantity s_{th} represents the area of the forbidden zone, into which the observer's gaze cannot fall on the image background. Hence, the ratio s_{th}/S corresponds to the probability of non-detection of the target due to the nonzero value of the threshold area s_{th} . With the condition $s_{th} \neq 0$ imposed, the probability of target detection in an electronic image reduces to a Bayesian probability, given by equation (14), where – up to a common coefficient – the numerator represents the conditional probability, and the denominator represents the total probability of detecting a target of area s within a TEZ of area S , under the condition $s_{th} \neq 0$.

After simplification, expression (14) can be rewritten in the form

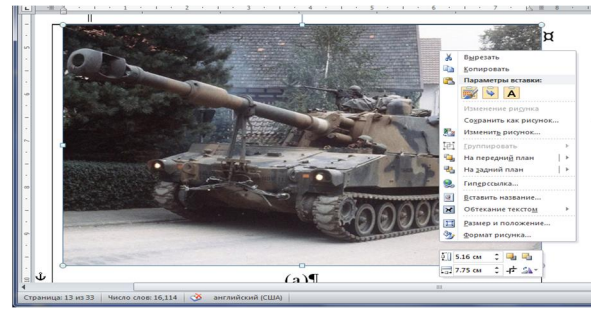
$$P_s = \begin{cases} \frac{s(S-s_{th})-s_{th}(S-s)}{s(S-s_{th})+s_{th}(S-s)} & \text{at } s_{th} \leq s \leq S \\ 0 & \text{at } 0 \leq s \leq s_{th} \end{cases} \quad (15)$$

or, in a more compact form, as

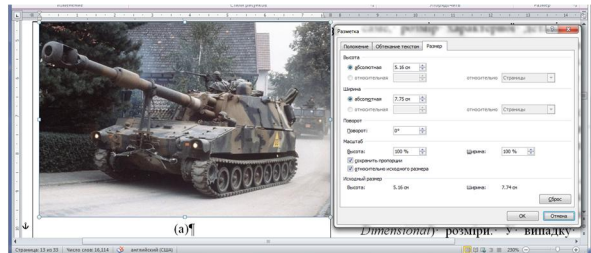
$$P_s = \begin{cases} \frac{1-\frac{s_{th}}{s}}{1+\frac{s_{th}}{s}\left(1-2\frac{s}{S}\right)} & \text{at } s_{th} \leq s \leq S \\ 0 & \text{at } 0 \leq s \leq s_{th} \end{cases} \quad (16)$$

The representation in the form of (16) is convenient because it can be easily analyzed both in units of ordinary length (e.g., in mm^2) and in square pixels (px^2), since all variables enter the formula as dimensionless ratios s_{th}/s and s/S .

The areas of the TEZ S and the target s for a given electronic image can be determined from the digital data of the image itself. For example, if the monitor resolution is $800 \times 600 \text{ pixels}$, the image occupies the entire screen (a full-screen image), and the TEZ covers the entire image, then the horizontal dimension (width or length) of the TEZ is $L=800 \text{ pixels}$, and the vertical dimension (height) is $H=600 \text{ pixels}$. In that case, the area of the TEZ is $S=L \times H=800 \times 600=480,000 \text{ px}^2$. If the image does not occupy the entire screen but is embedded in a document – for example, in Microsoft Word (MW) – then, to determine the image size, one needs to right-click on the image and read its width (L) and height (H) from the bottom part of the drop-down menu (Fig. 1a). Alternatively, one can select “Size and Position” from the drop-down menu, and in the window that appears, click on the “Size” tab (Fig. 1b) to view the corresponding dimensions.



a



b

Fig. 1. Reading the image size: a from the drop-down menu; b – from the “Size” window

As a rule, in MW the image size is displayed by default in centimeters or inches. The image size in pixels can be calculated using the formula

$$\text{Number of pixels} = \frac{\text{Image size (in cm)}}{2.54} \times \text{DPI}, \quad (17)$$

where it is taken into account that $1 \text{ inch}=2.54 \text{ cm}$, and DPI (*dots per inch*) represents the image resolution. By default, in MW the value is $\text{DPI}=96$. (One can verify this by right-clicking on the inserted image file in MW and selecting Properties → Details from the drop-down menu.).

It is important to emphasize that formulas (14)–(16) are intended for calculating the probability of target detection by its size feature specifically in a digital image. A distinctive advantage of digital electronic imagery is that it can be rescaled, increasing the image frame size to an area S convenient for visual observation. Moreover, using the “zoom” function, the image can be enlarged so that the target appears magnified. The zoom procedure consists of cropping the image so that the target, as the object of interest, is centered in the frame, and then stretching the cropped image so that its frame coincides with the frame of the original uncropped image (i.e., “mapping” the cropped image onto the original frame). This mapping occurs due to an increase in the linear pixel size. Equivalently, the zoom procedure can be interpreted as an increase in the linear dimensions of the pixel, which results in an enlargement of the image frame itself; therefore, the frame of the enlarged image is cropped again along the contour of the original (pre-zoom) frame.

If the target size s is significantly larger than s_{th} , the zoom procedure can be used to enlarge the target size s until it becomes comparable to the image size S ; in this case, the size-based conspicuity index of the target $P_s|_{s \rightarrow S} \rightarrow 1$. In other words, if $s \approx s_{th}$, the zoom operation allows the target size in the image to be adjusted so that $s \approx S$ and therefore, according to expression (15), we obtain $P_s|_{s \gg s_{th}} \rightarrow 1$.

The zoom procedure changes the target size s in millimeters, while the size of the image frame remains unchanged. That is, due to the zoom operation, the variable in expressions (15) and (16) is the target size s , whereas $S = \text{const}$ if the dimensions are measured in units of length (e.g., mm^2). As a result, we arrive at an evident conclusion: during the zoom procedure, an increase in s leads to an increase in the ratio s/S , and consequently, to an increase in the probability of target detection P_s .

If the analysis is carried out in units of square pixels (px^2), then when the target size increases in conventional metric units of length (e.g., mm^2), the number of px^2 corresponding to the target remains unchanged, i.e., $S[px^2] = \text{const}$, while, due to the cropping of the image to match the frame size of the original (non-zoomed) image, the total number of pixels corresponding to the entire image $S[px^2]$ decreases by the same factor by which the target size increased in square length units. As a result, we again arrive at a logical conclusion: the zoom procedure leads to an increase in the ratio s/S , and consequently, to an increase in the probability of target detection P_s .

Thus, the higher the image resolution, the greater the number of pixels that correspond both to the entire image and to the target. The resolution of an image is measured by the number of pixels along the horizontal and vertical axes. For example, if the monitor resolution increases from 800×600 to 1320×990 , the number of pixels s corresponding to the target increases by a factor of 2.73. The same applies to the image resolution measured in DPI (dots per inch). Therefore, *the higher the monitor resolution and image DPI, the higher the probability of target detection*. Moreover, higher monitor and image resolution values mean a larger number of pixels per target, while the threshold resolution remains constant at $s_{th} = 4px^2$. According to expression (16), this also leads to an increase in the size-based conspicuity index of the target.

It is important to note that due to the nonzero value $s_{th} \neq 0$, zooming (magnification) cannot be performed indefinitely. Therefore, for values of S close to s_{th} , the question arises:

What should be the value of the target size relative to $s_{th} \neq 0$ for the task of target detection by the size

feature on an electronic image to be considered successfully accomplished?

Similar to the criterion for successful accomplishment of the target detection task by the luminance contrast feature, we introduce the criterion for successful accomplishment of the target detection task by the size feature on in a digital image

$$P_s > (P_s)_{s_0} = \frac{1}{2}. \quad (18)$$

From expressions (18) and (15) (equivalently, (16)), we obtain the value of the target size in the digital image that ensures a 50% probability of target detection

$$s_{50} = \frac{3s_{th}}{1 + 2\frac{s_{th}}{S}}. \quad (19)$$

When using formula (19), it should be highlighted that for a nonzero $P_s \neq 0$, the condition $s > s_{th}$ must be satisfied, and therefore the condition $s_{th} < s < S$ must also hold. The condition $s \gg s_{th}$ is practically always satisfied, and therefore

$$s_{50}|_{s \gg s_{th}} = 3s_{th}. \quad (20)$$

Considering that $s_{th} = 4px^2$, we arrive at the conclusion that the condition for the successful accomplishment of the visual task of target detection can be written in the form

$$s > 12px^2. \quad (21)$$

In other words, for successful detection in the image, the target must have at least the shape of a rectangle with sides of $4 \times 3px^2$ or a square with a side of at least $4px$.

It is evident that increasing the resolution of both the monitor and the image enhances the successful accomplishment of the visual task of target detection by the size feature on an electronic image.

4. Probability of target recognition by its characteristic dimensional features in a digital image

4.1. Characteristic recognition features and the probability of target recognition by a specific conspicuity feature.

4.1.1. Recognition features. The success of recognizing an object in a digital image depends on the conspicuity of its recognition features. The conspicuity features used for target detection – such as target visibility (luminance contrast), image size, and conspicuity against a cluttered background – are not recognition features. In essence, the process of target recognition

also reduces to a detection process, but not of the target as a whole; rather, it concerns the detection of a distinct geometric characteristic or structural element that makes it possible to distinguish, for instance, a combat armored vehicle (CAV) from other types of vehicles. For a tank, such characteristic recognition features include the turret with the gun barrel and the tracks. Therefore, target recognition in an electronic image is based on a separate and independent set of recognition features. It is precisely this property of an independent set of recognition features that determines the independence of the recognition (*R*) and detection (*D*) events. In military literature, *the recognition features of a target* are referred to as *signatures*, which is the Ukrainian transliteration of the English term *signature*, literally meaning “*personal signature*” – in the sense of a distinctive or *characteristic feature*.

The most important *recognition feature (signature)* of a target is *the characteristic shape of the vehicle's contours*. *Shape signatures* such as the elongated form of the gun barrel and the distinctive outline of the turret make it possible to recognize a combat vehicle as a tank. However, these features alone are not always sufficient to distinguish a tank from a self-propelled howitzer on a tracked chassis. For example, a self-propelled artillery system (SPH) such as the M109 howitzer (Fig. 2) in its various modifications – M109A2 (a), M109A7 (b), and M109L with anti-drone protection (c) – resembles a tank in overall shape. An auxiliary distinguishing feature that differentiates an SPH from a tank is *anisometry of form*, meaning the difference in dimensions along different spatial directions.

Firstly, the height-to-length ratio for a tank is noticeably smaller than that for a SPH. Secondly, as a rule (though not always), the barrel length of an SPH is greater than that of a tank, so that the ratio of barrel length to vehicle length is higher for an SPH compared to a tank. Tanks are designed for close combat, infantry support, and breakthrough of the enemy's front line; therefore, they rarely operate individually and usually act within a tank unit, at least in pairs. In contrast, SPHs are intended for long-range fire support, destruction of fortifications and enemy artillery positions, and providing covering fire, and thus operate at a distance from direct engagement zones, using artillery positions to support friendly forces. Hence, *the nature of combat employment* also serves as a recognition feature.

Moreover, the nature of combat operations of AFV leaves a clear imprint on their design characteristics. Because tanks are required to perform missions demanding mobility, maneuverability, and stealth, the turret of a tank is noticeably smaller and lower than that of a SPH. The superstructure above the tracks is also lower in tanks. In contrast, both the turret and superstructure of SPHs are higher and bulkier due to the larger dimensions of the artillery installation they accommodate.

Thus, at least the following recognition features of CAVs can be distinguished, listed in order of their significance:

1. Presence and characteristic shape of specific components:

- gun barrel,
- turret,
- tracks.

2. Anisometry of the hull shape: ratios of

- vehicle height to its length,
- track height (road wheel diameter) to total vehicle height,

- turret length to overall vehicle length.

3. Nature of combat employment.

4. Sound of the running engine.



a



b



c

Fig. 2. Self-propelled howitzer: a – M109A2; b – M109A7; c – M109L with anti-drone protection [25]

Only the first two recognition features listed above are geometric conspicuity features of target recognition in an electronic image.

Both of these features reduce to the size-based conspicuity index, but unlike *the conspicuity* features used for detection, in this case we are dealing not with the size of the target as a whole, but with the size of a characteristic shape or detail of the vehicle that enables its recognition – for example, the gun barrel or the turret, identified by their distinctive shapes or by characteristic differences in overall dimensions, such as the anisometry of form.

In particular, the T-64BV tank has the following dimensions: length $l=9\text{m}$ and height $h=2.16\text{m}$. Hence, $h/l=0.24$. For the M109A2 self-propelled howitzer, $l=9\text{m}$, $h=3.25\text{m}$, and thus $h/l=0.36$. Therefore, the ratio of vehicle height to its length (h/l) could serve as one of the recognition features (signatures) for distinguishing between a tank and an SPH. However, due to the mobility of the vehicle, namely its ability to rotate around its vertical axis, this signature can only be used effectively when the vehicle is observed side-on (perpendicularly). For example, in Figures 2a-c, the self-propelled howitzers are viewed partially from the side. As a result, instead of the true vehicle length l , only the projected length $l_{pr}=l \sin\beta$ on the image plane can be measured, where β is the angle between the line of sight and the longitudinal axis of the vehicle.

Since the value of the projection may vary within the range $l_{pr} \in [0;1]$ depending on the angle β formed by the normal to the image plane and the side plane of the vehicle (the viewing angle), it is clear that the parameter h/l_{pr} cannot always be used to reliably distinguish a tank from a SPH.

The problem with using the ratio h/l for vehicle recognition lies in the fact that only the value of h is *invariant* (remains unchanged) with respect to rotations around the vertical axis, whereas on the image we measure not l itself but its projection l_{pr} , which is not *invariant* with respect to such rotations. Hence, we are led to conclude that *for successful vehicle recognition, it is necessary to use the geometric lengths of structural elements that are invariant with respect to the same axis – whether vertical or horizontal.*

Such a signature could be the ratio of the total vehicle height h to the height of the tracked running gear, i.e., the diameter of the road wheels d_k . In this case, both quantities – d_k and h are invariant with respect to rotations around the vertical axis.

From Table 1 it can be seen that for the T-72, T-90, and Challenger 2 tanks, the ratio $h/d_k \approx 3$, whereas for the self-propelled howitzers “Akatsiya” and “MSTA-S”, $h/d_k \approx 5$. Thus, as a rule, SPHs have a higher superstructure

together with the turret above the track system compared to tanks, which is due to the significantly larger dimensions of the SPH's artillery installation.

Table 1

Road wheel diameter d_k , vehicle height h , and their ratio for tanks and SPHs

Vehicle model	Height h, m	Road wheel diameter, d_k, m	Ratio h/d_k
T-64(tank)	2.17	0.55	3.8
T-80(tank)	2.20	0.67	3.2
T-72(tank)	2.23	0.75	2.9
T-90 (tank)	2.22	0.75	2.9
Challenger 2 (tank)	2.49	0.70	3.5
2C1 "Gvozдика" (SPH)	2.28	0.67	3.4
2C3 "Akatsiya" (SPH)	3.05	0.63	4.8
2C19 "MSTA-S" (SPH)	3.30	0.52	5.0
2C35 "Koalitsiya-SV" (SPH)	3.5	0.75	4.7
2C5 "Giatsint" (SPH)	2.76	0.63	4.3
2C4 "Tyulpan" (SPH)	3.25	0.63	5.1
M110 (SPH) (USA)	3.28	0.82	4
M109A2 (SPH) (USA)	3.28	0.61	5.4
M109A6 Paladin (SPH) (USA)	3.28	0.61	5.4
AS-90 (SPH) (Britain)	3.00	0.62	4.8
PzH 2000 (SPH) (Germany)	3.50	0.70	5

Another possible recognition signature can be the ratio of the turret length b to the overall vehicle length l .

In a SPH, the turret is long and tall due to the large dimensions of the artillery installation, extending all the way to the rear end of the hull. In a tank, on the other hand, to ensure high maneuverability, low visibility, and enhanced crew protection – with the crew occupying a significant portion of the turret – the turret is relatively flat and low compared to the overall height of the tank. Its length b , measured along the longer side of the hull, is significantly smaller than the hull length, so that the rear edge of the turret is clearly set back from the rear end of the hull by a noticeable distance. This distance δ , measured from the rear edge of the turret to the rear of the hull, can also serve as a recognition signature distinguishing a tank from a SPH.

4.1.2. Probability of recognition using a single signature dimension. Given that an image has a finite size resolution, the probability of recognition by shape depends not only on the signature size but also on the limiting size that can still be resolved by the computer. Specifically, the size of the characteristic detail must exceed the threshold resolution size. In this case, the probability of recognizing the target as an object of

interest in an electronic image is a geometric Bayesian probability, provided that the size of the characteristic detail of the vehicle in the image is larger than the threshold resolution size of the image.

It is important to note that the term size of an image element may refer either to its two-dimensional (2D) size – that is, the area s of the image element – or to its linear, one-dimensional (1D) dimensions. The concept of *dimensionality* (2D or 1D) of an image element's size is a key distinction in defining the size-based conspicuity indices for target *detection* and target *recognition* in an image.

When accomplishing the visual task of detection during reconnaissance we deal with 2D dimensions, such as the image area S , the area of the target s as an object of interest in the image, and the threshold area of the lower limit of resolution s_{th} .

When accomplishing the visual task of target recognition, we deal with comparing 1D dimensions that define the *shape* of the combat vehicle or the *anisometry of the forms* of its structural elements.

In the case of an image obtained from ground-based cameras, during recognition we deal with pairs of 1D dimensions of image elements (length, diameter, thickness, distance) such as

- length l and height h of the vehicle;
- length l and diameter (thickness) d of the vehicle's gun barrel;
- turret length b and hull length l ;
- distance from the rear edge of the turret to the hull's rear end, and so on.

If the image is obtained from UAV cameras or from the frontal projection of the vehicle, then, in addition to these 1D dimensions, the width w of the image element must also be considered.

When recognizing by 1D dimensions, the image-characterizing lengths are the length of the SEZ L and the threshold length of the lower resolution limit l_{th} . It is important to note that, unlike the detection task, in recognition L is not the length of the entire image frame but the length of the SEZ – the zone in the image where the given recognition signature is expected. The reason is that once a combat vehicle has been detected in the image, the observer no longer needs to scan their gaze across the whole target expectation zone (TEZ) along the entire line parallel to the horizontal side of the image frame, as was necessary for detection. For vehicle recognition, it is sufficient to scan the gaze within the signature expectation zone (SEZ), which covers all extreme points of the target contour – for example, a rectangle with sides parallel to the image frame that encloses the contour points so that the most distant of them lie on its sides. In fact, during recognition the

target area $s=lh$ becomes the SEZ area, and its length and height become the horizontal and vertical 1D dimensions of the SEZ if the given signature is observed against the vehicle hull. However, in the case when the signature is located significantly outside the vehicle contour – for example, the gun barrel of an SPH in Figure 2 – the SEZ is defined somewhat differently. Such an example will be analyzed below. For example, if the recognition of a combat vehicle is performed by the length of the gun barrel, then the probability of recognition is determined as:

$$P_l = \begin{cases} \frac{1 - \frac{l_{th}}{l_{sg}}}{1 + \frac{l_{th}}{l_{sg}} \left(1 - 2 \frac{l_{sg}}{L}\right)} & \text{at } l_{th} \leq l_{sg} \leq L; d \geq l_{th} \\ 0 & \text{at } 0 \leq l_{sg} \leq l_{th}; d \leq l_{th} \end{cases}, \quad (22)$$

where l_{sg} is the signature length, the gun barrel in this case; d is its diameter; L is the length of the horizontal side of the SEZ rectangle; and l_{th} is the threshold (minimum) length (per Nyquist) of an image element that is still visualized on the display.

For the image shown in Figure 2a, the SEZ covers almost the entire frame. According to formula (17), the image frame length is $L = (7.75/2.54) \times 96 = 293 px$, while the SEZ length, corresponding to the length of the SPH in the image, is $l = 254 px$. In Figure 2a, the gun barrel of the SPH is clearly visible, and there is no need to enlarge the image using the “zoom” operation. The measured horizontal projection of the SPH gun barrel length in Figure 2a is $l_{sg} = 169 px$. By substituting $l = 254$, $l_{sg} = 169$ and $l_{th} = 2$ into formula (22), we obtain the size-based conspicuity index of the SPH gun barrel in the image (Fig. 2a) $P_l = 0.996$. Intuitively, such a high value of the size-based conspicuity index (i.e., recognition probability) indicates an unambiguous recognition of the SPH as a combat armored vehicle.

Expression (22) takes into account that the key conspicuity feature for recognizing a tank is the length of its gun barrel, but at the same time the barrel diameter d in the image must be greater than the linear resolution $d > l_{th}$ of the monitor. If $d \leq l_{th}$, then according to expression (22) the probability of detection is zero $P_l|_{d \leq l_{th}, \forall l} = 0$ for any barrel length l_{sg} .

4.1.3. Probability of recognition using the sizes of two signatures. An important distinction of the recognition procedure from the detection is that in the detection the target is perceived as a whole. That is, the variable that characterizes the target size is its area. In recognition we deal with the anisometry of the combat vehicle's shape, i.e., with at least a pair of linear

dimensions such as: the tank's length and height, the length and diameter of the combat vehicle's gun barrel, the vehicle length and turret length, turret height and hull height, etc. Each of the two lengths l_1 and l_2 belonging to the same pair is characterized by its own detection probability P_{l_1} and P_{l_2} , respectively. For the target to be recognized with probability $P_R \neq 0$, it is necessary and sufficient that both recognition events by the two size features in both directions occur simultaneously with nonzero probabilities. If at least one of the two probabilities $P_{l_1} = 0$ or $P_{l_2} = 0$, or both together, equals zero $P_{l_1} = P_{l_2} = 0$, then we have $P_R = 0$ that is:

$$P_R|_{P_{l_1}=0} = P_R|_{P_{l_2}=0} = P_R|_{P_{l_1}=0, P_{l_2}=0} = 0. \quad (23)$$

Condition (23) means that the events with probabilities P_{l_1} and P_{l_2} are multiplicative with respect to each other and to the resulting event P_R therefore

$$P_R = P_{l_1} \cdot P_{l_2}. \quad (24)$$

To within the physical meaning of the variables, the quantities P_{l_1} and P_{l_2} are determined by expression (22), that is

$$P_{l_{1,2}} = \begin{cases} \frac{1 - \frac{l_{th}}{l_{1,2}}}{1 + \frac{l_{th}}{l_{1,2}} \left(1 - 2 \frac{l_{1,2}}{L_{1,2}} \right)} & \forall l_{th} \leq l_1 \leq L_1; l_{th} \leq l_2 \leq L_2, \\ 0 & \forall l_1 \leq l_{th}; l_2 \leq l_{th} \end{cases} \quad (25)$$

where L_1 and L_2 are the lengths of the sides of the SEZ rectangle, i.e., the lines in the image along which the gaze scanning is performed.

By substituting expressions (25) into formula (24), we obtain

$$P_R = \begin{cases} \frac{(l_1 - l_{th})(l_2 - l_{th})}{\left[l_1 \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_1} \right) + l_{th} \right] \left[l_2 \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_2} \right) + l_{th} \right]} & \forall l_{1,2} \geq l_{th} \\ 0 & \forall l_{1,2} < l_{th} \end{cases} \quad (26)$$

After transformation, expression (26) for $\forall l_{1,2} \geq l_{th}$ can be rewritten in the form

$$P_R = \frac{1 - \frac{s_{th}}{s_{l_2}} \left(\frac{l_1 + l_2}{l_{th}} - 1 \right)}{1 + \frac{s_{th}}{s_{l_2}} \left[1 + \frac{l_1 + l_2}{l_{th}} + 2 \frac{s_{l_2}}{S} \left(2 - \frac{L_1 + L_2}{l_{th}} - \frac{L_1}{l_1} - \frac{L_2}{l_2} \right) \right]} \quad (27)$$

where $s_{th} = l_{th}^2$ – is the threshold area of resolution, and $s_{l_2} = l_1 l_2$ is the area of the signature (the area of the gun barrel of a tank or SPH, for example) by which the combat vehicle is recognized against the SEZ of area $S = L_1 L_2$.

Comparison of expressions (16) and (27) shows that the probability of target *detection* P_d by its size feature and the probability of its *recognition* P_R by the size feature of a particular signature in a digital image differ by at least the following characteristics.

First, the area of the recognition signature in expression (27) is smaller than the target area S in expression (16), which by itself reduces the probability of recognition compared to the probability of detection.

Second, since the CAV as the object of interest (target) in the image has already been detected, the search for the signature is carried out not within the TEZ but within a much smaller the SEZ bounded by the vehicle's contours. This, in turn, increases the probability of detecting the signature – that is, the probability of recognizing the vehicle by that signature.

Third, expression (27) includes not only the signature area s_{l_2} but also its linear dimensions l_1 and l_2 , which implicitly accounts for the anisometry of the signature's shape.

Let us determine the probability of detecting the barrel in image Figure 2a, from which we find $l_1 = 169 \text{ px}$, $l_2 = 11 \text{ px}$. The length and height of the SEZ rectangle are estimated to be half of the vehicle's length and height together with the barrel, whence $L_1 = 130 \text{ px}$, $L_2 = 80 \text{ px}$ and for $l_{th} = 2 \text{ px}$ substituting these data into expression (26), we obtain $P_R \approx 0.71$.

There is no doubt that, at a probability $P_d = 0.71$ the detection of the signature (the SPH barrel in Fig. 2a, in this case) by the size feature will be successful. However, the sizes of the vehicle and its characteristic details in the image are not always so large relative to the image frame dimensions and the threshold resolution l_{th} . Therefore, the probability of solving the visual recognition task can take much smaller values for significantly smaller l_1 and l_2 . Hence, similar to the criterion for successful accomplishment of the *detection task*, the question arises of a criterion for successful accomplishment of the target *recognition task* by the size feature of a signature on an electronic image.

4.2. Criterion for successful target recognition by the size feature of a signature.

Similar to the criterion for successful accomplishment of the target detection task by the size feature on an electronic image, we introduce a criterion for successful

accomplishment of the target *recognition task* by the size feature of its signature on the same image

$$P_R > (P_R)_{50} = \frac{1}{2}. \quad (28)$$

To determine the signature dimensions $(l_1)_{50}$ and $(l_2)_{50}$ that satisfy the condition $(P_R)_{50} = 1/2$, it is necessary to solve the equation

$$\frac{((l_1)_{50} - l_{th})((l_2)_{50} - l_{th})}{\left[(l_1)_{50} \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_1} \right) + l_{th} \right] \left[(l_2)_{50} \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_2} \right) + l_{th} \right]} = \frac{1}{2}. \quad (29)$$

$$\forall l_{1,2} \geq l_{th}$$

Equation (29) contains two unknown variables, $(l_1)_{50}$ and $(l_2)_{50}$. However, for a specific type of CAV to be recognized by a given signature, the ratio $k = l_1/l_2$ is generally known. Hereinafter (without loss of generality), for convenience, we assume that l_1 is the longer and l_2 is the shorter dimension of the signature, i.e., $l_1 > l_2$. For the gun barrel of an SPH or tank, k is simply the number of calibers corresponding to its length, the tabulated value of the barrel length measured in its calibers. Therefore, substituting $(l_1)_{50} = k(l_2)_{50}$ into equation (29), we obtain an equation with a single unknown $(l_2)_{50}$. Equation (29) thus reduces to a quadratic equation

$$a((l_2)_{50})^2 - b(l_2)_{50} - c = 0, \quad (30)$$

$$\text{where } \begin{cases} a = k \left[2 - \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_1} \right) \left(1 - 2 \frac{l_{th}}{L_2} \right) \right], \\ b = 2 l_{th} \left[k \left(1 - \frac{l_{th}}{L_1} \right) + \left(1 - \frac{l_{th}}{L_2} \right) \right], \\ c = 3 l_{th}^2, \end{cases}$$

which accordingly has two roots. Since the free term in this quadratic equation is negative, by Vieta's theorem we conclude that one of the roots is positive and the other is negative. Because $(l_2)_{50}$ has the physical meaning of a length, its value cannot be negative. Therefore, among the two roots of the quadratic equation, the positive one is taken. The analytical expression for $(l_2)_{50}$ is rather cumbersome and is not presented here. Instead, expanding it into a Taylor series with respect to the small parameter l_{th} and retaining only the first-order term, we obtain

$$(l_2)_{50} \approx \frac{3}{2} \left(1 + \frac{1}{k} + \sqrt{1 + \frac{14}{k} + \frac{9}{k^2}} \right) l_{th}. \quad (31)$$

From expression (31), one can determine the range within which the quantity $(l_2)_{50}$ varies for $k \in [1; \infty]$. For the value $k = 1$, which corresponds to an isometric signature in the form of a circle or a regular polygon (triangle, square, pentagon, n -gon), we obtain $(l_2)_{50}|_{k=1} \approx 12 l_{th}$. For a markedly elongated signature element $k \gg 1$, we obtain $(l_2)_{50}|_{k \gg 1} \approx 6 l_{th}$. Thus, we find that the criterion for the successful solution of the recognition task varies within $(l_2)_{50} = [6; 12] l_{th}$.

For the target recognition task by the sizes of its signatures to be successfully accomplished, the following condition must be satisfied

$$l_2 > (l_2)_{50}, \quad (32)$$

that is, the smaller of the signature dimensions in the image must exceed the threshold signature size that ensures a 50% probability of its detection. Expression (32) is the analytical form of the criterion for successful target recognition by the sizes of its signatures.

To compare the values of the success criteria for *detection* and *recognition* tasks, we introduce the notation $(l_2)_{50} = l_{50}^R$, where the superscript R (from recognition) denotes recognition.

Let us recall that the criterion for successful accomplishment of the target *detection task* is given by expression (20) through the area s_{50} . For convenience of comparison, we introduce the notation $l_{50}^D = \sqrt{s_{50}}$, where the superscript D (from detection) denotes detection. From expression (20), we obtain

$$l_{50}^D = \sqrt{3} \times l_{th}. \quad (33)$$

Since according to expression (31) the value of $l_{50}^R(k)$ is a function of the parameter k , to compare it with the corresponding parameter l_{50}^D for the detection task, we perform averaging of the quantity $l_{50}^R(k)$ over the interval of values $k \in [k_1; k_2]$. Taking into account expression (31), the averaged value is determined as

$$\bar{l}_{50}^R = \frac{3}{2} \frac{l_{th}}{k_2 - k_1} \int_{k_1}^{k_2} \left(1 + \frac{1}{k} + \sqrt{1 + \frac{14}{k} + \frac{9}{k^2}} \right) dk. \quad (34)$$

For the given values of $k \in [1; 40]$, we obtain

$$\bar{l}_{50}^R \approx 7 \times l_{th}. \quad (35)$$

And thus, from expressions (33) and (35), we obtain the comparative estimate

$$l_{50}^D : \bar{l}_{50}^R \approx 1 : 4, \quad (36)$$

which correlates well with the empirically established relationship (5) for the Johnson and TTP criteria of

successful accomplishment of visual detection and recognition tasks

$$x_{50}^D : x_{50}^R \approx 1 : 4 . \quad (37)$$

The quantitative agreement between the success criteria for solving the target detection and recognition tasks by the size feature, given by expression (36) and theoretically derived in this study, and the corresponding empirically obtained criteria given by expression (37), confirms the adequacy of the developed approach to target recognition based on the geometric Bayesian probability of detecting a specific recognition signature by two dimensions.

4.3. The role of the proposed method for estimating the probability of target recognition by the sizes of its signatures in a digital image in target recognition performed by a human operator and by artificial intelligence (AI).

It is important to note that the method developed in this study for estimating the probability of target recognition by the sizes of its signatures in a digital image can serve both as a means of assessing the adequacy of AI-based target recognition and as an independent alternative tool for target recognition by a human operator during reconnaissance.

4.3.1. A posteriori verification of recognition adequacy. Regarding the first application – the verification of target recognition adequacy using AI – it should be noted that the initial iteration of AI-based recognition, for example of armored vehicle samples in an image, often includes objects marked by the AI as targets that are, in fact, not targets. In such cases, the operator must manually filter out falsely marked objects (e.g., trucks or buildings instead of armored vehicle samples).

The causes of erroneous object recognition as targets by AI may vary. One of them is the neglect of the fact that not every object in an image can be successfully recognized. In the previous subsection, it was shown that for the recognition task based on the sizes of target signatures to be considered successfully accomplished, the condition $l_2 > (l_2)_{50}$, must be satisfied – that is, the smaller of the signature dimensions must exceed the threshold signature size that ensures a 50% probability of detecting that signature. In other words, to avoid recognition errors associated with insufficient signature sizes, it is necessary to ensure that condition (32) is satisfied for the recognition signatures. However, to do so, the AI must first detect the signatures on the electronic image of the object of interest by which it can be recognized, for example, as an armored vehicle sample. This task may be too ambiguous and hard for AI. Nevertheless, this is not required. To verify whether condition (32) is met, one can use the known ratio

between the size of a signature and the overall size of the target, which is typically a tabulated value. For instance, by using tabulated ratios of a tank turret height to its total height, the AI can apply the recognition success criterion not to the size of specific signatures of an armored vehicle sample but to its overall dimensions – such as height or width – in the digital image.

Below, in the following paragraphs, this possibility will be illustrated with specific examples. However, for the reader's convenience, it is first necessary to briefly explain the relationship between the number of pixels in an image and the metric units of size (length, height, width in millimeters or centimeters). To convert the number of pixels into metric units (e.g., millimeters), in the examples given above, we used the image resolution value in dpi (dots per inch), which is commonly used to describe the quality of printed images (on paper) and is included in the image file metadata. If the image is viewed on a monitor, instead of dpi, one should use the monitor resolution value in ppi (pixels per inch) – the number of pixels per inch. Some programs display images on a monitor while taking the image's DPI into account, while others do not. For example, Microsoft Word considers the image's DPI when inserting it into a Word document: inserting an image of 300×300 pixels with DPI=300 will display it as 1×1 inch (2.54×2.54cm). Knowing the screen width and height in pixels and its diagonal in inches, one can calculate the pixel size in metric units, such as in millimeters.

4.3.2. Examples of adequacy assessment and recognition of an armored vehicle sample by its signatures. For example, if an armored vehicle sample (a tank or an SPH) is recognized by the presence of a turret, then according to expressions (32) and (35), the turret height in the image must exceed $\bar{l}_{50}^R \approx 7 \times 2 = 14(px)$. According to expression (17), for an image with a resolution of 96 dpi, 14 pixels correspond to $14 \times 2.54 / 96 \approx 3mm$. Considering that for an armored vehicle sample the ratio of its total height to the turret height is approximately 3:1, it follows that, in order for the armored vehicle to be recognized by the presence of a turret, its image must have a total height of at least $14 \times 3 = 42px$, which on an image with a resolution of 96 dpi, according to expression (17), corresponds to $42 \times 2.54 / 96 \approx 10mm$. Given that for tanks and SPHs a typical ratio of hull length to vehicle height is about $l/h \approx 3$, it follows that, when viewed from the side (as in Fig. 2c), an image of an armored vehicle sample with a turret height of 3mm and a total height of 10mm on an image with a resolution of 96dpi would correspond to a hull length of approximately 30mm.

If the armored vehicle sample is observed not from the side but in a frontal projection, as shown for

example in Figure 3, it can be recognized by using pairwise ratios, such as the ratio of the turret height to the total vehicle height, the turret height to the hull height (from the ground to the lower level of the turret), and the total vehicle height to its width.

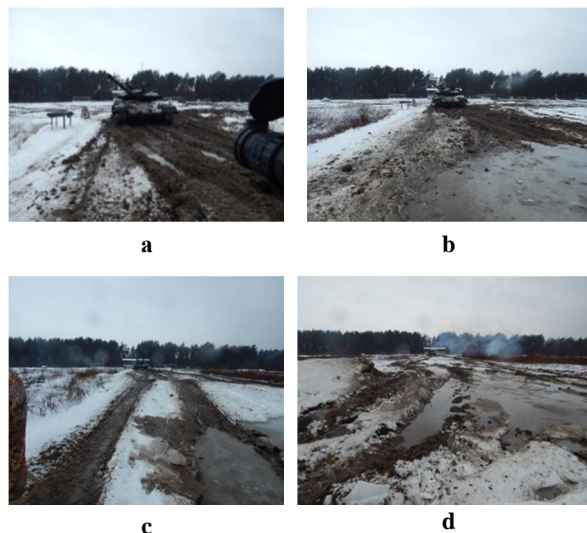


Fig. 3. Image of the T-64BV tank captured by a digital camera with $1\times$ magnification at distances of a – 10 m; b – 20 m; c – 50 m; d – 100 m

In the first two cases, recognition is performed based on the sizes of the recognition signatures (the heights of the turret, hull, and total height), while in the third case – based on the characteristic feature of the vehicle's shape anisometry (height and width). If the recognition of an armored vehicle sample, such as the T-64BV tank, is carried out using its image in a frontal projection, it can be considered that the ratio of the turret height to the total height typically equals 1:3, and the ratio of the turret height to the hull height equals – 1:2. Then, for successful recognition by the size features of the signatures, the turret height in the image should be at least $14px$ ($\approx 3mm$ for an image with a resolution of $96dpi$), while the hull height and total vehicle height would then be $14\times 3=42px$ ($\approx 9mm$) and $14\times 2=28px$ ($\approx 6mm$), respectively.

For the T-64BV tank, the ratio of its width to height measured from Figure 3 is $w/h=1/6$, which agrees well with the tabulated value $w/h=3460mm/2190mm=1.58$ [26]. Therefore, for successful recognition of the tank by the characteristic feature of its shape anisometry in the image, for a tank image with a total height of $14\times 3=42px$ ($\approx 9mm$), the vehicle width should be at least $68px$ ($\approx 15mm$). The estimates of minimum signature sizes and shape anisometry of AFV (including armored vehicles) samples in the image, according to the recognition success criterion (32), should be applied not only for recognition by a human operator when viewing the image on a monitor but even more so for AI-based

recognition. To achieve this, using the tabulated ratios $l_1 = kl_2$ between the signature dimensions l_2 of an AFV sample and its overall dimensions l_1 (height h or width/length l of the vehicle), the criterion (32) can be reformulated as:

$$l_1 > (l_1)_{50}. \quad (38)$$

The AI-based algorithm for recognizing armored vehicle objects in electronic images should reject image elements whose dimensions do not satisfy criterion (38), as such elements do not ensure a recognition probability higher than 50%.

In addition, it should be taken into account that recognition errors (especially in AI-based recognition) may result not only from insufficient sizes of the recognized object in the image but also from excessively low values of its luminance contrast. In other words, the second necessary condition for successful recognition is condition (13). The AI algorithm should therefore reject image elements whose recognition signature contrast does not satisfy criterion (13). For convenience and to simplify the evaluation procedure, instead of measuring the luminance contrast of individual signatures, the overall luminance contrast of the armored vehicle sample can be used. Thus, the AI algorithm should reject recognition objects whose contrast is lower than $|K_{50}| = 0.14$ (for $|K_{th}| = 0.05$), as such objects do not ensure a recognition probability by the luminance contrast feature higher than 50%. It is worth noting that in some publications the threshold contrast value is considered to be more than twice lower, $|K_{th}| = 0.02$, for which, according to (12), one finds $|K_{50}| = 0.05$. Which of the two values of $|K_{th}|$ should be used in the estimation of $|K_{50}|$ deserves additional studies. For the time being, the higher value $|K_{th}| = 0.05$ is preferable to ensure correct recognition.

The procedure for experimental determination of the detection and recognition probabilities of an armored vehicle sample will be illustrated in the following (fifth) section of the paper, using as an example images of the main battle tank (MBT) T-64BV, evaluated by the sizes of its signatures on images obtained at different distances from the target.

5. Experimental determination of detection and recognition probabilities of an MBT sample based on the sizes of its signatures as a function of distance

To determine the detection and recognition probabilities of the MBT sample (T-64BV) based on the sizes of its signatures as a function of distance, an experiment was conducted with the aim of collecting images of the T-64BV tank at distances ranging from $10m$ to $750m$. Examples of some of the obtained

images, specifically for distances $D=10, 20, 50, 100m$, are shown in Figures 3a-d, respectively.

5.1. Experimental conditions.

5.1.1. *Image acquisition* was carried out using a Nikon Coolpix L830 Black digital camera at the International Peacekeeping and Security Center training range during winter, under overcast daylight conditions. Images were obtained over the distance range of $[0;100]m$ with a $10m$ step, over $[100;500]m$ with a $50m$ step, and over $[500;750]m$ with a $100m$ step; the final image was captured at a distance of $750m$.

5.1.2. *Measurement of signature dimensions* of the armored vehicle sample – the tank's height (h), width (w), turret height (h_t), and hull height (h_h) – on the collected images (in pixel units) was carried out using the QTDDI computer application [27] and can also be performed in commonly available programs, for example, in XnView.

The probability of detection was determined using expression (16), where $s = h \times w$ is the area of the rectangle enclosing the target, with width w and height h $s_{th} = 4px^2$ is the threshold 2D resolution of the monitor according to Nyquist, and $S = L \times H$ is the image size in pixels. An advantage of a digital image over an analog one is that it can be magnified on the monitor using the zoom operation, which significantly increases the accuracy of measuring signature dimensions. The absolute measurement error of signature dimensions can be reduced to 1 pixel by using a brightness profile graph plotted along a horizontal line through the target and the pixel brightness table for the given image, in accordance with the QTR-EI index determination methodology [6].

5.2. Results of measurements and calculations.

5.2.1. *Probability of detection.* The probability of detection of the tank was calculated using formula (16), where $s = w \times h$ – the area of the tank on the image, and $S = L \times H = 4608 \times 3456 (px^2)$ is the total image area obtained at a distance D from the tank. Since the ratio between the tank's width w and height h is a constant, it was unnecessary to measure both parameters on all images. Measuring only one – preferably the more distinguishable one – is sufficient, while the other can be computed using the known proportion $w/h = 1.6$. This approach not only simplifies and accelerates data acquisition but also improves computational accuracy. As the distance D increases, both the apparent size and contrast of the tank's image decrease, thereby reducing measurement precision. Among the two dimensions, width w exhibits higher contrast and is therefore more reliable for measurement. In the collected images (some shown in Fig. 3), width w was measured directly, while the height was computed as $h = w/1.6$. To demonstrate the validity of this simplification, experimentally measured height values $h(D)$ is shown as red open circles in

Figure 4, while black squares represent the corresponding computed values obtained from width data using $h = w/1.6$.

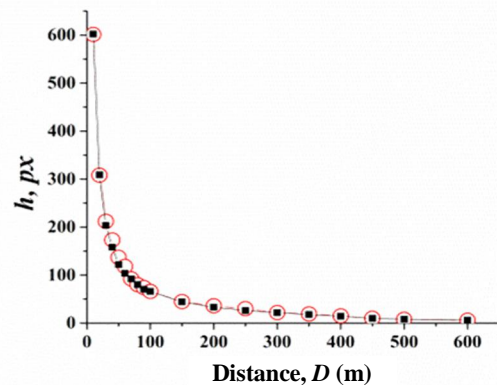


Fig. 4. Experimentally measured values (red open circles) of the tank height h and the corresponding values calculated as $h = w/1.6$

The coincidence of the experimentally measured and calculated values shown in Figure 4 confirms the validity of the simplified measurement procedure.

The dependence $s(D)$, expressed in square pixels, was computed from the experimentally measured values of w and h (Fig. 5). For convenience, the vertical axis is presented in a logarithmic scale.

Similar to Figure 4, in Figure 5 the red open circles represent the values of the tank image area obtained from independently measured w and h , while the black squares correspond to the values derived from width data using the expression $s = w^2/1.6$.

The agreement between both datasets in Figure 5 once again confirms the adequacy of the simplified measurement procedure. Therefore, this approach will be further used to obtain the dimensions of other signatures.

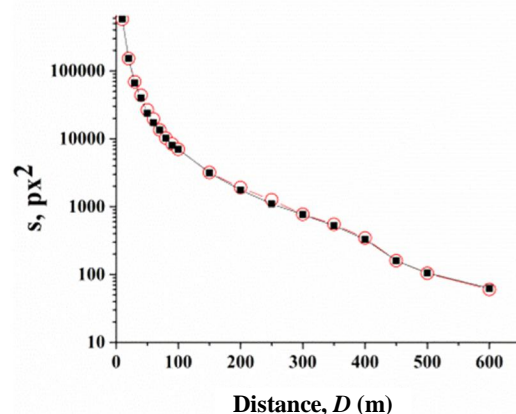


Fig. 5. Experimentally obtained dependence (in logarithmic scale) of the tank image area $s(D)$ on the distance D from the tank: red open circles – values obtained as $s = w \times h$ from independently measured w and h ; black squares – corresponding values calculated as $s = w^2/1.6$

The probability of tank detection in images acquired at various distances D , calculated using equation (16) from the data presented in Figure 5, is shown in Figure 6. It can be seen from the figure that the probability of detecting the tank by the distinctive feature of its size remains higher than 0.5 (50%) even at a distance of 600m.

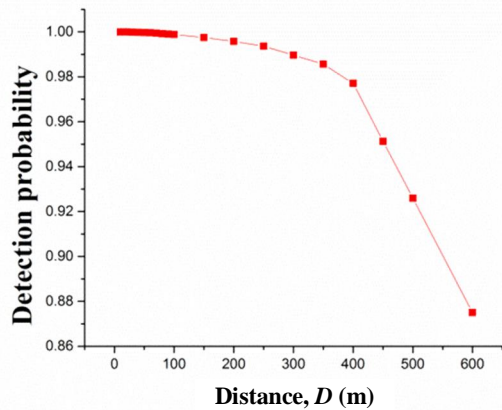


Fig. 6. Probability of detecting the T-64BV tank in an image captured with a digital camera at a zoom factor of $\times 1$ as a function of the distance to the tank

Analyzing the images corresponding to different distances to the tank, it can be concluded that with increasing distance not only does the apparent size of the tank on the image decrease, but also its contrast, i.e., the target visibility index V .

Furthermore, as the distance increases, the target conspicuity index on a cluttered background $P_{clutter}$ decreases. Due to the significant reduction in contrast with distance and the diminished conspicuity of the target against a cluttered background, it becomes impossible to detect the tank in images acquired at distances larger than 600m, even though the probability of detection by size remains above 0.5 (50%).

The reason lies in the fact that, according to equation (8), the target saliency index Γ on an electronic image is the product of the target visibility index

(conspicuity by brightness contrast) V , the size conspicuity index, and the background clutter conspicuity index $P_{clutter}$. Thus, because of the low overall saliency resulting from small values of V and $P_{clutter}$, the target's visibility on images taken at distances $D > 600m$ is too low for successful detection – therefore, points corresponding to $D > 600m$ are absent on the graph (Fig. 4).

To illustrate that the low saliency of the target at distances $D > 600m$ is not a consequence of its size conspicuity, we constructed model images of the tank in Mathematica as rectangular shapes with a visibility index $V=1$ on a uniform white background, thereby ensuring $P_{clutter}$. The model rectangles had the same dimensions (in pixels) as those shown in Figures 4 and 5, which were used to calculate the detection probabilities presented in Figure 6. Accordingly, for this model case, in accordance with equation (8), the target saliency index reduces to the size conspicuity index $\Gamma|_{V=1, P_{clutter}=1} = P_s$. Model

images of the target with sizes corresponding to the tank's dimensions at distances within the range $[10; 600]m$ is shown in Figure 7. It is evident from Figure 7 that even the smallest rectangle with dimensions $w \times h = 10 \times 6(px^2)$, corresponding to a distance $D = 600m$, remains clearly visible – i.e., it can still be detected by the distinctive feature of its size on the image – consistent with the data presented in Figure 6.

5.2.2. Probability of recognition. The probability of recognition of the tank was calculated using expression (26), based on the dimensions of two signatures: the height of the turret h_t and the height of the hull h_h . Since at the recognition stage the target has already been detected, the SEZ is simply a rectangle with sides equal to the tank's width w and height h . When searching for the turret and hull on the image, the visual scanning is performed along a vertical line from the ground to the top point of the turret (or vice versa); therefore, in equation (26), we take $L_1 = L_2 = h$.

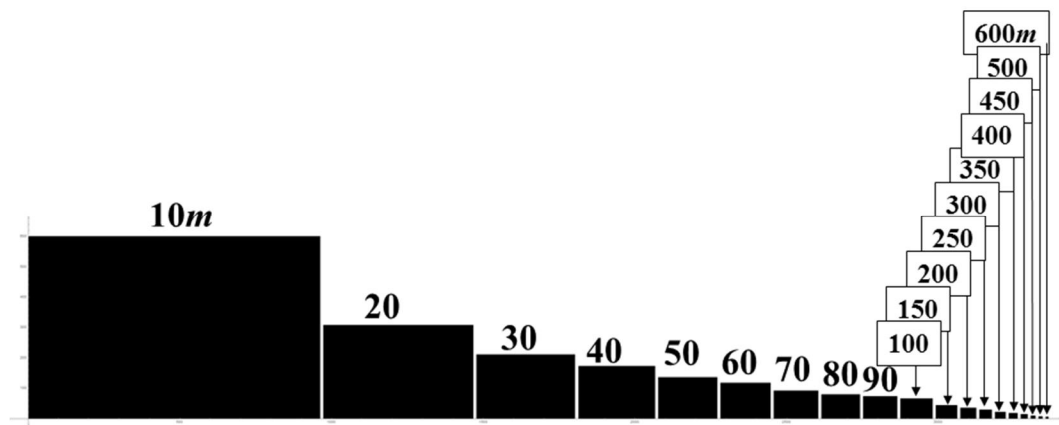


Fig. 7. Model images of the tank represented as rectangles with visibility indices $V=1$, $P_{clutter}=1$, and dimensions corresponding to those used for calculating the detection probability at the distances (in meters) indicated above each image

Dependencies $h(D)$, $h_t(D)$, and $h_h(D)$ – corresponding to the total height of the tank, the turret height, and the hull height on the images as a function of distance D – are shown in Figure 8.

Since the ratios between the overall height h , the turret height h_t , and the hull height h_h of the tank are constant tabulated values $h_t/h = 1/3$, $h_h/h = 2/3$, there is no need to perform independent measurements of h_t and h_h . These parameters can be derived from previously obtained height values h , which in turn can be calculated from the measured tank width using $h=w/1.6$.

The data presented in Figure 8 were used to calculate the probability of recognition of the tank, shown in Figure 9 with blue dots, based on the size features of the turret and hull as recognition signatures. Additionally, in Figure 9, the probability of recognition by the gun barrel length and diameter is plotted with red triangles. For comparison, the probability of detection data from Figure 6 are included with green squares.

From Figure 9, it is evident that, as expected, at short distances ($\sim 10m$) the probabilities of detection and recognition are close in value and nearly equal to 1. However, as the distance increases, the recognition probability becomes significantly lower than the detection probability.

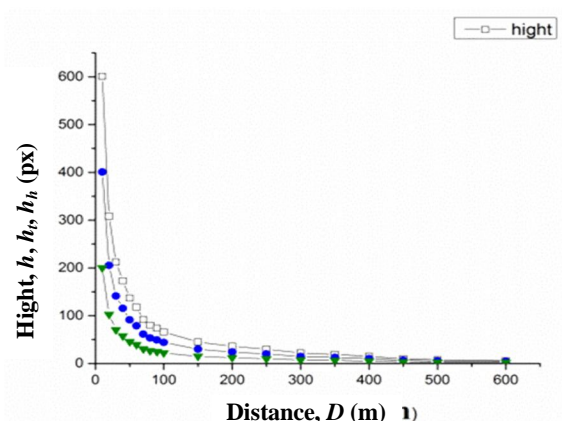


Fig. 8. Dependencies $h(D)$ – open squares; $h_t(D)$ – blue filled circles; $h_h(D)$ – green filled triangles

At distances $D \geq 350m$, the recognition probability based on the turret and hull heights drops below 0.5 (50%), indicating that recognition becomes unreliable or even impossible, even at high zoom magnifications.

This observation is confirmed in Figure 10, where the bottom row shows 500% magnified image fragments taken at distances of 300m and 400m. Indeed, at $D=300m$ the turret and hull of the tank can still be distinguished separately, whereas at $D=400m$ the tank can no longer be reliably recognized by any of its signatures.

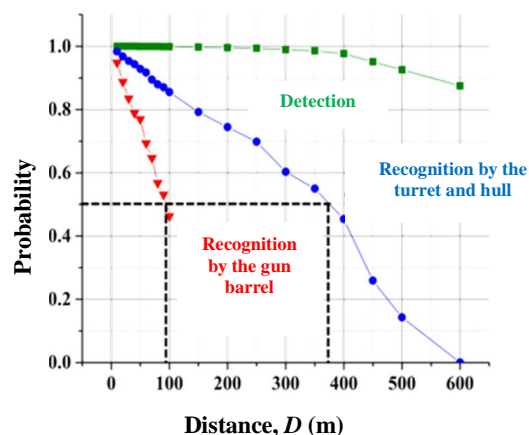


Fig. 9. Probabilities of recognition based on turret and hull height (blue dots), recognition based on gun barrel dimensions (red triangles), and detection based on image area (green squares) as functions of distance to the tank

This conclusion indicates an agreement between the recognition range limit ($\sim 350m$) corresponding to the theoretically calculated 50% recognition probability (Fig. 9) and the empirically observed recognition limit (300-400m) established by visual inspection of the photographs.

Another signature by which the tank can be recognized is its gun barrel. The probability of barrel detection, calculated using expression (26) from its length l_1 and diameter l_2 on images obtained at various distances, is shown in Figure 9 as red triangles.

In the calculations, considering that the tank is already detected in the image and the visual scanning is performed not across the entire frame but only within the SEZ, the SEZ is taken as a rectangle in which the tank gun axis lies along its diagonal. From Figure 9, it is evident that the recognition probability based on the gun barrel signatures drops below 50% at distances $D > 100m$.

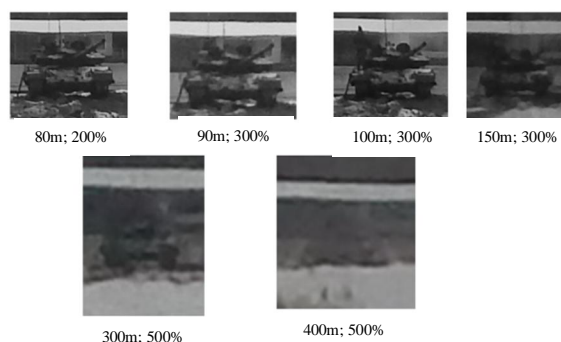


Fig. 10. Fragments of magnified images at different distances. The magnification factor and the corresponding shooting distances are indicated below each image

This conclusion is consistent with the visual inspection of the magnified images. Indeed, in the image taken at a distance of 100m, the gun barrel is still visible, whereas at 150m it becomes difficult to distinguish it with confidence. Thus, it can be concluded that the theoretically derived criterion of recognition success is consistent with the empirical visual observations of the photographs, also with respect to the signature features of the tank barrel.

6. Research prospects

It should be noted that this study focuses on the probability of recognition of military equipment samples based on the dimensions of their signatures. The influence of the luminous contrast of signatures on the probability of target recognition will be the subject of our subsequent publications. At this stage, it can be stated that the overall probability of recognition based on both the size and contrast of the signatures is the product of the respective probabilities. Therefore, for successful recognition, both conditions (32) and (13) must be simultaneously satisfied – corresponding to the signature dimensions and their luminous contrast, respectively.

In this work, a methodology for determining the probability of target recognition based on the geometric dimensions of its signatures has been developed, and criteria for the successful accomplishing visual detection and recognition tasks based on distinctive features have been established. The method was applied to images obtained in the visible spectrum using a digital camera with a single zoom factor. In addition, during the experiment described above, we obtained a set of images using the same camera with maximum zoom, as well as with a mobile phone camera at both 1× zoom and maximum zoom. Comparative studies of the detection and recognition probabilities for images obtained under these different optical conditions are ongoing and will form the basis of our future publications.

An independent interest is the application of the theoretical approach developed in this work to images obtained with thermal imagers, including at different zoom levels. Corresponding thermal images were also acquired during our experiment and are currently being processed.

Another promising possibility afforded by the digital format of images is the ability to measure the distance to a target from its size in the image, measured in pixels using the image brightness table. Figures 4, 5 and 7 demonstrate a clear one-to-one functional relationship between the target size l (in pixels) in a digital image and the distance D to it. For a given sightseeing complex of an AFV sample, this functional dependence (D) can be tabulated experimentally or

obtained theoretically in the form of an analytical relation. Using the brightness-profile plot along a line drawn through the target, the size l of the target on the image can be measured with an accuracy up to 1 px. Thus, having the target size l on the electronic image and the dependence $l(D)$, the distance to the target can be determined.

Conclusions

The capability to obtain information about the target-background situation in the form of digital images opens previously unavailable opportunities for real-time battlefield monitoring. However, the enormously bulky stream of video content acquired from various sources requires equally enormous human effort and computational resources to analyses these datasets. It is no secret that, in most cases, the lion's share of the collected video content contains no information about a target or is of insufficient quality. The development of theoretical basis for assessing the quality of target data acquisition (detection, recognition and identification) based on quantitative measurements of target displaying in digital images enables automated selection of the highest-quality digital images without operator involvement.

In this study, we analyzed existing approaches to measuring the probability of target detection on both analog and electronic images. As a continuation of our previously developed the QTDDI approach aimed at target detection, this work extends the concept to the next stage of the target data acquisition process – recognition. To achieve this, we theoretically derived an analytical dependence describing target recognition probability based on the dimensions of its signatures in a digital image. The derived analytical expressions for the probability of detection (16) and probability of recognition (26) serve as the theoretical basis for a method of evaluating detection and recognition probabilities according to the dimensional features of targets in digital images (including those obtained from multi-channel sightseeing systems of armored vehicles). Based on the proposed method, we developed success criteria for accomplishing visual tasks of target detection and recognition, which can be implemented using brightness data tables of digital images.

The application of these criteria to specific images enables automated filtering of low-quality digital imagery at the input stage, before initiating the process of AI-based target search and recognition. This approach can significantly reduce image-processing time, improve recognition efficiency, and minimize false detections.

To verify the theoretical results obtained, we conducted an experimental study involving the collection of digital images of the T-64BV main battle tank at various distances using different imaging devices. For the images

acquired with a digital camera at a $1\times$ zoom level, we calculated – from the quantitative data of the image brightness tables – the probability of target detection based on its size and the probability of recognition based on the dimensions of its signatures as functions of distance to the target. The agreement between the 50% success criterion (for detection and recognition probability) and the visual analysis of the experimental images confirms the adequacy and reliability of the proposed approach.

References

1. Khaustov D.Ye., Kyrychuk O.A., Stakh T.M., Khaustov Ya.Ye., Burashnikov O.O., Ryzhov Ye., Vlokh R. and Nastishin Yu. A. (2023), Complex-scalar and complex-vector approaches for express target-oriented image fusion. *Ukrainian Journal of Physical Optics*. Lviv. Vol. 24. 1. pp. 62-82. DOI: <https://doi.org/10.3116/16091833/24/1/62/2023>
2. Khaustov D. Ye., Nastyshyn Yu. A., Khaustov Ya Ye., Malynych S. Z. and Hryvachevskiy A. P. (2021), "Formuvannya ta obrobka zobrazen u prysilno-sposterezhnomu kompleksi" [Image formation and processing in the sighting and surveillance complex]. Monohrafiy. Lviv, NASV. 210 p. (with limited access). [in Ukrainian].
3. Khaustov D., Nastyshyn Yu., Khaustov Ya., Kyrychuk O., Stakh T., Malynych S. and Sidor R. (2023), "Suchasni prysilno-sposterezhni kompleksi zrazkiv bronetankovoho ozbroiennia" [Modern sighting and surveillance systems for armored weapons]. Monohrafiia. Lviv, NASV. 310 p. ISBN 978-617-7689-08-8. [in Ukrainian].
4. Khaustov D., Kyrychuk O., Stakh T., Khaustov Ya., Sidor R., Burashnikov O., Ryzhov Ye. and Nastishin Yu. (2023), Target visibility index. *Military Technical Collection*. № 28. pp. 68-76. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.68-76>
5. Khaustov D., Kyrychuk O., Khaustov Ya., Stakh T., Zhurna O. and Nastishin Yu. (2023), The measure of target saliency for target-oriented image fusion. *Scientific works of State Scientific Research Institute of AME TC*, Iss. 3(17). pp. 122-136, 202. DOI: 10.37701/dndivsovt.17.2023.15
6. T. M. Stakh, V. R. Bahan, O. A. Kyrychuk and etc. (2024), "Tema zakryta" [Topic closed]. *Military Technical Collection*. № 31 (t). NASV. Lviv. pp. 97-118. [in Ukrainian].
7. T. M. Stakh, R. I. Sidor, D. Ye. Khaustov, Ya. Ye. Khaustov, O. A. Kyrychuk, V. H. Mudryk and Yu. A. Nastyshyn. (2025), "Uzahalnena model zhyvuchosti zrazkiv bronetankovoho ozbroiennia i tekhniki" [Generalized survivability model of armored weapons and equipment samples]. *Military Technical Collection*. № 32. NASV. Lviv. pp. 28-43. [in Ukrainian].
8. Horbunov V. A. "Yeffektyvnost obnaruzheniya tselei" [Target Detection Efficiency]. Vydavnytstvo Ministerstva oborony SRSR, M., 160 p. [in Russian].
9. Afanasev A. A. and Horbunov V. A. (1964), "Yeffektyvnost obnaruzheniya tselei radyotekhnicheskymy smredstvamy nabludeniya" [Target Detection Efficiency by Radio-Engineering Surveillance Equipment]. M. Voenyzzdat. 122 p. [in Russian].
10. Huseinov A.B. and Perkov Y.E. (2005), Pokazately zametnosti letatelnykh apparatov y sposoby ykh snyzheniya" [Aircraft Visibility Indicators and Methods for Reducing Them]. Moskva. Yzd-vo MAY. 96 p. [in Russian].
11. Johnson, J. (1958), Analysis of image forming systems. Technical report. U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories. Available at: <https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf> (Accessed July 11 2025).
12. Sjaardema, Tracy A.; Smith, Collin S.; Birch and Gabriel C. (2015), History and Evolution of the Johnson Criteria. SANDIA REPORT, SAND2015-6368. July 1 2015. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1222446> (Accessed July 11 2025).
13. Vollmerhausen R.H. and Eddie Jacobs. (2004), The Targeting Task Performance (TTP) Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Technical Report AMSEL-NV-TR-230. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422493.pdf> (Accessed July 11 2025).
14. D.Ye. Khaustov, O.O. Burashnikov, Ya.Ye. Khaustov and Yu. A. Nastyshyn. (2021), "Uzahalnena matematychna model vykonannya vohnevnykh zadach ekipazhem tanka" [Generalized mathematical model of fire tasks performed by a tank crew]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*. №1(29). pp. 20-26. [in Ukrainian].
15. D.Ye. Khaustov, Yu.A. Nastyshyn and Ya.Ye. Khaustov. (2021), "Ymovirnist vykonannya vizualnoi zadachi yak syhmoidna funktsiia" [Probability of completing a visual task as a sigmoid function]. *TsNDI OVT: Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, No. 3 (31). pp. 80-94. [in Ukrainian].
16. Jonathan G. Hixson, Eddie L. Jacobs and Richard H. Vollmerhausen (2004), "Target detection cycle criteria when using the targeting task performance metric", *Proc. SPIE 5612, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications*, (6 December 2004); <https://doi.org/10.1117/12.577830>
17. Approach to Conceptual Sensor Modeling. (2018), el. resource: Mattias Sonesson. A Probabilistic Dissertation, Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A20633&dsid=9203> (Accessed June 15 2025).
18. O.A. Kyrychuk, D.Ye. Khaustov, T.M. Stakh, Ya.Ye. Khaustov, R.I. Sidor, O. V. Zhurna and Yu. A. Nastyshyn. (2024), "Tema zakryta" [Topic closed]. *Naukovi pratsi DNDI ViS OVT*. Vyp. 1(2)-T. Cherkasy. pp. 83-110. [in Ukrainian].
19. Contrast Threshold. International Dictionary for Marine Aids to Navigation. https://www.iala-aism.org/wiki/index.php/Contrast_Threshold (Accessed July 16 2025).
20. Fisher R.A. (1925), Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd (Edinburgh), ISBN 978-0-05-002170-5.
21. O. A. Kyrychuk, D. Ye. Khaustov, T. M. Stakh, Ya. Ye. Khaustov, R. I. Sidor, A. V. Shulhin and Yu. A. Nastyshyn. (2023), "Tema zakryta" [Topic closed]. *Military Technical Collection*. № 29t. pp. 21-32. [in Ukrainian].
22. David Stump. (2014), Digital Cinematography. Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows (1st Edition), Routledge. New York. 498 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780240817927>
23. Gregory Hollows and Nicholas James. Imaging Resource Guide. Edmund Optics: Resolution. Internet dzhherelo: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/resolution/> (Accessed July 18 2025).
24. Hniedenko B. V. (2010), "Kurs teorii ymovimosti" [Probability theory course]. Kyiv VPTs Kyivskiy universytet. 464 p. [in Ukrainian].
25. "Samokhidna haubytsia M109: instrument bohiv viiny" [M109 Self-Propelled Howitzer: Tool of the Gods of War]. *Military*, Internet vydannia <https://military.com/uk/articles/>

samohidna-gaubysya-m109-instrument-bogiv-vijny/ (Accessed July 1* 2025). [in Ukrainian].

26. "T-72 : Stattia z Vikipedii " [T-72 : Wikipedia article]. <https://uk.wikipedia.org/wiki/T-72> (data zvmennia 18.07.2025). [in Ukrainian].

27. T.M. Stakh, R.I. Sidor, V.P. Hladun, V.V. Sakharuk, D.Ye. Khaustov, Ya.Ye. Khaustov, O.A. Kyrychuk, V.V. Lytvyn, O.R. Khobor, O.V. Zhyrna and Yu.A. Nastyshyn. (2025),

"Kompiuterni zastosunkyy dlia avtomatyzatsii protsedury zboru danykh pro tsil z kamer BPLA v interesakh zrazkiv bronetankovoho ozbroiennia" [Computer applications for automating the procedure for collecting target data from UAV cameras in the interests of armored weapons samples]. *Zbirnyk naukovykh prats DNDI VS OVT*, Vyp. 2(24). pp. 126-145. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.28-43>. [in Ukrainian].

МЕТОД ОЦІНКИ ЙМОВІРНОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛЕЙ ЗА ЇХНІМИ ПРИКМЕТНИМИ РОЗМІРНІМИ ОЗНАКАМИ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ З ПРИЦІЛЬНО-СПОСТЕРЕЖНОГО КОМПЛЕКСУ ЗРАЗКІВ БРОНЕТАНКОВОГО ОЗБРОЄННЯ

Т.М. Стах, Д.Є. Хаустов, В.Р. Баган, Я.Є. Хаустов, О.А. Киричук, Ю.А. Настишин

Стрімкий розвиток технологій комп'ютерного бачення та штучного інтелекту (ШІ) відкрив нові можливості для моніторингу поля бою у режимі реального часу, водночас створивши проблему ефективного відбору значущих електронних зображень серед гігантських масивів даних. У роботі розглянуто задачу автоматизованої оцінки якості відображення цілі на електронних зображеннях (ЯВЦнЕЗ) для підвищення ефективності виявлення та розпізнавання озброєння і військової техніки (ОВТ). На основі запропонованої системи індексів прикметності цілі за її розмірними ознаками та теоретично виведених аналітичних залежностей ймовірностей виявлення та розпізнавання цілі від розмірів її геометричних сигнатур запропоновано метод виявлення та розпізнавання цілей за їхніми прикметними розмірними ознаками. Запропонований метод дозволяє кількісно вимірювати ЯВЦнЕЗ за її розмірними прикметними ознаками та ввести критерії успішності виконання візуальних задач виявлення та розпізнавання цілі на основі 50% порогового значення ймовірностей виявлення та розпізнавання. Показано, що лише ті зображення, які відповідають критеріям успішності виконання візуальних задач, можуть вважатися придатними для подальшої обробки засобами ШІ для розпізнавання цілей, що дозволяє знизити кількість хибних розпізнавань.

Особливу увагу приділено процесу розпізнавання як проміжному етапу збору інформації про ціль. Запропоновано використовувати геометричні прикметні ознаки зразків ОВТ як сигнатури їхнього розпізнавання. Теоретично виведено аналітичну залежність ймовірності розпізнавання за розмірами сигнатур та визначено критерій успішності виконання візуальної задачі розпізнавання цілі. Такий підхід значно знижує кількість хибних ідентифікацій об'єктів на зображенні, що не забезпечують для ШІ достатню ЯВЦнЕЗ.

Практична реалізація методу продемонстрована на експериментальних даних, отриманих для зображень основного бойового танка Т-64БВ, зібраних у польових умовах. Зображення реєструвалися цифровою фотокамерою на різних відстанях до цілі. Для них визначено ймовірності виявлення за загальними розмірами цілі як об'єкта інтересу та розпізнавання за анізометрією форми і розмірами характерних сигнатур. Результати підтвердили узгодженість теоретично розроблених критеріїв із візуальним аналізом.

Практичне значення роботи полягає у створенні основ для автоматизованого відбору якісних електронних зображень без участі оператора, що дає змогу суттєво знизити обсяг даних, які обробляються, підвищити точність і швидкість роботи систем комп'ютерного бачення та зменшити кількість хибних розпізнавань. Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення методики на тепловізійні зображення та використання цифрових зображень для визначення відстані до цілі за розмірами її сигнатур на цифрових зображеннях.

Ключові слова: збір даних про ціль, цифрове зображення, обробка зображень, комплексування зображень, штучний інтелект, видимість, прикметність за певною ознакою, помітність цілі, виявлення, розпізнавання, ідентифікація, розвідка, об'єкт, безпілотний літальний апарат.

УДК 621.317.37

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.90-99>С.О. Тишко^{1*}, О.О. Лавруг², В.М. Заїка¹, В.В. Пустоваров³¹ Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки України, Черкаси² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів³ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛ ЧАСУ СТАНЦІЙ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ БЕЗПЛОТНИХ КОМПЛЕКСІВ

Проведено аналіз відомих стратегій застосування наземних рухомих безпілотних систем, що знайшли найбільше розповсюдження на теперішній час. До найпоширенішої стратегії застосування віднесено виконання місії (задачі) індивідуально кожним рухомих виробом під керуванням оператора з використанням двосторонніх каналів зв'язку. Зі станції керування та контролю на рухомий об'єкт передаються сигнали керування, а в зворотному напрямку надходить телеметрична інформація і відеосигнал. Визначені недоліки, які суттєво впливають на технічні характеристики наземних безпілотних систем, обумовлені зазначеною стратегією застосування. Встановлено, що одним із факторів, який обмежує реалізацію стратегії автономного (напівавтономного) застосування, є недостатній рівень завадозахищеності систем навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних систем на базі використання глобальних супутникових радіонавігаційних систем. В якості альтернативного підходу для реалізації системи навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних систем запропоновано використовувати локальні радіонавігаційні системи, що реалізують кодовий псевдододалекомірний метод визначення навігаційних характеристик. Запропонована мінімальна типова структура локальних радіонавігаційних систем. Як метод порівняння частот задаючих генераторів пропонується використовувати фазове підлаштування частоти. В якості метода визначення розходження фаз задаючих генераторів (стандартів) навігаційних станцій пропонується використати кореляційний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій. Запропонована математична модель реалізації даного способу визначення фазового зсуву. Визначені подальші кроки вдосконалення існуючої системи навігаційного забезпечення наземних рухомих безпілотних об'єктів.

Ключові слова: наземна рухома безпілотна система, мережа навігаційного забезпечення, локальна радіонавігаційна система, фазовий зсув, двонапівперіодне перетворення.

Постановка проблеми

На теперішній час розглядається можливість застосування рухомих безпілотних систем під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (виконання пошукових місій, ліквідація та попередження наслідків надзвичайних ситуацій, гасіння пожеж та інші), захисту громадського порядку (пошук, попередження та припинення протизаконної діяльності, пошук та вилучення з обігу заборонених речовин,

поліцейське переслідування), в медичній (для проведення догляду за хворими, діагностування і лікування хвороб), військовій сфері та багатьох інших [1].

На сьогодні найпоширенішою стратегією застосування рухомих безпілотних систем є система з одним рухомих виробом [2, 3]. Виконує місію індивідуально кожний рухомий виріб під керуванням оператора з використанням двосторонніх каналів зв'язку передачі сигналів керування на рухомий та

Article history: Income 06 October 2025; Revised 16 October 2025; Accepted 18 October 2025; Print 05 December 2025

Тишко С.О. ORCID ID: 0000-0003-3838-2027, Лавруг О.О. ORCID ID: 0000-0002-4909-6723

Заїка В.М. ORCID ID: 0000-0001-5965-0233, Пустоваров В.В. ORCID ID: 0000-0003-3944-5771

* Corresponding author Sergeytyshko57@gmail.com

телеметричної інформації і відеопотоку з рухомого виробу до оператора, тобто реалізується метод наскрізного спілкування. Цей підхід має три суттєві недоліки:

1) якість зв'язку залежить від відстані та характеристик середовища, в якому виконує місію безпілотник, а також від рельєфу місцевості [4];

2) доволі великий час відгуку обмежує дрон у виконанні завдань, які потребують відносно великої відстані [5];

3) дрон не може оперативнo змінювати параметри руху, вчасно повідомляти про свій технічний стан та надавати телеметричну інформацію у випадку неможливості передавати інформацію існуючим каналом, а в певних випадках неможливість відпрацювати режим «повернення до дому» [6, 7].

Виходячи з вищенаведеного, найбільш перспективним напрямом реалізації способу застосування безпілотників є режим напівавтономного або автономного виконання місій в групі або рої. Одною із головних умов реалізації вказаного принципу застосування безпілотних систем є забезпечення стійкого з потрібною точністю навігаційного забезпечення.

Найбільш поширеним джерелом отримання навігаційної інформації для сучасних безпілотних систем є комплексування інерційної навігаційної системи з приймачем глобальних супутникових радіонавігаційних систем. Цей спосіб отримання навігаційної інформації обумовлений тим, що методи, покладені в основу реалізації інерційних навігаційних системи визначення місця знаходження рухомих об'єктів, накопичують похибку з часом. Для проведення корекції інерційних навігаційних систем використовується навігаційна інформація від зовнішніх джерел, до яких відносяться глобальні супутникові навігаційні системи.

На теперішній час використовуються чотири глобальні супутникові радіонавігаційні системи, а саме Global Positioning System (GPS), ГЛОНАСС, GALILEO та BeiDou. Найбільш поширений підхід визначення навігаційних параметрів з використанням вказаних систем – це кодовий псевдодалекомірний метод.

Сутність псевдодалекомірного методу відповідно до [8] полягає у визначенні відстаней між навігаційними супутниками і споживачем з подальшим розрахунком координат споживача. Якщо координати споживача оцінюються за допомогою однієї супутникової навігаційної системи, то при одномоментних розрахунках трьох координат і оцінки розбіжності шкал часу супутника і приймача псевдодалекомірним методом необхідно знати відстані між споживачем і мінімум чотирма навігаційними супутниками. Ці відстані вимірюються між фазовими центрами передавальної антени навігаційного супутника і приймальної

антени споживача і застосовуються для формування чотирьох рівнянь, вирішення яких дає оцінку значень трьох координат і розбіжності шкал часу.

Передавана супутником інформація включає дві складові: псевдовипадковий далекомірний код («відмітка дальності»), за допомогою якого вимірюється дальність до супутника; навігаційне повідомлення, що містить необхідну споживачеві інформацію. Навігаційне повідомлення (його структура і склад дещо відрізняються для різних СРНС) включає в себе поточні координати супутника (ефемериди), дані про стан (справність) і елементи орбіт всіх супутників (так званий альманах), зсув шкал часу супутника від системного часу і системного часу від UTC (Coordinated Universal Time – координований всесвітній час), відміну випромінюваної частоти від номінальної тощо. Псевдовипадковий далекомірний код являє собою дуже довгу послідовність «імпульсів». Ця послідовність виглядає зовсім випадковою, але насправді формується за цілком певним законом. Цей закон і є кодом, без знання якого отримати інформацію зі супутника неможливо. Навігаційна апаратура споживачів складається з навігаційних приймачів і обчислювальних пристроїв, призначених для обробки навігаційних сигналів. Цією апаратурою виконуються беззапитні вимірювання псевдодальностей і радіальних швидкостей супутників, а також розрахунки, необхідні для отримання навігаційної інформації користувачами.

Однак суттєвим недоліком сучасних глобальних супутникових систем є неможливість доступу до їх інформації в певних умовах застосування безпілотних систем, наприклад, під час впливу засобів електромагнітного випромінювання, у міській забудові та лісовій місцевості.

Мета досліджень

Запропонувати альтернативний метод проведення корегування показів інерційної навігаційної системи із застосуванням локальної радіонавігаційної мережі, яка може розгортатися на базі технічних засобів існуючої системи видачі диференційних поправок та корпоративних станцій LTE (Long Term Evolution – стандарт бездротового широкосмугового зв'язку) зв'язку. Використання цього підходу видачі поправок до інерційної навігаційної системи дозволить організовувати автоматичний (напівавтоматичний) режим керування наземними безпілотними системами та знизить витрати на створення систем передачі сигналів керування та відеопотоку, організовувати більш віддалені місії на різних рельєфах місцевості, що приведе до зниження витрат на експлуатацію наземних безпілотних комплексів.

Виклад основного матеріалу

В якості альтернативного підходу для організації навігаційного забезпечення безпілотних систем пропонується використання локальних наземних радіонавігаційних систем, що реалізують кодовий псевдодалекомірний метод визначення навігаційних характеристик руху. Локальні навігаційні системи пропонується розгортати з використанням існуючої мережі станцій видачі диференційних поправок з доопрацюванням можливості видачі навігаційних кодових повідомлень, яку доцільно доповнити додатковими локальними навігаційними станціями, наприклад, з використанням корпоративних станцій LTE зв'язку. Вибір даних засобів обумовлений наявністю в їхньому складі прецензійних квантових (цезієвих, рубідієвих) стандартів частоти. Наявних даних засобів у складі вищенаведених технічних систем дозволить організувати локальну радіонавігаційну систему.

Найбільш поширеним методом, що знайшов широке застосування в локальних системах видачі навігаційної інформації, є псевдодалекомірний метод. Сутність зазначеного методу полягає у визначенні відстаней між локальними навігаційними станціями і рухомим об'єктом безпілотного наземного комплексу з подальшим розрахунком координат об'єкта. Виходячи з того, що координати безпілотного апарату, оцінюються за допомогою однієї локальної корпоративної радіонавігаційної системи, то при одномоментних розрахунках трьох координат і оцінки розбіжності шкал часу локальної мережі і приймача псевдодалекомірним методом необхідно знати відстані між безпілотним апаратом і мінімум чотирма навігаційними станціями. Ці відстані вимірюються між фазовими центрами передавальної антени навігаційної станції і приймальної антени безпілотного апарата і застосовуються для формування чотирьох рівнянь, вирішення яких дає оцінку значень трьох координат і розбіжності шкал часу.

Як відомо, дальність є розрахунковою величиною і обчислюється як добуток швидкості поширення електромагнітних коливань і часу, протягом якого сигнал навігаційної станції за лінією «навігаційна станція – безпілотний апарат» досягне безпілотного апарата. Цей час вимірюється в апаратурі споживача радіонавігаційної системи на борту безпілотного апарата. Виміряне значення псевдодальності $D_{meq\ i}$ від споживача до i -ї навігаційної станції визначається співвідношенням:

$$D_{meq\ i} = ct_i, \quad (1)$$

де t_i – час поширення сигналу за лінією « i -та навігаційна станція – безпілотний апарат» на момент проведення навігаційних визначень;

c – швидкість поширення електромагнітних хвиль в просторі.

Вищенаведене співвідношення через відомі координати (X_i, Y_i, Z_i) i -ї навігаційної станції можна записати і координати (X, Y, Z) безпілотного апарата:

$$D_{meq\ i} = [(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Координати X, Y, Z споживача знаходяться шляхом розв'язання системи з мінімум трьох вищенаведених рівнянь для трьох навігаційних станцій при їхніх відомих координатах і виміряних псевдодальностях.

Оскільки шкали часу локальної навігаційної мережі і шкала часу на борту безпілотного апарата несинхронізовані, то при визначенні псевдодальностей буде похибка через розбіжності шкал часу.

З урахуванням одномоментності вимірювання псевдодальностей, а також синхронізації шкал часу навігаційних станцій між собою, розбіжність шкали часу станцій і споживача в момент визначення псевдодальностей можна вважати величиною постійною, але невідомою. З урахуванням розбіжності шкали часу, що призводить до помилки h_τ , виміряну дальність можна записати

$$D_{meq\ i} = [(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2]^{\frac{1}{2}} + h_\tau \quad (3)$$

У цій системі чотири невідомих X, Y, Z та h_τ для її вирішення вже необхідно чотири рівняння, тобто потрібно визначення псевдодальностей, принаймні до 4 навігаційних станцій. Обчислювач бортового приймача безперервно чисельно вирішує цю систему рівнянь, визначаючи прямокутні координати і поправку до бортових годинників. В результаті цього на борту об'єкта завжди відомий точний час локальної навігаційної системи.

Розбіжність шкал часу мережі навігаційних станцій і апаратури споживача не є єдиним джерелом помилок при визначенні псевдодальностей. Тому доцільно проводити врахування похибок частотно-часового забезпечення, похибок через багатопромінене поширення сигналів навігаційних станцій в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури споживача, що встановлена на борту безпілотного апарата і похибок через природні та навмисні завади.

Аналіз сучасних приймачів навігаційних сигналів показує, що завдання зменшення похибок, обумовлених багатопроміненістю поширення сигналів

навігаційних станцій в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури споживача, що встановлена на борту безпілотної апаратури і похибок через природні та навмисні завади, вирішена з використанням як алгоритмічних, так і апаратних рішень.

У випадку роботи локальної корпоративної радіонавігаційної мережі в режимі без доступу до зовнішніх джерел еталонних частот, з метою забезпечення встановленого рівня точності синхронізації шкали часу навігаційних станцій, пропонується організувати групову міру частоти і часу на базі прецензійних квантових стандартів частоти, що, як правило, входять до складу технічних засобів станцій, які пропонуються до обслуговування певної ділянки місцевості.

Тоді виходячи з вищенаведеного, пропонується наступна схема проведення визначення координат наземного безпілотної комплексу, з системою синхронізації базових станцій (рис. 1).

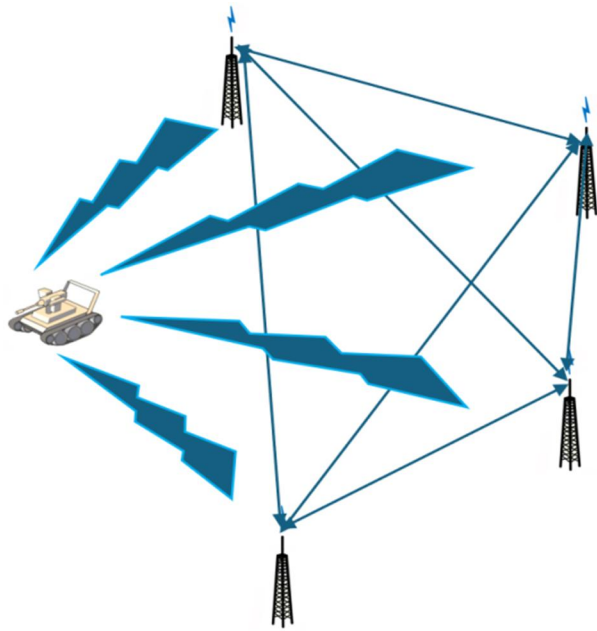


Рис. 1. Структурна схема локальної навігаційної мережі

В якості методу порівняння частот задаючих генераторів пропонується використовувати фазове підлаштування частоти. В якості метода визначення розходження фаз задаючих генераторів (стандартів) навігаційних станцій пропонується використати кореляційний метод вимірювання фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу отриманого шляхом підсумування

після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій, який наведений в [9].

Вибір цього способу визначення фазового зсуву обумовлений тим, що найбільш поширеним способом модуляції у цифрових засобах зв'язку є фазова модуляція або використання її з іншими видами модуляції. Застосування цього підходу для визначення фазового зсуву дозволить збільшити точність вимірювання при застосуванні несучих інформаційних сигналів, зменшити час на проведення вимірювання.

Для вирішення зазначеної задачі запропонована математична модель реалізації цього способу визначення фазового зсуву. При синтезі моделі використовується математичний апарат теорії обробки результатів факторного експерименту, математичної статистики, графів, численних методів пошуку екстремумів. Графічне представлення математичної моделі визначення фазового зсуву двох гармонійних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапівперіодного перетворення з набором еталонних функцій з використанням в якості критерію збіг вказаних функцій максимум коефіцієнт кореляції, наведена на рис. 2.

Розглянемо більш детально порядок вирішення зазначеної вимірювальної задачі. На вхідний пристрій 1 надходить сигнал $u_{in1}(t)$ та вхідний пристрій 2 надходить сигнал $u_{in2}(t)$. Вказані сигнали складаються з гармонічного сигналу, що несе навігаційну інформацію, та набору випадкових шумових сигналів. Смуга пропускання фільтрів налаштована на частоту гармонічного сигналу, що несе навігаційну інформацію. Після виконання операції фільтрації отримуємо на виходах фільтру 1 сигнал $u_{f1}(t)$ та фільтру 2 сигнал $u_{f2}(t)$.

З метою досягнення збільшення точності вимірювання, за рахунок покращення чутливості вимірювання величини фазового зсуву вхідних гармонічних сигналів, сигнали $u_{f1}(t)$ та $u_{f2}(t)$ надходять на входи підсилювача 1 та підсилювача 2. На виходах зазначених пристроїв отримуємо сигнали $u_1(t)$ та $u_2(t)$, амплітуди вказаних сигналів відрізняється не більш ніж на 20 відсотків.

Після проведення вищевказаних операцій, можна стверджувати, що існує два гармонічних сигнали $u_1(t)$ і $u_2(t)$, які мають фазовий зсув один щодо іншого, рівний $\Delta\varphi$, який належить інтервалу від 0 до 2π .

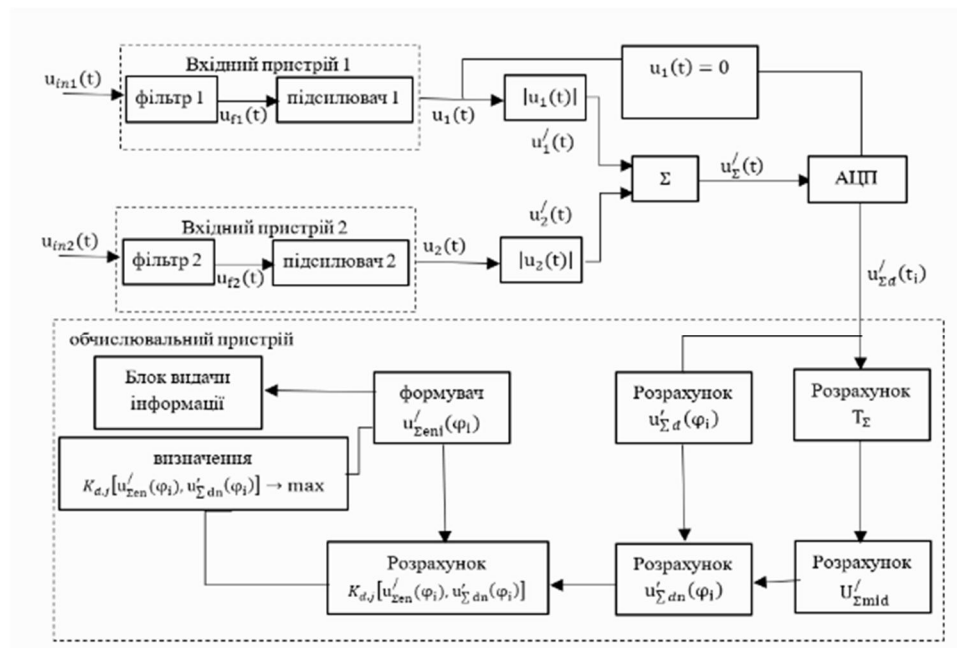


Рис. 2. Графічне подання математичної моделі визначення фазового зсуву двох гармонічних сигналів

Виходячи з того, що вимірювання фазового зсуву відносяться до відносних вимірювань, напишемо зміни сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, у вигляді:

$$u_1(t) = U_{m1} \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

$$u_2(t) = U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi) \quad (5)$$

де U_{m1} , U_{m2} – амплітуда сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ відповідно;

$f = \frac{1}{T}$ – частота сигналів;

T – період слідування сигналів.

Відповідно до (4) та (5), часові діаграми для даних сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, що мають певний фазовий зсув один щодо іншого, на кут, значення якого дорівнює $\Delta\varphi$, наведена на рис. 3а та рис. 3б.

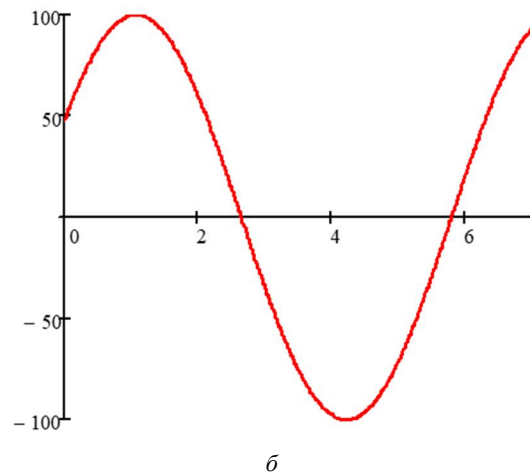


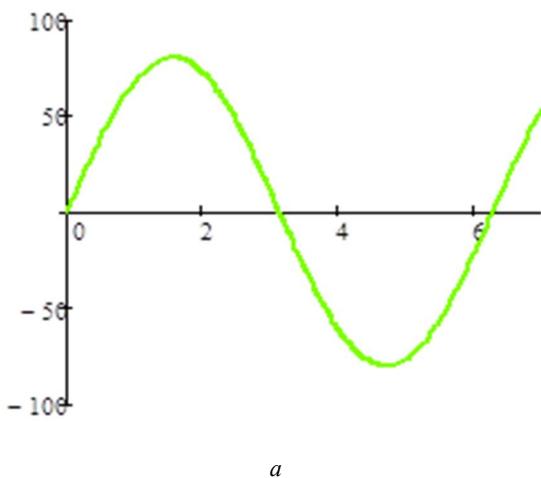
Рис. 3. Часова діаграма сигналу;
а – $u_1(t)$; б – $u_2(t)$

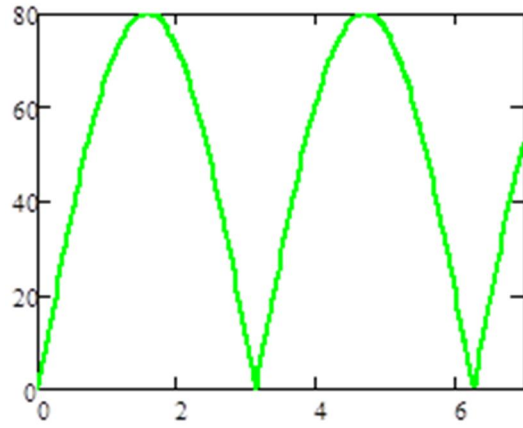
Після виконання вищезазначених операцій сигнали $u_1(t)$ і $u_2(t)$ надходять до двонапівперіодних перетворювачів. На виходах перетворювачів отримуємо сигнали:

$$u'_1(t) = |u_1(t)| = |U_{m1} \cos(2\pi ft)| \quad (6)$$

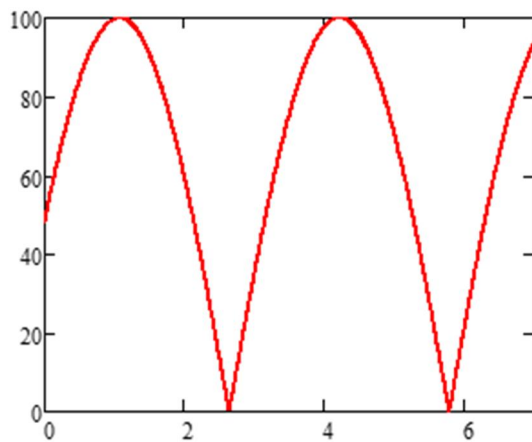
$$u'_2(t) = |u_2(t)| = |U_{m2} \cos(2\pi ft + \Delta\varphi)| \quad (7)$$

Часова діаграма для даних сигналів наведена на рис. 4а та 4б.





а



б

Рис. 4. Часова діаграма сигналів:
а – $u_1(t)$; б – $u_2(t)$

З виходів двонапівперіодних перетворювачів сигнали $u_1'(t)$ і $u_2'(t)$ надходять на входи суматора, на виході суматора отримаємо сигнал $u_\Sigma'(t)$, часова діаграма якого наведена на рис. 5

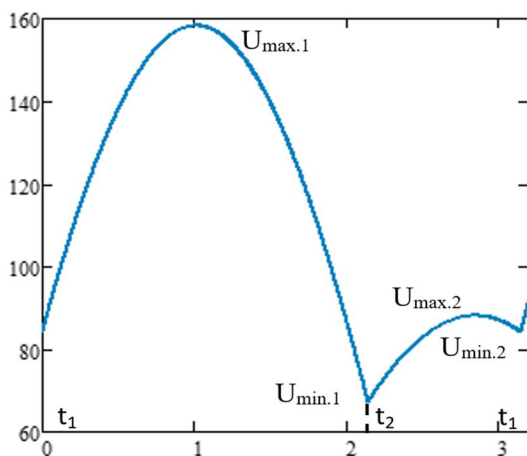


Рис. 5. Часова діаграма сигналів $u_\Sigma'(t)$

Та описується наступним співвідношенням:

$$u_\Sigma'(t) = \begin{cases} U_{1\min} + \frac{U_{1\min} - U_{2\min}}{t_{1.2}} t + \\ + \left(U_{1\max}' - \frac{U_{1\min} + U_{2\min}}{2} \right) \times \\ \times \sin(f_{1.2} t) \\ \text{для } t_1 \leq t < t_2 \\ U_{2\min} + \frac{U_{2\min} - U_{1\min}}{t_{2.1}} t + \\ + \left(U_{2\max}' - \frac{U_{2\min} + U_{1\min}}{2} \right) \times \\ \times \sin(f_{2.1} t) \\ \text{для } t_2 \leq t < t_1 \end{cases} \quad (8)$$

де $U_{1\min}$ і $U_{2\min}$ – точки розриву функції на інтервалі від 0 до $\frac{T}{2}$;

$U_{1\max}' = (U_{m1} + U_{m2}) \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$ – локальний максимум на інтервалі часу $t_1 \leq t < t_2$;

$U_{2\max}' = (U_{m1} + U_{m2}) \sin \frac{\Delta\varphi}{2}$ – локальний максимум на інтервалі часу $t_2 \leq t < t_1$.

Сигнал $u_\Sigma'(t)$ надходить на вхід аналогово-цифрового перетворювача. На вхід запуску перетворювача надходить сигнал початку аналогово-цифрового перетворення за умови $u_1(t) = 0$ при переході від від'ємного значення до позитивного значення. Операція аналогово-цифрового перетворення закінчується за умови $u_1(t) = 0$ при переході від позитивного значення до від'ємного. Відповідно до [10], отримаємо вектором миттєвих значень $u_{\Sigma d}'(t_i)$.

$$u_{\Sigma d}'(t_i) = (U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n), \quad (9)$$

де U_i – миттєві значення сигналу $u_\Sigma'(t)$ в i -й момент часу;

n – кількість відліків, отриманих при проведенні аналогово-цифрового перетворення сигналу $u_\Sigma'(t)$ на інтервалі від 0 до $\frac{T}{2}$.

Вектор $u_{\Sigma d}'(t_i)$ надходить у обчислювальний пристрій, де по відомих значеннях частоти дискретизації f_d та кількості відліків n обчислюється період сигналу $u_\Sigma'(t)$ наступним співвідношенням

$$T_\Sigma = \frac{T}{2} = \frac{n}{f_d} = n\Delta t. \quad (10)$$

З метою спрощення процедури визначення $\Delta\varphi$ проводиться перехід від вектора $u_{\Sigma d}'(t_i)$ до вектора відліків по фазі $u_{\Sigma d}'(\varphi_i)$, для чого визначається крок дискретизації по фазі $\Delta\varphi_D$, за відомих значенням T_Σ з використанням наступного співвідношення

$$\Delta\varphi_D = \frac{\Delta t \cdot 2\pi}{T} \quad (11)$$

Для зменшення методичної складової похибки вимірювання проводиться нормування миттєвих значень вектора $u_{\Sigma d}'(\varphi_i)$ до середнього значення $U_{\Sigma mid}'$, яке розраховується з використанням співвідношення

$$U_{\Sigma mid}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (12)$$

Тоді нормована функція $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$ буде мати вигляд

$$u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i) = \left(\frac{U_1}{U'_{\Sigma \text{mid}}}, \dots, \frac{U_i}{U'_{\Sigma \text{mid}}}, \dots, \frac{U_n}{U'_{\Sigma \text{mid}}} \right) \quad (13)$$

$$= (U_{1.n}, U_{2.n}, \dots, U_{i.n}, \dots, U_{n.n})$$

Амплітуди сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$ близькі, тоді у якості еталонного вектора $u'_{\Sigma \text{е}}(\varphi_i)$ пропонується використати функцію сумарного сигналу, отриманого після проведення напівдвоперіодного перетворення за умови рівності амплітуд $U_{\text{ме}}$, відповідно до віддіків по фазі. Для розрахунку елементів еталонного вектора $u'_{\Sigma \text{е}}(\varphi_i)$ розраховується з використанням виразу

$$u'_{\Sigma \text{е}}(\varphi_i) = \begin{cases} U_{\text{е.мін}} + (U_{\text{е1макс}} - U_{\text{е.мін}}) \times \\ \times \sin\left(\left(1 - \frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^{-1} \varphi_i\right) \\ \text{для } 0 \leq \varphi_i < \pi - \Delta\varphi \\ U_{\text{е.мін}} + (U_{\text{е2макс}} - U_{\text{е.мін}}) \times \\ \times \sin\left(\left(\frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^{-1} (\varphi_i - (\pi - \Delta\varphi))\right) \\ \text{для } \pi - \Delta\varphi \leq \varphi_i < \pi \end{cases} \quad (14)$$

де $U_{\text{е.мін}} = U_{\text{ме}} \sin \Delta\varphi$ – значення точки розриву еталонної функції на інтервалі від 0 до π ;

$U_{\text{е1макс}} = 2U_{\text{ме}} \cos(2\Delta\varphi)$ – максимальне значення еталонної функції на інтервалі $0 \leq \varphi_i < \pi - \Delta\varphi$;

$U_{\text{е2макс}} = 2U_{\text{ме}} \sin(2\Delta\varphi)$ – максимальне значення еталонної функції на інтервалі $\pi - \Delta\varphi \leq \varphi_i < \pi$.

Провівши розрахунок до вищевикладеного виразу для кожного значення φ_i , при певному значенні фазового зсуву $\Delta\varphi$ та виконавши нормування до середнього значення j -ї еталонної функції, яке визначається співвідношенням

$$\bar{U}_{\text{mid e.j}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\text{i.e.j}}, \quad (15)$$

отримаємо вектор нормованої еталонної функції

$$u'_{\Sigma \text{енj}}(\varphi_i) = (U_{1.e.j}, U_{2.e.j}, \dots, U_{i.e.j}, \dots, U_{n.e.j}) \quad (16)$$

Тоді з урахуванням вище викладеного постановку задачі визначення фазового зсуву гармонічних сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$ сформулюємо наступним чином: зі всієї множини нормованих еталонних функцій $u'_{\Sigma \text{ен}}(\varphi_i)$ вибрати таку, j -ту функцію, $u'_{\Sigma \text{енj}}(\varphi_i) = (U_{1.e.j}, U_{2.e.j}, \dots, U_{i.e.j}, \dots, U_{n.e.j})$, яка найбільш повно відповідає нормованому сигналу $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i) = (U_{1.n}, U_{2.n}, \dots, U_{i.n}, \dots, U_{n.n})$.

В якості показника ступеня збігу декількох дискретних функцій знаходить широке застосування така величина, як коефіцієнт кореляції. Співвідношення для

визначення вказаної величини для векторів $u'_{\Sigma \text{ен}}(\varphi_i)$ та $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$ буде мати вигляд

$$K_{d.j}[u'_{\Sigma \text{ен}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)] = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{i.e.j}} - \bar{U}_{\text{mid e.j}}) \cdot (U_{\text{i.n}} - U'_{\Sigma \text{mid}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{\text{i.e.j}} - \bar{U}_{\text{mid e.j}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{\text{i.n}} - U'_{\Sigma \text{mid}})^2}}$$

З урахуванням вищевикладеного зауваження вимірювальну задачу визначення фазового зсуву $\Delta\varphi$ сигналів $u_1(t)$ та $u_2(t)$ сформулюємо наступним чином: з усієї множини еталонних функцій фазового зсуву виберемо таку j -ту функцію $u'_{\Sigma \text{енj}}(\varphi_i)$, яка забезпечить максимальне значення коефіцієнта кореляції між дискретним нормованим сигналом $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$ і нею, тобто

$$K_{d.j}[u'_{\Sigma \text{енj}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)] \rightarrow \max$$

Пошук максимального значення коефіцієнта кореляції проводити з використанням метода золотого перетину.

Алгоритм знаходження максимуму коефіцієнта кореляції методом золотого перетину має наступний вигляд:

Попередній етап.

Визначення допустимої кінцевої довжини невизначеності l .

Вибір мінімального значення даного показника передбачається проводити виходячи з вимог до похибки рішення задачі вимірювання фазового зсуву, враховуючи точнісні характеристики технічних засобів, які задіяні в процесі проведення аналогово-цифрового перетворення сигналу та додаткових операцій, похибками округлення при проведенні обчислювань.

Як видно з умови проведення вимірювання фазового зсуву і переліку операцій перетворення вхідних гармонічних сигналів $u_1(t)$ і $u_2(t)$, початковим інтервалом невизначеності є інтервал, рівний $[0, \pi[$ радіан.

Довжину нового інтервалу невизначеності для першої ітерації визначимо з використанням співвідношень, наведених в [11]:

$$\Delta\varphi_{\lambda 1} = (1 - \alpha) \cdot \pi \quad (17)$$

$$\Delta\varphi_{\mu 1} = \alpha \cdot \pi \quad (18)$$

де α – коефіцієнт, який лежить в інтервалі $0 < \alpha < 1$.

Для проведення розрахунків рекомендують $\alpha = 0,618$.

Провести розрахунок значення коефіцієнта кореляції $K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{ен}\lambda 1}(\varphi_i)]$ між вектором $u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i)$ та еталонною функцією $u'_{\Sigma \text{енj}}(\varphi_i)$ за умови, що фазовий зсув дорівнює $\Delta\varphi_{\lambda 1}$, та значення $K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{дн}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{ен}\mu 1}(\varphi_i)]$, за умови, що фазовий зсув дорівнює $\Delta\varphi_{\mu 1}$ з використанням співвідношення (11) і (14).

Обчислимо $K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)]$ та $K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)]$, покладемо, що $k = 1$, та перейдемо до основного етапу.

Основний етап.

Крок 1. Якщо $\Delta\varphi_{b,k} - \Delta\varphi_{a,k} \leq l$, то зупинитися і прийняти, що значення фазового зсуву дорівнює

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_{b,k} - \Delta\varphi_{a,k}}{2}, \quad (19)$$

де $\Delta\varphi_{a,k}$ – початок інтервалу невизначеності на k -й ітерації;

$\Delta\varphi_{b,k}$ – кінець інтервалу невизначеності на k -й ітерації.

В іншому випадку, якщо

$$\begin{aligned} K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)] > \\ > K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)] \end{aligned} \quad (20)$$

то перейти до кроку 3, якщо

$$\begin{aligned} K_{\lambda 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda 1}(\varphi_i)] \leq \\ \leq K_{\mu 1}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu 1}(\varphi_i)] \end{aligned} \quad (21)$$

то перейти до кроку 2.

Крок 2. Визначити:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{a,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\lambda,k}, \\ \Delta\varphi_{b,(k+1)} &= \Delta\varphi_{b,k}, \\ \Delta\varphi_{\lambda,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\mu,k}, \\ \Delta\varphi_{\mu,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,k} + \alpha(\Delta\varphi_{b,(k+1)} - \Delta\varphi_{a,(k+1)}). \end{aligned} \quad (22)$$

Обрахувати $K_{\mu(k+1)}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\mu(k+1)}(\varphi_i)]$ та перейти до кроку 4.

Крок 3. Визначити:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{a,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,k}, \\ \Delta\varphi_{b,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\mu,k}, \\ \Delta\varphi_{\mu,(k+1)} &= \Delta\varphi_{\lambda,k}, \\ \Delta\varphi_{\lambda,(k+1)} &= \Delta\varphi_{a,(k+1)} + \\ &+ (1 - \alpha)(\Delta\varphi_{b,(k+1)} - \Delta\varphi_{a,(k+1)}). \end{aligned} \quad (23)$$

Обрахувати $K_{\lambda(k+1)}[u'_{\Sigma \text{dn}}(\varphi_i), u'_{\Sigma \text{en}\lambda(k+1)}(\varphi_i)]$ та перейти до кроку 4.

Крок 4. Замінити k на $k + 1$ та перейти до кроку 1.

Запропонований метод, на відміну від показаного в [9], дозволяє знизити часові та фінансові витрати, збільшити показники точності, а також мінімізувати розміри еталонної міри фазового зсуву та нуль індикатора, за рахунок реалізації їх у віртуальному вигляді. Так виходячи з характеристик відомих пакетів, що знайшли широке застосування для

моделювання Mathcad, MATLAB, Electronics Workbench відомо, що можливо провести розрахунки з точністю до 16-го знака.

Адитивний спосіб обробки напруг сигналів, мультиплікативний спосіб обробки сигналів, фазометри з перетворенням Гільберта передбачають операцію автопідлаштування рівнів сигналів по кожному з вимірювальних каналів. Наявність зазначеної операції приводить до суттєвого ускладнення вимірювальних каналів, а відповідно і складової похибки, яка спричинена фазовою асиметрією каналів передачі сигналів, а також необхідністю синхронізації операції аналогово-цифрового перетворення.

До недоліків запропонованого способу реалізації компенсаційного методу вимірювання слід віднести, що діапазон вимірювання фазового зсуву знаходиться в межах $[0, \pi[$ радіан, обмеженість частотного діапазону, яка буде обумовлена характеристиками двонапівперіодного перетворювача. Але цей факт суттєво не впливає на вирішення вимірювальної задачі у порівнянні з отриманим позитивним ефектом. Ці недоліки характерні для більшості відомих методів вимірювання цієї величини.

Висновки

На підставі проведеного аналізу існуючих систем навігаційного забезпечення, що знайшли широке застосування в наземних безпілотних системах, було встановлено, що до їх складу входить безплатформна інерційна навігаційна система, комплексована з приймачем глобальних супутникових радіонавігаційних систем. Ця конфігурація навігаційного забезпечення наземних безпілотних систем не дозволяє забезпечити організацію режимів напівавтономного або автономного виконання місій в групі або рої в усіх можливих умовах їх застосування. В якості альтернативного підходу в організації навігаційного забезпечення наземних безпілотних систем запропоновано використовувати локальні радіонавігаційні системи, що будуються з використанням існуючої мережі станцій видачі диференційних поправок з доопрацюванням можливості видачі навігаційних кодових повідомлень, яку доцільно доповнити додатковими локальними навігаційними станціями, наприклад, з використанням корпоративних станцій LTE зв'язку, в основу даних мереж пропонується покласти кодовий псевдо-далекомірний метод.

Для зменшення складової похибки визначення координат, обумовленої розбіжністю шкал часу навігаційних станцій, пропонується організувати групову міру частоти і часу на базі прецензійних квантових стандартів частоти, що входять до складу технічних засобів станцій, які пропонуються до обслуговування певної ділянки місцевості. Для вирішення даної задачі запропонована математична модель визначення

фазового зсуву двох гармонічних сигналів, в основі якого лежить порівняння форми сигналу, отриманого шляхом підсумування після проведення їх двонапів-періодного перетворення з набором еталонних функцій з використанням в якості критерію збігу вказаних функцій максимуму коефіцієнта кореляції.

Застосування запропонованого методу дозволить збільшити точність вимірювання при застосуванні несучих інформаційних сигналів, зменшити час на проведення вимірювання. Також запропонований метод визначення різниці фазового зсуву дозволить знизити часові та фінансові витрати на реалізацію групової міри частоти та забезпечить потрібний рівень синхронізації внутрішніх шкал часу базових станцій.

Напрямом подальших досліджень є технічна реалізація та впровадження вказаних підходів у навігаційне забезпечення безпілотних наземних систем для можливості виконання функції планування і виконання місій в автономному режимі роботи, що дозволить платформам забезпечувати групове та ройове їх застосування.

Список літератури

1. Стругинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні роботизовані комплекси: монографія. Житомир: ПП "Рута", 2023. 524 с.
2. Zhang L., Morton Y. GPS Carrier Phase Spectrum Estimation for Ionospheric Scintillation Studies. *Navigation*. 2013. Vol. 60. ISS. 2, pp. 113-122. DOI: 10.1002/navi.33
3. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics and Design [Електронний ресурс]. US Department of Navy, Office of Naval Research. December, 20. 2008. 112 p. URL: https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil_fac.
4. Шугуров О.С. Розвиток військових наземних роботизованих систем в контексті нових концепцій управління: перспективи України. URL: <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/27-1445867323.pdf>
5. Чепков І.Б., Довгополий А.С., Гусяков О.М. Концептуальні засади створення вітчизняних ударнорозвідувальних наземних роботизованих комплексів важкого класу. *Озброєння та військова техніка*. Київ: ЦНДІ ОБТ. 2019. № 3 (23). С. 16-25.
6. S. Tyshko, O. Lavrut, V. Vysotska, O. Markiv, O. Zabula, Y. Chemichenko, T. Lavrut. Compensatory Method for Measuring Phase Shift Using Signals Bisemiperiodic Conversion in Diagnostic Intelligence Systems. *MoMLeT+DS 2022: 4th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, November, 25-26, 2022, Leiden-Lviv, The Netherlands-Ukraine. P. 144-154.
7. Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Tetiana Lavrut and Mariia Nazarkevych. Diagnostic Method Development when Weapons Characteristics Measuring Based on Spectral Analysis for Signals Phase Shift Determination. *MoDaST 2024 Modern Data Science Technologies Workshop 2024*, May, 31 - June, 1, 2024, Lviv, Ukraine. P. 42-58. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper3.pdf>.

8. Skolnik. M.I. Radar Handbook. Third Edition. The McGraw-Hill Companies. 2008. 1328 p. ISBN: 9780071485470

9. Hemapala M.U. Robots for Humanitarian Demining: open access peer-reviewed chapter. *IntechOpen*. 2017. 21 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.70246>

10. Cazina D., Brautb S., Božić Ž., Žigulić R. Low cycle fatigue life prediction of the demining tiller tool. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 111.104457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104457>

11. V. Isaiev, "Method of measuring the angle of phase shift between two voltages using a precision meter of the voltage". *Ukrainian Metrological Journal*. 2017. No. 2, PP. 3-7. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2017.109620.

References

1. Strutyns'kyi V.B. and Hurzhiy A.M. (2023), "Nazemni robotyzovani kompleksi: monohrafiya" [Ground robotic complexes: monograph]. Zhytomyr: PP "Ruta". 524 p. [in Ukrainian].
2. Zhang L. and Morton Y. (2013), GPS Carrier Phase Spectrum Estimation for Ionospheric Scintillation Studies. *Navigation*. Vol. 60. ISS. 2. PP. 113-122. DOI: 10.1002/navi.33
3. Autonomous Military Robotics: Risk, Ethics and Design. US Department of Navy (2008), Office of Naval Research. December, 20 2008. 112 p. URL: https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=phil_fac
4. Shuhurov O. S. (2025), "Rozvytok viys'kovykh nazemnykh robotyzovanykh system v konteksti novykh kontseptsii upravlinnya: perspektyvy Ukrainy" [Development of military ground robotic systems in the context of new management concepts: prospects for Ukraine]. URL: <http://sp.niss.gov.ua/content/articles/files/27-1445867323.pdf> [in Ukrainian].
5. Chepkov I.B., Dovhopolyi A.S. and Huslyakov O.M. (2019), Kontseptual'ni zasady stvorennia vitchyznyanykh udarnorozviduval'nykh nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv vazhkoho klasu [Conceptual principles for the creation of domestic heavy-class strike reconnaissance ground robotic complexes]. *Armaments and military equipment*. Kyiv: TSNDI OVT. № 3 (23). pp. 16-25. [in Ukrainian].
6. S. Tyshko, O. Lavrut, V. Vysotska, O. Markiv, O. Zabula, Y. Chemichenko and T. Lavrut (2022), Compensatory Method for Measuring Phase Shift Using Signals Bisemiperiodic Conversion in Diagnostic Intelligence Systems. *MoMLeT+DS 2022: 4th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, November, 25-26 2022. Leiden-Lviv, The Netherlands-Ukraine. P.144-154.
7. Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Tetiana Lavrut and Mariia Nazarkevych (2024), Diagnostic Method Development when Weapons Characteristics Measuring Based on Spectral Analysis for Signals Phase Shift Determination. *MoDaST 2024 Modern Data Science Technologies Workshop 2024*, May, 31 - June, 1, 2024, Lviv, Ukraine. P. 42-58. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper3.pdf>
8. Skolnik. M.I. (2008), Radar Handbook. Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 1328 p. ISBN: 9780071485470

9. Hemapala M.U. (2017), Robots for Humanitarian Demining: open access peer-reviewed chapter. *IntechOpen*. 21 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.70246>
10. Cazina D., Brautb S., Božić Ž. and Žigulić R. (2020), Low cycle fatigue life prediction of the demining tiller tool. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 111.104457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104457>

11. Isaiev V. (2017), "Method of measuring the angle of phase shift between two voltages using a precision meter of the voltage". *Ukrainian Metrological Journal*. No. 2. pp. 3–7. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2017.109620

SYNTHESIS OF A LOCAL NETWORK FOR NAVIGATION SUPPORT OF GROUND UNMANNED COMPLEXES BASED ON A CODE PSEUDOREMOTE METHOD

Sergiy Tyshko, Oleksandr Lavrut, Vasyl Zaika, Volodymyr Pustovarov

An analysis of known strategies for the use of ground-based mobile unmanned systems, which have found the greatest distribution at the present time, has been carried out. The most widespread strategy of application includes the execution of a mission individually by each mobile product under the control of an operator using two-way communication channels. Control signals are transmitted from the command and control station to the mobile object, and telemetric information and a video signal are received in the reverse direction. The shortcomings that significantly affect the technical characteristics of ground-based unmanned systems are determined and are due to the specified application strategy. It has been established that one of the factors limiting the implementation of the strategy of autonomous (semi-autonomous) application is the insufficient level of interference protection of navigation support systems of ground-based mobile unmanned systems based on the use of global satellite radio navigation systems. As an alternative approach to implementing a navigation support system for ground-based mobile unmanned systems, it is proposed to use local radio navigation systems that implement a coded pseudo-range-finding method for determining navigation characteristics. The minimum typical structure of local radio navigation systems is proposed. As a method for comparing the frequencies of the master generators, it is proposed to use frequency phase interpolation. As a method for determining the phase difference of the master generators (standards) of navigation stations, it is proposed to use a correlation method for measuring the phase shift of two harmonic signals, which is based on comparing the waveform obtained by summing after their two-half-period transformation with a set of reference functions. A mathematical model for implementing this method for determining the phase shift is proposed. Further steps for improving the existing navigation support system for ground-based mobile unmanned objects are determined.

Keywords: ground-based mobile unmanned system, network-navigation support, local radionavigation system, phase shift, two-half-wavelength conversion.

УДК 007.52

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.100-108>

Ю.В. Шабатура, В.Д. Залипка

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ З БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ В КРОКУЮЧОМУ РЕЖИМІ

Отримало подальший розвиток дослідження наземних роботизованих комплексів (НРК) щодо покращення їх мобільності, зокрема із застосуванням нового підходу, такого як використання багатофункціональних маніпуляторів (БМ), які окрім своєї функції маніпулювання при необхідності (умови складного рельєфу, обмежений простір тощо) можуть виконувати функцію переміщення НРК у крокуючому або колісному режимі. Проведено теоретичний аналіз динаміки НРК з БМ у крокуючому режимі із розробленням відповідних базових співвідношень. Зокрема отримано відповідні математичні моделі для моментів інерції ланок БМ та здійснено перехід від кінематики до динаміки з визначенням відповідних матриць. Отримано базові співвідношення динаміки НРК з БМ у крокуючому режимі, що дають змогу записати рівняння із виразами, що містять крутні моменти на виконавчих механізмах БМ як функції положення, швидкості та прискорення з'єднань.

Ключові слова: наземний роботизований комплекс, багатофункціональний маніпулятор, динаміка, крокуючий режим.

Постановка проблеми

Перспективні наземні роботизовані комплекси (НРК) з багатофункціональними маніпуляторами (БМ), які можуть окрім функції маніпулювання, в умовах, що обмежують мобільність, виконувати функції крокуючого або колісного руху, реалізовані у формі тетрапода – чотириноєї інженерної мобільної системи, що об'єднує елементи колісного та крокуючого приводів у єдиній конструкції [1]. Очевидним є те, що при подоланні певної відстані на шляху НРК будуть як сприятливі, так і несприятливі умови для його руху. Якщо умови руху сприятливі (тверде покриття, ґрунтова дорога та інша рівнинна місцевість), то безумовно краще для руху НРК, щоб забезпечити належну швидкість, використовувати колісний рушій, якщо ж несприятливі (пороги, ями) – крокуючий. Такий підхід забезпечує НРК високу адаптивність до різноманітних умов експлуатації, включаючи складний рельєф місцевості, перешкоди та обмежений простір. Завдяки такій гібридній структурі, НРК з БМ може змінювати режими руху залежно від характеру середовища, що значно підвищує ефективність функціонування НРК за призначенням.

Фундаментальним фактором, що впливає на особливості руху та вимоги до масо-габаритних параметрів НРК, є хода або спосіб локомоції НРК, що передбачає узгоджений рух різних складових кінцівок і платформи при переміщенні НРК із одного місця до іншого.

На першому етапі дослідження варто зосередити увагу на вивченні динамічних особливостей функціонування НРК з БМ у крокуючому режимі. Незважаючи на універсальність законів руху твердого тіла під дією зовнішніх сил і моментів задача визначення руху НРК з БМ має складну нелінійну природу, оскільки залежить як від фіксованих, так і від змінних параметрів системи. До фіксованих параметрів належать структурно-геометричні характеристики платформи, зокрема конфігурація опорних точок, масово-інерційні властивості та кінематичні обмеження. Змінні параметри включають режими руху (так звані “ходи”), які визначають порядок і ритм пересування опорних елементів. У зв'язку з цим для ефективного моделювання необхідно використовувати адаптивні методи чисельного аналізу, які дозволяють описувати поведінку НРК з БМ в різних умовах функціонування.

Article history: Income 16 June 2025; Revised 10 July 2025; Accepted 09 October 2025; Print 05 December 2025

Шабатура Ю.В. ORCID ID: 0000-0002-9961-1244, Залипка В.Д. ORCID ID: 0000-0002-5189-8370

* Corresponding author zalyпка_w@ukr.net

© Шабатура Ю.В., Залипка В.Д.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Таким чином, розробка теоретичних положень (математичних моделей) динаміки НРК з БМ у крокуючому режимі, що враховують зміну між фазами контакту і переносу опор, зміну точки прикладання реакції опори, взаємодію між силовими елементами приводу та середовищем, а також дослідження оптимізації керування рухом НРК з БМ, із урахуванням стабільності, енергетичної ефективності та адаптації до зовнішніх збурень є актуальними та важливими у науково-технічному аспекті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У попередніх роботах [1; 2] запропоновано підхід щодо забезпечення багатофункціональності маніпуляторів НРК за рахунок застосування технології Abenics [3], які при складних умовах руху можуть переходити в режим крокуючого або колісного рушія. Цей підхід дозволяє підвищити мобільність НРК. Розроблено математичні моделі, які описують кінематику НРК з БМ в режимі крокуючого і колісного рушіїв [4; 5], та проведено об'ємне моделювання НРК із застосуванням вказаного підходу в програмному середовищі SolidWorks [6].

Однак у попередніх роботах не проводилось дослідження щодо теоретичного аналізу динаміки НРК з БМ в крокуючому режимі.

Метою статті є проведення теоретичного аналізу динаміки НРК з БМ в крокуючому режимі із розробленням відповідних базових співвідношень.

Виклад основного матеріалу

Інерційні характеристики. У першому наближенні кінематика тетраподної платформи описується положенням і орієнтацією корпусу відносно базової координатної системи, а також положенням кожного БМ у просторі. Основу моделі складає зворотна кінематика - обчислення положень шарнірів та довжин ланок БМ, виходячи з бажаного положення точки опори (кінцевого ефектора БМ). При цьому використовується спрощене уявлення щодо БМ як про "кінцівки-механізми" з обмеженою кількістю ступенів вільності, що дозволяє забезпечити необхідну мобільність НРК. В аналізі стійкості крокуючого НРК з чотирма кінцівками принцип розташування проєкції центра мас відносно опорної площі є ключовим, для забезпечення його стабільності під час руху та у стані спокою. У випадку НРК з чотирма кінцівками, коли всі чотири кінцівки знаходяться в контакті з поверхнею, вони утворюють чотирикутну опорну площу. Чим більша ця площа, тим більша потенційна стійкість.

Кінематичний аналіз дозволяє: визначити допустимі області положення опор (робочий простір БМ); планувати траєкторії переміщення БМ у фазі переносу; оцінювати можливість досягнення бажаної конфігурації тіла платформи НРК з БМ без порушення кінематичних обмежень [7]. Отримана кінематична модель слугуватиме основою для побудови динамічної моделі системи, в якій уже враховуються сили, моменти, масово-інерційні характеристики, взаємодія з опорною поверхнею та зовнішні збурення. Можливість руху традиційного НРК по місцевості із складним рельєфом визначається типом кінематичної схеми шасі, кількістю ведучих коліс та потужністю двигуна приводу. Ці характеристики вибираються під час розробки НРК та закладаються у пам'ять бортового контролера (центрального блока керування) НРК. У разі руху по поверхні система орієнтації НРК визначає кути нахилу рушія. За їх значеннями та за відомими характеристиками рушія та НРК алгоритм керування рухом оцінює можливість руху по такій поверхні та приймає рішення про його продовження визначеним курсом, чи оминання цієї ділянки.

У випадку застосування технологій штучного інтелекту для НРК з БМ окреслених можливостей не достатньо, адже НРК з БМ крім реалізації транспортної функції за рахунок основного рушія може її здійснювати і за рахунок маніпуляторів та долати перешкоди, а не оминати їх. Також слід враховувати, що і самі БМ повинні орієнтуватися в просторі та володіти відповідними тактильними відчуттями, щоб належним чином виконувати функцію маніпулювання.

Технічний вигляд НРК з БМ, який буде досліджуватися, наведено на рис. 1.

Перехід від кінематики до динаміки у загальному випадку вимагає визначення загальної матриці маси, матриці Коріоліса, матриці гравітаційних сил та моделі контактної взаємодії, що за певних наближень буде розглянуто далі.

На рис. 1 прийнято наступні позначення:

1 – кінцевий ефектор, будовою та можливостями якого на даному етапі дослідження будемо нехтувати, а його інерційні характеристики враховувати у наступній ланці; він виконуватиме функцію точки опори при ходьбі; у крокуючому режимі цей елемент може бути використаний для кращого зчеплення з опорною поверхнею та підвищення стабільності при русі в умовах складного рельєфу; 2 – ланка довжиною k ; 3 – з'єднання ланок 2 і 4, що виконане як шарнір для кінематичної пари поворотного типу із одним ступенем вільності; 4 – ланка довжиною L ; 5 – активний кульовий шарнір Abenics із трьома ступенями вільності.

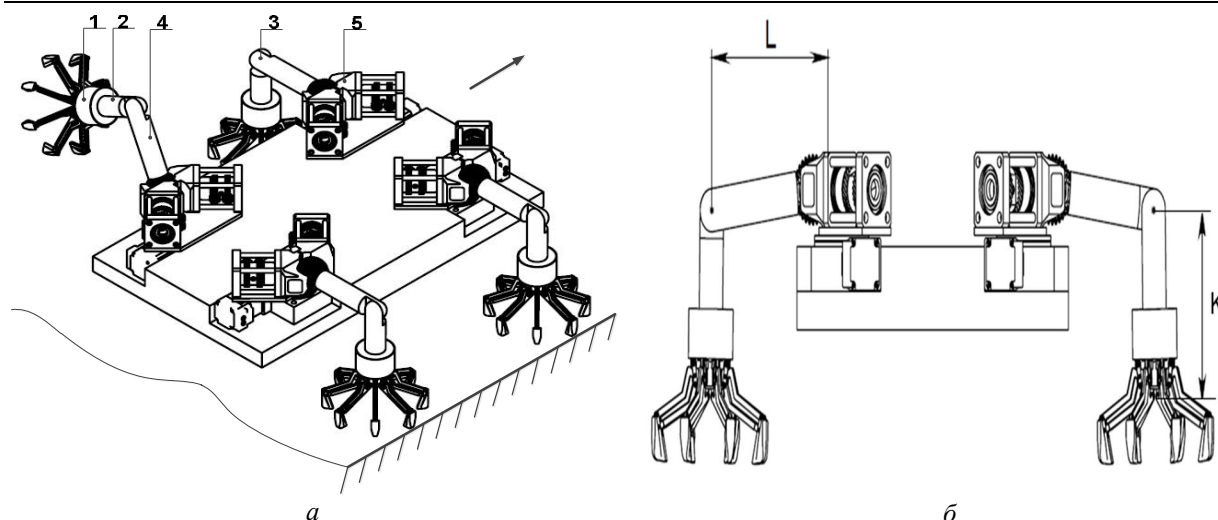


Рис. 1. НПК з БМ: а – вид зверху; б – вид спереду

Інерційні характеристики ланок БМ зазвичай визначають експериментально. Щоб експериментально визначити масу деталі, можна скористатися кількома методами залежно від умов і доступного обладнання. Найпростіший і найточніший метод передбачає використання електронних або механічних ваг з відповідною точністю. Для тіл простої геометричної форми або відомого об'єму можна застосувати обчислення маси за густиною та об'ємом [7]. Наприклад, зразок у формі кругового циліндра довжиною l , діаметром d та густиною ρ матиме масу $m = 0,25\pi\rho d^2 l$. Більшість деталей машин та елементів конструкцій є неоднорідними, і тому теоретичне обчислення їх мас часто має низьку точність та надійність.

Експериментальне визначення моментів інерції деталі можна провести кількома способами, залежно від форми деталі, доступного обладнання та бажаної точності. Основні методи: метод крутильних коливань (обертання навколо заданої осі); метод маятника (коливання у підвішеному стані відносно зовнішньої осі); динамометричний метод (вимірювання реакції на кутове прискорення).

Також для однорідних тіл простої форми широко використовують розрахункові методи. Оскільки більшість деталей машин є неоднорідними, то теоретичне обчислення їх мас часто має низьку точність та надійність, а тому віддають перевагу експериментальним методам. Тим не менш як перше наближення можна скористатись відомими у механіці методами розрахунку.

Момент інерції – це тензор другого рангу (тензор інерції), який у тривимірному просторі описується симетричною матрицею розміром 3×3 :

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Цей тензор має 6 незалежних компонент. Проте можна вибрати осі (головні осі) таким чином, щоб тензор набував діагонального вигляду

$$I = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Переважно використовують (вимірюють та обчислюють) моменти інерції тіла відносно осі, що проходить через його центр мас. Момент інерції тіла відносно осі, що проходить через його центр мас, має кілька важливих особливостей, які є фундаментальними в механіці:

- мінімальний момент інерції серед усіх паралельних осей;
- вісь через центр мас є природною для опису обертання;
- у разі симетрії розрахунки спрощуються;
- три головні осі інерції завжди проходять через центр мас.

Якщо відомий момент інерції I_c відносно осі, що проходить через центр мас, і маса тіла m , то момент інерції I відносно іншої осі, паралельної даній та віддаленої від неї на відстань d , можна знайти за теоремою Гюйгенса–Штейнера (паралельного перенесення осі)

$$I = I_c + md^2. \quad (3)$$

Ланку БМ у першому наближенні можна моделювати як циліндр довжиною l , діаметром d , густиною ρ та масою m . Такий циліндр в силу симетрії

має два різних моменти інерції: відносно поздовжньої осі I_x та відносно поперечної осі $I_y = I_z$, причому

$$I_x = \frac{1}{2} mR^2 = \frac{1}{8} md^2, \quad (4)$$

$$I_y = \frac{1}{12} m(l^2 + 3R^2) = \frac{1}{12} m(l^2 + \frac{3}{4} d^2). \quad (5)$$

У випадку обертання навколо осі, що проходить через кінець ланки БМ, маємо згідно із вказаною теоремою значення

$$I = I_y + m\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{1}{3} ml^2 + \frac{1}{4} mR^2 = \frac{1}{3} ml^2 + \frac{1}{16} md^2 \quad (6)$$

Отже, отримавши відповідні математичні моделі для моментів інерції ланок БМ, що є необхідним для подальших досліджень, відзначимо, що рух НРК з БМ у крокуючому режимі забезпечують чотири ідентичні БМ, прикріплені зверху у кутках власне платформи, що отримує індекс 0 і в подальшому буде вважатись базою у сенсі загальної теорії маніпуляторів [8] при описі із використанням параметрів Денавіта–Хартенберга (DH) [9].

В цілому ж НРК з БМ є деревовидною структурою із сегментами 0 (власне платформа); 1, 2 (БМ FL); 3, 4 (БМ FR); 5, 6 (БМ HR); 7, 8 (БМ HL) (рис. 2) [10]. Подібні моделі широко використовують при моделюванні кінематики та динаміки роботизованих механізмів [11]. Для формалізованої побудови системи застосовуватимемо методику DH-параметрів, де кожен елемент БМ описується матрицею однорідного перетворення. Множачи ці матриці, отримаємо положення кінцевого ефектора відносно тіла платформи [8; 9]. Використання цих нотацій передбачає коректне введення систем координат. За базову приймемо декартову систему координат, прив'язану до платформи. Для зручності при описі кожного БМ його центр суміщатимемо із точкою 5 (рис. 1 а), вісь z скоро-

вуємо угору, вісь y – у напрямку руху платформи, вісь x – перпендикулярно площині yOz , у зовнішньому напрямку.

Усі вихідні числові геометричні параметри НРК з БМ можна умовно поділити на сталі та змінні. Сталі – це довжини K і L (рис. 1 б). Кожна фаланга має 4+1 змінних параметрів, що описують її поточний стан. Це кути $\varphi, \psi, \omega, \chi, \delta$ (рис. 3) (останній описує розкриття кінцевого ефектора, а тому при базовому описі руху ним нехтуємо). Перші три з них можуть бути змінні завдяки відповідним ступеням вільності шарнірного з'єднання Abenics, четвертий – завдяки шарніру 3 (рис. 1 а).

Для кращого розуміння розглянемо вищевказані кути:

φ – кут, що задає положення БМ у горизонтальній площині, за відлікове приймемо положення, перпендикулярне до борту платформи НРК з БМ, кут відраховуємо у напрямку умовного руху платформи. Область зміни кута у рамках моделі: від -90° (уперед) до 90° (назад), технологічно область буде меншою;

ψ – кут, що задає положення БМ у вертикальній площині, за відлікове приймемо горизонтальне положення, кут відраховуємо униз. Таким чином, збільшення цього кута матиме наслідком збільшення дорожнього просвіту НРК з БМ і у випадку кріплення БМ до верхньої поверхні НРК, є необхідною умовою руху. Область зміни кута: від -90° (вертикально угору) до 90° (вертикально униз);

ω – кут, що вказує на обертання БМ навколо осі; у колісному режимі, змінюється необмежено, забезпечуючи рух НРК з БМ. Додатним приймемо напрямок обертання за годинниковою стрілкою, якщо спостерігати із додатного напрямку осі Ox (рис. 3);

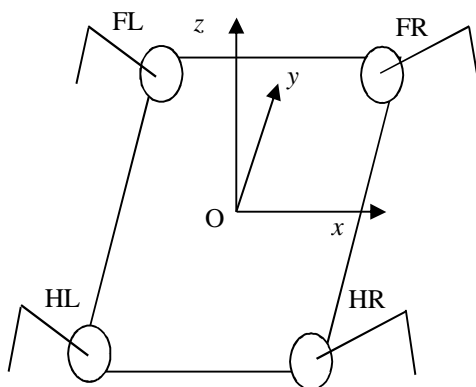


Рис. 2. Схематичне зображення платформи НРК з БМ

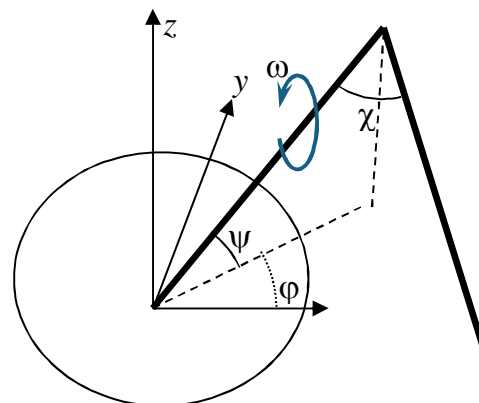


Рис. 3. Окремий БМ

χ – кут між осями ланок БМ; потенційно може змінюватись від 0 до 180°; у останньому випадку БМ матиме прямолінійну форму із загальною довжиною $K+L$ (без кінцевого ефектора).

Задля уніфікації перелічені вище кути позначатимемо наступним чином

$$\varphi = q_1, \psi = q_2, \omega = q_3, \chi = q_4.$$

Їх набір складає простір змінних стану БМ, набір для усіх БМ описує загальну конфігурацію x тетрапода згідно з [10]

$$x = [x_{FR} x_{HR} x_{FL} x_{HL}], \quad x_{Leg} = [q_1, q_2, q_3, q_4], \\ Leg = \{FR, HR, FL, HL\}.$$

Кінематичний опис. Модельний опис режиму переміщення (кінематична модель) передбачає вибір послідовності фаз, що формують цикл переміщення (називатимемо його кроком), замкнутий у тому сенсі, що після його завершення БРП буде перебувати у тій самій геометричній конфігурації, але в іншій точці простору. Ймовірно, перший та останній кроки при переміщенні можуть відрізнитись від основного кроку й слугувати для переходу до іншого режиму.

Розглянемо, як параметр x визначає положення кінцевого ефектора у просторі. Виконаємо це із використанням параметрів ДН. Для кінематики достатньо використовувати системи координат, суміщені із ланками (0 – із базою, 1 – із шарніром 3 (рис. 1 а); 2 – із кінцевим ефектором), у випадку динаміки більш зручно буде також використовувати системи координат, суміщені із центром мас ланок.

Для того, щоб від системи координат бази $\{x_0, y_0, z_0\}$ перейти до системи з індексом 1, слід виконати поворот довкола осі Oz_0 на кут q_1 матриця якого

$$\begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

далі поворот довкола осі Oy_0 на кут q_2 , матриця якого

$$\begin{bmatrix} c_2 & 0 & -s_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

згодом поворот довкола осі Ox_0 на кут q_3 , матриця якого:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & -s_3 \\ 0 & s_3 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $c_j = \cos q_j$, $s_j = \sin q_j$, $j = 1, 2, 3$.

Матриця 0_1R повороту-переходу від системи $\{1\}$ до системи $\{0\}$ отримується множенням перелічених матриць:

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} c_1c_2 & -s_1c_3 - c_1s_2s_3 & s_1s_3 - c_1s_2c_3 \\ s_1c_2 & c_1c_3 - s_1s_2s_3 & -s_1s_3 - s_1s_2c_3 \\ s_2 & c_2s_3 & c_2c_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Загальна матриця однорідного перетворення включатиме крім повороту також перенос до потрібної точки простору (центру мас ланки 1 або точки з'єднання ланок 1 та 2). Якщо вектор переносу є

$${}^0P = \begin{bmatrix} 0 & x_P & 0 & y_P & 0 & z_P \end{bmatrix}^T,$$

то у позначеннях [8] маємо:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} {}^0_1R & {}^0P \\ 000 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1c_2 & -s_1c_3 - c_1s_2s_3 & s_1s_3 - c_1s_2c_3 & 0 & x_P \\ s_1c_2 & c_1c_3 - s_1s_2s_3 & -s_1s_3 - s_1s_2c_3 & 0 & y_P \\ s_2 & c_2s_3 & c_2c_3 & 0 & z_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Для випадку точки з'єднання ланок маємо

$${}^0P = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

У точці з'єднання ланок виконуємо поворот навколо осі Oy_1 , матриця якого

$${}^1_2R = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Відповідна матриця однорідного перетворення із переходом до кінцевого ефектора буде мати вигляд

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & K \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Відповідна матриця однорідного перетворення із переходом від бази до кінцевого ефектора буде мати вигляд

$${}^0T_2^1 = \begin{bmatrix} c_1c_2 & -s_1c_3 - c_1s_2s_3 & s_1s_3 - c_1s_2c_3 & 0 \\ s_1c_2 & c_1c_3 - s_1s_2s_3 & -s_1s_3 - s_1s_2c_3 & 0 \\ s_2 & c_2s_3 & c_2c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & K \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1c_2c_4 + s_1s_3s_4 & -s_1c_3 - c_1s_2s_3 & -c_1c_2s_4 + s_1s_3c_4 - c_1s_2c_3c_4 & Kc_1c_2 + {}^0x_P \\ s_1c_2c_4 - s_1s_3s_4 - s_1s_2c_3s_4 & c_1c_3 - s_1s_2s_3 & -s_1c_2s_4 - s_1s_3c_4 - s_1s_2c_3c_4 & Ks_1c_2 + {}^0y_P \\ s_2c_4 + c_2c_3s_4 & c_2s_3 & -s_2s_4 + c_2c_3c_4 & Ks_2 + {}^0z_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Таким чином отримавши необхідні матриці переходимо до розробки базових співвідношень динаміки НРК з БМ.

Базові співвідношення динаміки. Під час руху одна або більше кінцівок можуть відірватися від опорної поверхні. У такому випадку опорна площа зменшується, і контроль за розміщенням центра мас стає критичним. Часто застосовується алгоритм "штативної" (трикутної) стійкості: три кінцівки залишаються на опорній поверхні, утворюючи стабільну трикутну площу, всередині якої повинен залишатися центр мас.

У зв'язку із великою кількістю параметрів та громіздкістю явного запису при дослідженні законів руху багатоланкових маніпуляторів в цілому та при їхньому застосуванні до руху крокуючих роботів зокрема, переважно використовують матричний запис [12], а практичні обчислення здійснюють чисельним способом із залученням відповідних пакетів комп'ютерних програм та покрокових алгоритмів [8; 11; 13].

У випадку НРК з БМ, що розглядається, основними причинами руху є зусилля, які розвиває БМ в режимі крокуючого руху, змінюючи параметри (внутрішні змінні) $x_{Leg} = [q_1, q_2, q_3, q_4]$ для кожного БМ. У випадку механізму Abenics, прототип якого описано у праці [3], рух забезпечують два модулі керування, кожен із яких обладнаний двома електродвигунами, шарнір у точці з'єднання ланок містить звичайну кінематичну пару, що може бути реалізована як електричний чи гідравлічний механізм. У кожному разі за зміну параметрів стану БМ $q_i (i=1,2,3,4)$ відповідають силові моменти $n_i (i=1,2,3,4)$. Задача динаміки НРК з БМ передбачає знаходження закону руху механізму під дією системи заданих сил (моментів) та знаходження сил (моментів), що забезпечують бажану кінематику. Зазвичай існує множина рішень задачі, кожне із яких дає змогу забезпечити бажаний рух.

Повний алгоритм обчислення моментів, що відповідають внутрішнім змінним x_{Leg} складається із двох частин [8; 14-16]. Спершу записують вектори швидкостей та прискорень від першого до кінцевого

елемента і для кожного із них записують рівняння Ньютона-Ейлера

$$F = m\dot{v}_c, \quad N = c_{I\dot{\omega}} + \omega \times c_{I\omega}, \quad (16)$$

де, m – маса елемента; c_I – тензор інерції елемента у системі відліку, суміщений із центром мас; v_c – лінійна швидкість центра мас; ω – кутова швидкість обертання тіла у власній системі координат, крапкою відзначено похідну по часу; символ “ \times ” позначає операцію векторного добутку векторів.

Далі сили та моменти взаємодії обчислюються рекурсивно від кінцевого до першого елемента. Послідовно маємо:

$${}^1\omega_1 = {}^1R^0\omega_0 + \dot{q}_1 {}^1\ddot{Z}_1 + \dot{q}_2 {}^1\ddot{Y}_1 + \dot{q}_3 {}^1\ddot{X}_1, \quad (17)$$

$${}^1\dot{\omega}_1 = {}^1R^0\dot{\omega}_0 + {}^1R^0\omega_0 \times \dot{q}_1 {}^1\ddot{Z}_1 + \dot{q}_1 {}^1\ddot{Z}_1 + \dot{q}_2 {}^1\ddot{Y}_1 + \dot{q}_3 {}^1\ddot{X}_1, \quad (18)$$

$${}^1\dot{v}_1 = {}^1R({}^0\dot{\omega}_0 \times {}^0P_1 + {}^0\omega_0 \times ({}^0\omega_0 \times {}^0P_1) + {}^0\dot{v}_0), \quad (19)$$

$${}^1\dot{v}_{c_1} = {}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_{c_1} + {}^1\omega_1 \times ({}^1\omega_1 \times {}^1P_{c_1}) + {}^1\dot{v}_1, \quad (20)$$

$${}^1F_1 = m_1 {}^1\dot{v}_{c_1}, \quad (21)$$

$${}^1N_1 = c_1 I_1 {}^1\dot{\omega}_1 + {}^1\omega_1 \times c_1 I_1 {}^1\omega_1, \quad (22)$$

$${}^2\omega_2 = {}^2R^1\omega_1 + \dot{q}_4 {}^2\ddot{Z}_2, \quad (23)$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = {}^2R^1\dot{\omega}_1 + {}^2R^1\omega_1 \times \dot{q}_4 {}^2\ddot{Z}_2 + \dot{q}_4 {}^2\ddot{Z}_2, \quad (24)$$

$${}^2\dot{v}_2 = {}^2R({}^1\dot{\omega}_1 \times {}^1P_2 + {}^1\omega_1 \times ({}^1\omega_1 \times {}^1P_2) + {}^1\dot{v}_1), \quad (25)$$

$${}^2\dot{v}_{c_2} = {}^2\dot{\omega}_2 \times {}^2P_{c_2} + {}^2\omega_2 \times ({}^2\omega_2 \times {}^2P_{c_2}) + {}^2\dot{v}_2, \quad (26)$$

$${}^2F_2 = m_2 {}^2\dot{v}_{c_2}, \quad (27)$$

$${}^2N_2 = c_2 I_2 {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2\omega_2 \times c_2 I_2 {}^2\omega_2, \quad (28)$$

У рекурсивній частині алгоритму отримаємо співвідношення:

$${}^1f_1 = {}^1R^2f_2 + {}^1F_1, \quad (29)$$

$${}^1n_1 = {}^1N_1 + {}^1R^2n_2 + {}^1P_{c_1} \times {}^1F_1 + {}^1P_2 \times {}^1R^1f_1, \quad (30)$$

$$\tau_1 = {}^1n_1^T {}^1\ddot{Z}_1, \quad (31)$$

$${}^0f_0 = {}^0R^1f_1 + {}^0F_0, \quad (32)$$

$${}^0n_0 = {}^0N_0 + {}^0R^1n_1 + {}^0P_{c_0} \times {}^0F_0 + {}^0P_1 \times {}^0R^0f_0, \quad (33)$$

$$\tau_0 = {}^0n_0^T {}^0\ddot{Z}_0, \quad (34)$$

де ${}^i\hat{A}_j$ – вектор орта осі $A (A = X, Y, Z)$ ланки j у системі координат, пов'язаній із ланкою $i, {}^i\omega_j, {}^i\dot{\omega}_j, {}^i\ddot{\omega}_j, {}^i\dot{v}_j, {}^i\ddot{v}_j$ та ${}^i\dot{v}_{c_j}$ аналогічним чином задані вектори кутової швидкості, кутового прискорення, лінійного прискорення ланки та лінійного прискорення центра мас ланки j ;

jF_j – рівнодійна сила, що діє на ланку j у власній системі координат;

jf_j – сила, що діє на ланку j у власній системі координат з боку ланки $j-1 ({}^jF_j = {}^jf_j - {}^jR^{j+1}f_{j+1})$;

аналогічно jN_j та jn_j – сумарний момент сили та момент сили з боку попередньої ланки у кінематичному ланцюгу;

${}^jP_{c_j}$ та c_jP_j – вектори, що дозволяють перейти від системи координат ланки j до її центра ваги, і навпаки;

τ_k – сумарний зовнішній момент, приведений до привода k .

При цьому моменти у приводах 0 (база – активне з'єднання Abenics) та 1 (шарнір – точка з'єднання ланок) можуть бути пов'язані за допомогою наведених вище співвідношень із моментом і силами, що діють на кінцевий ефектор. У випадку, якщо БМ перебуває у стадії переносу ці моменти і сили рівні нулю. Якщо ж БМ є опорним, то сили і моменти будуть залежати від параметрів ходи та інших факторів.

Для врахування сили тяжіння приймаємо, що база має стале прискорення ${}^0\dot{v}_0 = g\hat{Y}_0$. Для того, щоб отримати 0R та 1R , слід у співвідношеннях (7)-(10) для 0R та (13) для 1R : замінити s_i на $-s_i$.

Таким чином, отримані співвідношення дають змогу записати рівняння із виразами, що містять крутні моменти на виконавчих механізмах як функції положення, швидкості та прискорення з'єднань. Такі співвідношення слід записати для кожного із БМ та доповнити належними граничними умовами, що описують умови контакту БМ (якщо він перебуває у опорній фазі) із поверхнею та врахувати зміну умов контакту під час циклу ходи.

Висновки

Проведено теоретичний аналіз динаміки НРК з БМ у крокуючому режимі із розробленням відповідних базових співвідношень.

Розроблено математичні моделі для моментів інерції ланок БМ: якщо відомий момент інерції відносно осі, що проходить через центр мас та у випадку обертання навколо осі, що проходить через кінець ланки БМ.

Визначено положення кінцевого ефектора у просторі із використанням параметрів Денавіта–Хартенберга. Здійснено перехід від кінематики до динаміки з визначенням відповідних матриць.

Отримано базові співвідношення динаміки НРК з БМ у крокуючому режимі дають змогу записати рівняння із виразами, що містять крутні моменти на виконавчих механізмах БМ як функції положення, швидкості та прискорення з'єднань.

З'ясовано, що моменти у приводах можуть бути пов'язані за допомогою наведених вище співвідношень із моментом і силами, що діють на кінцевий ефектор. У випадку, якщо БМ перебуває у стадії переносу, ці моменти і сили рівні нулю. Якщо ж БМ є опорним, то сили і моменти будуть залежати від параметрів ходи та інших факторів.

Встановлено, що у зв'язку із великою кількістю параметрів та громіздкістю запису виразів при дослідженні законів руху багатоланкових маніпуляторів в цілому та при їхньому застосуванні до руху крокуючих роботів зокрема, переважно використовують матричний запис, а практичні обчислення здійснюють чисельним способом із залученням відповідних пакетів комп'ютерних програм та покрових алгоритмів.

Список літератури

1. Залипка В.Д. Конструкційні особливості маніпулятора-рушія для багатоцільових роботизованих платформ. *Збірник наукових праць*. Черкаси: ДНДІВС, 2024. № 3 (21). С. 35-42. DOI: 10.37701/dndivsovt.21.2024.04
2. Залипка В.Д. Забезпечення багатофункціональності засобів взаємодії багатоцільових роботизованих платформ із зовнішніми об'єктами та середовищем застосування технології Abenics. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків: ХУПС, 2023. № 3 (75). С. 53-59. DOI: 10.30748/soivt.2023.75.06
3. Kazuki Abe, Kenjiro Tadakuma, Riichiro Tadakuma. Abenics: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based

on Spherical Gear Meshings. *April 2021 IEEE Transactions on Robotics PP(99)*. DOI:10.1109/TRO.2021.3070124.

4. Залипка В. Д. Кінематика руху багатоцільових роботизованих платформ з багатофункціональними маніпуляторами в режимі крокуючого рушія. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків: ХНУПС, 2024. 2 (78). С. 55-64. DOI: 10.30748/soivt.2024.78.06

5. Залипка В. Д. Кінематика руху багатоцільових роботизованих платформ з багатофункціональними маніпуляторами в режимі колісного рушія. *Збірник наукових праць*. Харків: ХНУПС, 2024. №2 (80). С. 124-133. DOI: 10.30748/zhups.2024.80.16

6. Залипка В. Д. Моделювання засобів взаємодії багатоцільових роботизованих платформ із зовнішніми об'єктами та середовищем в процесі їх трансформації. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2023. Вип. 33(4). С. 65-70. DOI:10.36930/40330409

7. Кініцький Я. Т. Теорія механізмів і машин : підручник. К.: Наукова думка, 2002. 662 с.

8. Craig J. J. Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. 2009. Pearson Education India.

9. Alshamasin M. S., Ionescu F., Al-Kasasbeh R. T. Modelling and simulation of a SCARA robot using solid dynamics and verification by MATLAB/Simulink. *International Journal of Modelling, Identification and Control*. No. 15 (1). 2012. pp. 28-38.

10. Kimura H., Shimoyama I., Miura H. Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot. *Advanced Robotics*, No. 4 (3). 1989. pp. 283-301.

11. Featherstone R., Orin D. Robot dynamics: equations and algorithms. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium conference. IEEE international conference on robotics and automation. Symposia proceedings*, 2000, April. Cat. No. 00CH37065. Vol. 1, pp. 826-834.

12. Adak Ö. K. Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms (Doctoral dissertation). 2013.

13. Mahapatra A., Roy S. S., Pratihari D. K. Modeling and simulation of wave gait of a hexapod walking robot: A CAD/CAE approach. *IAES International Journal of Robotics and Automation*, No. 2 (3), 2013. 104 p.

14. Xiaoqiu Xu, Han Tao, Junwei Han. Shock Mechanism Analysis and Simulation of High-Power Hydraulic Shock Wave Simulator. *Research Article. Open Access*. Volume 2017. Article ID 4361256 [LA1], DOI:10.1155/ 2017/4361256

15. İrem Mertiyüz, Alper K. Tanyıldızı, Beyda Taşar, Ahmet B. Tatar, Oğuz Yakut. Fuhar: A Transformable Wheel-Legged Hybrid Mobile Robot. *Robotics and Autonomous Systems*. Volume 133, November 2020, 103627. 21 pages. DOI:10.1016/j.robot.2020.103627

16. S. Tao A transformable wheel-legged mobile robot: Design, analysis and experiment, *Robotics and Autonomous Systems*, 98. 2017. 30-41. DOI:10.1016/j.robot.2017.09.008

References

1. Zalyпка V.D. (2024), "Konstruktsiini osoblyvosti manipulatora-rushia dlia bahatotsilovykh robotyzovanykh platform" [Mathematical methods of operations research and analysis of complex air defense weapons systems. The problem of

testing statistical hypotheses as a linear programming problem] *Zbirnyk naukovykh prats*. Cherkasy: DNDIVS. No. 3 (21). pp. 35-42. DOI: 10.37701/dndivsovt.21.2024.04 [in Ukrainian]

2. Zalyпка V.D. (2023), "Zabezpechennia bahatofunktsionalnosti zasobiv vzaemodii bahatotsilovykh robotyzovanykh platform iz zovnishnimy ob'ektamy ta seredovyschem zastosuvanniam tekhnologii Abenics" [Ensuring the rich functionality of the interaction of rich robotic platforms with external objects and the core of Abenics technology] *Armor systems and military equipment*. Kharkiv: KhUPS. No, 3 (75). pp. 53-59. DOI: 10.30748/soivt.2023.75.06 [in Ukrainian]

3. Kazuki Abe, Kenjiro Tadakuma and Riichiro Tadakuma. (2021), Abenics: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings. *April 2021 IEEE Transactions on Robotics PP(99)*. DOI: 10.1109/ TRO. 2021. 3070124.

4. Zalyпка V. D. (2024), "Kinematyka rukhu bahatotsilovykh robotyzovanykh platform z bahatofunktsionalnymy manipulatoramy v rezhymy krokiuchoho rushiia" [Kinematics of the collapse of rich robotic platforms with richly functional manipulators in the mode of crippling collapse]. *Armor systems and military equipment*. Kharkiv: KhNUPS. No. 2 (78). pp. 55-64. DOI: 10.30748/soivt.2024.78.06 [in Ukrainian]

5. Zalyпка V. D. (2024), "Kinematyka rukhu bahatotsilovykh robotyzovanykh platform z bahatofunktsionalnymy manipulatoramy v rezhymy kolisnoho rushiia" [Kinematics of the rumble of rich robotic platforms with richly functional manipulators in the wheeled rumble mode.. Kharkiv: KHNUPS]. *Collection of scientific works*. Kharkiv: KhNUPS,. No. 2 (80). pp. 124-133. DOI: 10.30748/zhups.2024.80.16 [in Ukrainian]

6. Zalyпка V. D. (2023), "Modeliuvannia zasobiv vzaemodii bahatotsilovykh robotyzovanykh platform iz zovnishnimy ob'ektamy ta seredovyschem v protsesi yikh transformatsii" [Modeling the interaction between a wide range of robotic platforms and external objects and the core in the process of their transformation]. *Scientific newsletter of NLTU of Ukraine*. Vyp. 33 (4). pp. 65-70. DOI:10. 36930/40330409 [in Ukrainian]

7. Kinytskyi Ya. T. (2002), "Teoriia mekhanizmiv i mashyn : pidruchnyk" [Theory of mechanisms and machines: handyman]. K.: Naukova dumka. 662 p. [in Ukrainian]

8. Craig J. J. (2009), Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E. Pearson Education India.

9. Alshamasin, M. S., Ionescu, F. and Al-Kasasbeh, R T. (2012), Modelling and simulation of a SCARA robot using solid dynamics and verification by MATLAB/Simulink. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, No. 15 (1), pp. 28-38.

10. Kimura H., Shimoyama I., and Miura H. (1989), Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot. *Advanced Robotics*, No. 4 (3). pp. 283-301.

11. Featherstone R. and Orin D. (2000, April). Robot dynamics: equations and algorithms. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium conference. IEEE international conference on robotics and automation*. Symposia proceedings. Cat. No. 00CH37065. Vol. 1, pp. 826-834.

12. Adak Ö. K. (2013), Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms (Doctoral dissertation).

13. Mahapatra A., Roy S. S. and Pratihari D. K. (2013), Modeling and simulation of wave gait of a hexapod walking robot: A CAD/CAE approach. *IAES International Journal of Robotics and Automation*, No. 2 (3), 104.

14. Xiaoqiu Xu, Han Tao and Junwei Han. Shock Mechanism Analysis and Simulation of High-Power Hydraulic Shock Wave Simulator. Research Article. Open Access. Volume 2017. Article ID 4361256 [LA1], DOI:10.1155/2017/4361256

15. İrem Mertçü, Alper K. Tanyıldız, Beyda Taşar, Ahmet B. Tatar and Oğuz Yakut. Fuhar (2020), A Transformable Wheel-Legged Hybrid Mobile Robot. *Robotics and Autonomous Systems*. Volume 133, November 2020, 103627. 21 pages. DOI:10.1016/j.robot.2020.103627

16. S. Tao, A transformable wheel-legged mobile robot: Design, analysis and experiment, *Robotics and Autonomous Systems*, 98, (2017), 30-41. DOI:10.1016/j.robot.2017.09.008

THEORETICAL ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF GROUND ROBOTIC COMPLEXES WITH MULTIFUNCTIONAL MANIPULATORS IN THE STEPPING MODE

Y. Shabatura, V. Zalyпка

A theoretical analysis of the dynamics of ground robotic complexes (GRCs) with multifunctional manipulators (MMs) in a walking mode was carried out with the development of the corresponding basic relations. Mathematical models were developed for the moments of inertia of the MM links: if the moment of inertia is known relative to the axis passing through the center of mass and in the case of rotation around the axis passing through the end of the MM link. The position of the end effector in space was determined using the Denavit-Hartenberg (DH) parameters, for the formal construction of the system, the DH-parameters method was used, where each MM element is described by a homogeneous transformation matrix. As a result of multiplying these matrices, the position of the end effector relative to the platform body is obtained. A transition from kinematics to dynamics was made with the definition of the corresponding matrices. The obtained basic dynamics relations of the GRC with MM in the walking mode allow us to write equations with expressions containing torques on the actuators of the MM as functions of the position, velocity and acceleration of the joints. It was found that the moments in the drives can be related using the given relations to the moment and forces acting on the end effector. For the GRC with MM under consideration, the main causes of movement are the forces that the MM develops in the walking motor mode, changing the parameters (internal variables) for each MM. In the case when the MM is in the transfer stage, these moments and forces are zero. If the MM is a support, then the forces and moments will depend on the parameters of the gait and other factors. It has been established that due to the large number of parameters and the cumbersome of writing expressions when studying the laws of motion of multi-link manipulators in general and when applying them to the motion of walking robots in particular, matrix notation is mainly used, and practical calculations are carried out numerically with the involvement of appropriate computer program packages and step-by-step algorithms. This study lays down the methodological foundations for the creation and application of GRC with MM and is of interest to specialists in the field of development of mobile robotic systems.

Keywords: ground robotic complex, multifunctional manipulator, dynamics, walking mode.

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ

COMBAT EMPLOYMENT OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

UDC 621.396.6

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.109-114>

Artem Dzyuba, Yurii Budaretskyi*

Hetman Petro Sahaidachny National Army Academy, Lviv

THE METHOD AND MEANS OF INSTALLING RADAR MEASURING DEVICES ON ARTILLERY SYSTEMS FOR THE PARAMETERS OF AMMUNITION MOTION

During combat operations, striking the enemy at maximum range with artillery systems plays a key role. The effectiveness of such strikes depends significantly on the quality of comprehensive firing preparations and its component part—ballistic firing preparations. The accuracy of ballistic firing preparations significantly depends on the technical parameters of the radar measuring device for artillery ammunition movement parameters and the methods of its application. Such measuring devices are usually installed next to the gun, which increases the time required for their deployment and leads to significant errors in measuring the current flight speed of the projectile. We have demonstrated that the highest accuracy of the measuring device is achieved when it is installed directly on the guns of artillery systems. Such installation requires the development of standardized mounting devices and the use of special shock absorbers to reduce the negative impact of external mechanical influences on the operation of the radar measuring device. We have shown that when the measuring device is installed on guns, the main influences are shock and vibration loads transmitted to each element of the measuring device. The vibrations caused can be resonant in nature. Resonance causes particularly large deformations, which are accompanied by large mechanical loads and can lead to the destruction of both individual elements and the radar measuring device as a whole. It has been determined that the most universal and effective way to overcome the effects of shocks and vibrations is to isolate the measuring device from the gun using a system of shock absorbers that are structurally combined within a shock-absorbing platform. It is advisable to attach such a platform to the recoil devices of the guns. In order to minimize the number of structural elements of the fastening devices, an analysis was carried out of the possible locations for installing the measuring device on the most common artillery systems in service with the artillery units of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine. The following towed and self-propelled guns were selected for the study: D20, D30, 2S1, 2S3.

Keywords: *ballistic preparation of fire, radar device for measuring parameters of artillery ammunition movement, shock-absorbing platform, fastening devices.*

Statement of the problem

Significant changes in the nature of combat operations require changes in the tactics of artillery units. With each new military conflict, the dispersion of military formations increases and the relevance of the autonomous use of individual artillery units to destroy enemy manpower and equipment grows. The introduction of automated fire control systems, the increasing intellectualization of automated guidance and fire control systems [1], and the optimization of software for automated workstations of battery-division-brigade officials in the management of artillery units' firepower ensure increased maneuverability of

artillery units, allowing them to quickly complete fire missions, leave their firing positions in a timely manner, and avoid enemy artillery counterattacks.

When firing from closed firing positions, the most effective method of fire damage to the enemy is the method of complete preparation for firing. When firing at long ranges, the effectiveness of the method mainly depends on the quality of meteorological and ballistic preparation measures. The main task of ballistic preparation of fire (BPF) is to determine the total deviation of the initial velocity of ammunition from the tabulated values.

Article history: Income 29 September 2025; Revised 08 October 2025; Accepted 17 October 2025; Print 05 December 2025

Дзюба А.О. ORCID ID: 0009-0001-1050-2501, Бударецкий Ю.И. ORCID ID: 0000-0002-8882-0374

* Corresponding author yurii.i.budaretskyi@lpnu.ua

© Дзюба А.О., Бударецкий Ю.И.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Analysis of recent studies and publications

Despite the fact that various methods and means of measuring projectile velocity are currently known, radar artillery ballistic stations (ABS) have been used since the 1970s to measure the initial velocity of projectiles [2].

The development of ABS in advanced countries is taking place under several programs. For example, the program to modernize the British AS90 Braveheart 155 mm self-propelled howitzer involves equipping it with an ABS integrated into the LINAPS (Laser Inertial Automatic Pointing System) by the British company Baye Systems [3].

Russia has developed a unified automated ABS (UAABS) called "Rampa," which provides ballistic firing preparation and performs tasks related to determining the initial velocity of projectiles (mines) with a rate of fire of up to 20 rounds per minute. The caliber of projectiles (mines) ranges from 20 mm to 240 mm, with an initial velocity of 100 m/s to 2000 m/s. The UAABS can be located both on firing systems and on a tripod near these systems. In terms of its characteristics, the UAABS is on par with the best global models in this class, and even surpasses them in terms of functionality (it calculates the total deviation of the actual initial velocity of shells from its tabulated value, as well as the correction in the aiming) [4].

The artillery units of the Ground Forces of the Ukrainian Armed Forces (UAF) are equipped with the ABS-1M, which was developed and adopted in the 1970s. It has an extremely low level of automation and is obsolete because it does not have a digital communication interface with the automated control system [5].

Among domestic developers of artillery ammunition velocity measuring devices, it is worth noting the experimental models developed at the Lviv Scientific Research Radio Engineering Institute [6] and the holding company Ukrspetstechnika [7]. However, these companies did not proceed to serial production and delivery of ABS to the military.

Among foreign manufacturers whose products have been adopted by the artillery units of the Armed Forces of Ukraine it is worth noting the ABS SL-520PE from the Danish company Weibel [8].

Other means of measuring the velocity of ammunition are analyzed in [9].

All ABS systems are based on a radar motion parameter measuring device (RMPMD) for shells and mines in certain areas of movement. The effectiveness of the RMPMD depends on how it is installed relative to the line of fire, how the current velocity of the projectile (mine) is measured, and how these measured values are converted to the muzzle diameter of the artillery gun barrel. Almost all of the listed ABS are located next to the gun, which causes errors in speed estimation when the

measuring base is placed at a short distance from the muzzle of the artillery gun barrel.

Thus, with regard to BPF, there is a discrepancy between existing scientific and methodological approaches to optimizing the structure of RMPMD for artillery ammunition and the lack of technical justification for the method of its installation relative to the gun for high-precision measurement of the initial velocity of ammunition.

The purpose of the article is to justify the feasibility of installing the RMPMDs directly on artillery guns, standardizing the means of their attachment to the existing fleet of artillery systems, and minimizing the impact of external mechanical factors (EMF) on its operation.

Presentation of the main material

The initial velocity of the projectile can be determined according to the expression

$$V_0 = \Delta V(D) + V_{cep}$$

$$V_{cep} = \frac{L}{t_v} = \frac{(D_2 - D_1)}{t_v} \quad (1)$$

where V_0 is the initial velocity of the projectile; D_1 , D_2 are the distances from the muzzle to the beginning and end of the measuring base; V_{ave} is the average velocity of the projectile within the measuring base of length L ; $\Delta V(D) = 104id2x/2m\Delta D(V)$ is the decrease in the velocity of the ammunition when it flies a distance D from the muzzle of the gun to the middle of the measuring base; i – projectile shape coefficient; d – ammunition caliber; m – ammunition mass; $m\Delta D(V)$ – function of range dependence on projectile velocity, whose value for the Siatchi law [10].

From expression (1), it can be seen that the highest accuracy of the V_0 estimate occurs at minimum distances from the muzzle of the barrel, namely at a measuring base located at a distance of up to 25 m from the muzzle of the barrel.

In accordance with the Rules of Shooting and Fire Control, the standard ABS, which is based on the RMPMD, is located at a distance of 6 m on the line of the gun trunnions (Fig. 1) [11].

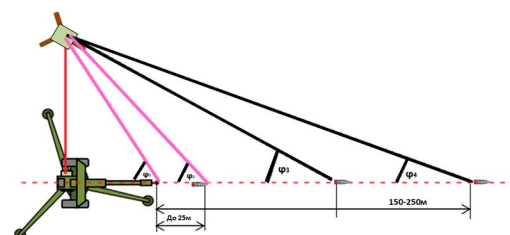


Fig. 1. Standard installation of RMPMD

The Doppler frequency of the signal reflected from the projectile depends on its velocity and is determined by the formula [12]:

$$F_d = \frac{2V}{\lambda} \times \cos \varphi_{1(2)} \quad (2)$$

From Fig. 1 and formula (2), it can be seen that the uncertainty of angle $\varphi_{1(2)}$ when placing the measuring base in the muzzle area of the barrel leads to a corresponding uncertainty in the Doppler value of the reflected signal frequency and, accordingly, to an error in determining the initial velocity of the projectile. Therefore, to reduce this error, a method is proposed for installing the RMPMD on the gun and aligning the axis of the receiving-transmitting antenna's directional pattern with the line of fire. The essence of the method is schematically shown in Fig. 2.

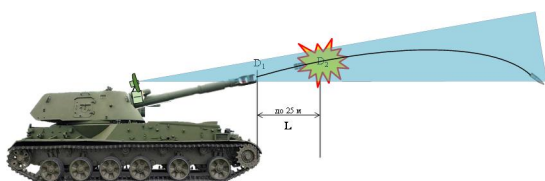


Fig. 2. Schematic diagram of the installation of the RMPMD on a gun

Fig. 2 shows that when the directional pattern of the RMPMD transceiver antennas is aligned with the line of fire, the observation angle $\varphi=0$ and the error in determining the initial velocity of the projectile, caused by its uncertainty, is absent.

This method of installing the RMPMD requires the development of means for attaching it to all types of guns in service with the artillery units of the Armed Forces of Ukraine, while minimizing the range of components and using means to minimize the impact of the EMF on the stability and strength of the RMPMD and the accuracy of its operation.

When installing RMPMD on guns, the main EMF are impact and vibration loads transmitted to each RMPMD element. The vibrations caused may be resonant in nature. Resonance causes particularly large deformations, which are accompanied by high mechanical loads and can lead to the destruction of the element and the RMPMD as a whole.

Impact and vibration resistance can be increased by creating and applying special means of isolating RMPMD elements from external mechanical factors that arise at the points of their installation on artillery systems.

The most universal and effective way to combat the effects of shocks and vibrations is to isolate the RPR from the EMF using a system of shock absorbers that are structurally combined within the shock absorption platform (SAP). This method of protection has general methodological recommendations for its implementation [13-17]. However, the practice of designing absorption platforms necessitates their maximum unification to ensure the effectiveness / cost criterion requirements are met.

The practical implementation of the scheme for installing RMPMD on guns is related to the design of

recoil devices (RD) for towed and self-propelled guns and requires an individual approach in each case.

In order to minimize the number of structural elements of the mounting devices, an analysis was conducted of the possible installation locations for the RMPMD on the most common artillery systems in service with the artillery units of the Ukrainian Armed Forces. The following towed and self-propelled guns were selected for the study: D20, D30, 2S1, 2S3.

Based on the results of the analysis of possible installation locations on the selected guns, a SAP mounting bracket, which is installed on the recoil device RD casing of the D20 towed gun was selected as the base structure. The casing mounting is shown in Fig. 3.



Fig. 3. Casing mounting on the recoil device casing of the D20 gun

The mounting bracket of SAP for installation with screws for the fastening of the cover of the D20 towed gun recoil device is shown in Fig. 4. A special feature of the SAP is that the axis of the most powerful shock absorber is located parallel to the longitudinal axis of the gun barrel, along which the greatest shock loads act.

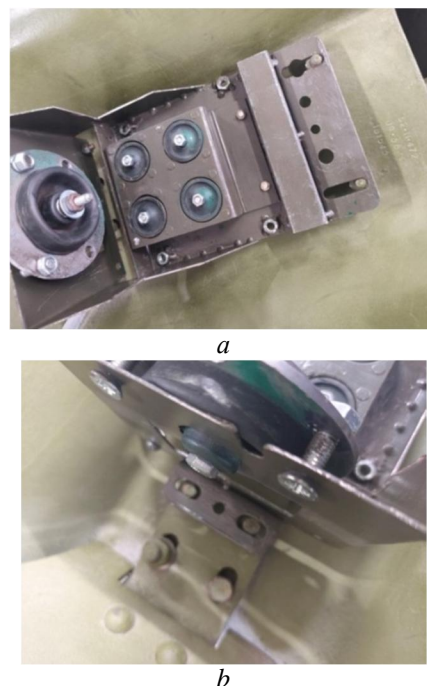


Fig. 4. Bracket from shock absorption platform (SAP) for installation with mounting bolts of the fastening of the D20 towed gun recoil device:

- a* – mounting with front bolts,
- b* – mounting with rear bolts

A mounting bracket has been developed to mount the RMPMD on the D30 trailer gun, which complements the one discussed above. The external appearance of this bracket is shown in Fig. 5a, and its integration with the bracket for the D20 gun is shown in Fig. 5b. The mounting of the SAP on the D30 gun is shown in Fig. 5c, and the RMPMD mounted on the gun is shown in Fig. 5d.

A bracket has been developed for mounting the SAP with RMPMD on self-propelled guns 2S1 and 2S3, as shown in Fig. 6. Its distinctive feature is the coupling of the SAP mounting locations with the corresponding design features of the bracket for the D20 towed gun.

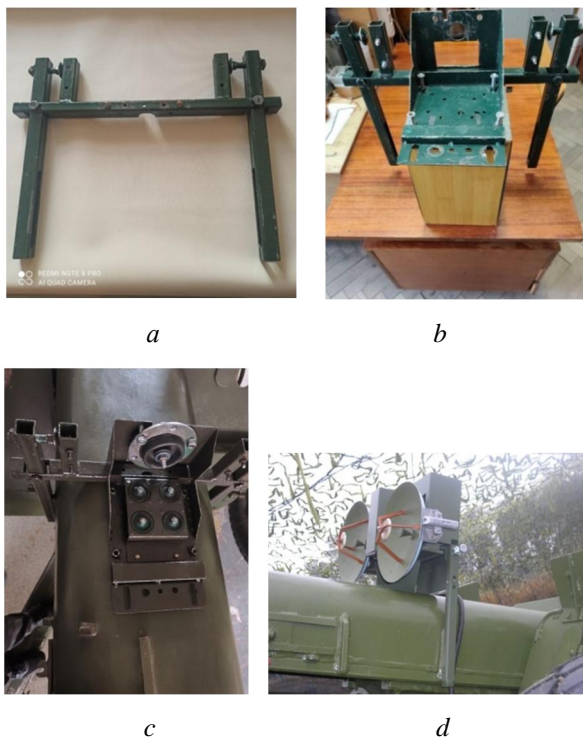


Fig. 5. Installation of the RMPMD on the D30 gun



Fig. 6. Bracket for mounting RMPMD with SAP on self-propelled guns 2S1, 2S3

The alignment of the bracket for self-propelled guns 2S1 and 2S3 with the bracket for the D20 towed gun is shown in Fig. 7.



Fig. 7. Alignment of brackets for self-propelled guns 2S1, 2S3 with a bracket for a towed gun D20

The installation of the RMPMD on the RD of the 2S1 and 2S3 self-propelled guns is shown in Fig. 8.

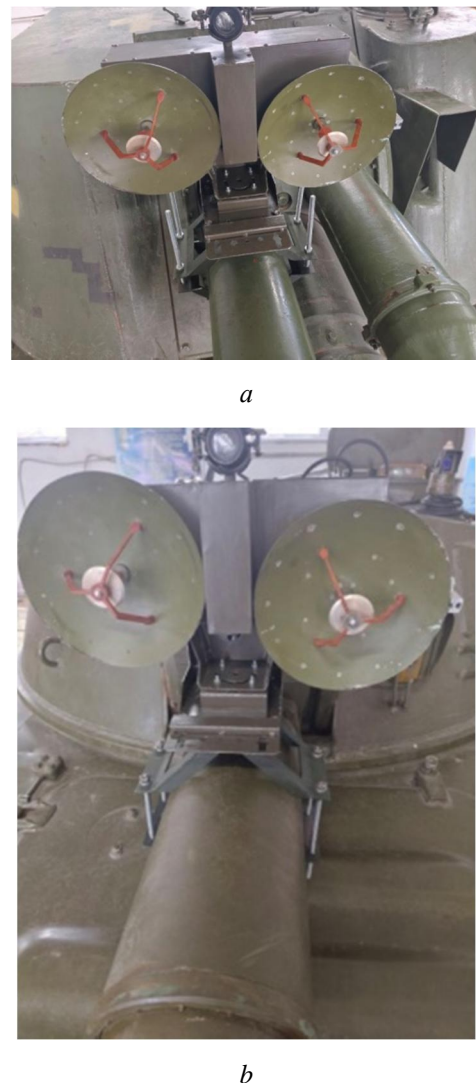


Fig. 8. Installation of RMPMD on self-propelled guns:
a – 2S1, *b* – 2S3

Conclusions

1. We have substantiated the method for installing a radar motion parameter measuring device (RMPMD) on artillery guns.

2. Within the framework of a unified methodological approach, we have considered the design features of the unification of means for installing RMPMD artillery ammunition on D20 and D30 towed guns and 2S1 and 2S3 self-propelled guns, which, thanks to inter-system unification, have a minimum of unique components.

3. A shock absorption platform (SAP) has been developed for installing RMPMD on D20 and D30 towed guns and 2S1 and 2S3 self-propelled guns.

4. Further research involves the development of a software hardware complex for studying shock and vibration loads at the installation sites of the RMPMD on artillery guns and conducting experimental studies to assess the numerical characteristics of these loads before and after AP in order to optimize it and ensure the shock and vibration resistance and strength of the RMPMD when installed on artillery systems.

References

1. Budaretskyi Yu.I., Bahmat M.V., Schavinskyi Yu.V. and etc. (2018), "Obgruntuvannya shlyahiv intelektualizachii ASU RViA" [Wrapping the routes of intelligentization of ACS RViA]. *RS Global Sp.* № 1. pp. 10–17. [in Ukrainian].
2. Budaretskyi Yu. I., Bahmat M.V., Schavinskyi Yu.V. and etc. (2018), "Osoblyvosti avtomatyzachii vitchiznyanyh zasjbsv balistychnoi pidgotovky strilby" [Peculiarities of automation of manufacturing processes for ballistic preparation of shooting]. Kyiv: CNDI OVT. 2018. № 3. pp. 5–14. [in Ukrainian].
3. LINAPS (Laser Inertial Automatic Pointing System) an English company "Baye systems" URL: https://electronics.leonardo.com/documents/16277707/18316668/LDO_UK23_00394+LINAPS+Artillery+Pointing+System+LQ.pdf?t=1691136604921
4. Artyleriyska balistychna ctanchiya ABS-2S (1B66) i ABS-2 (1B66-1) "Rampa". URL: <https://f.eruditor.link/file/2286330>.
5. <https://f.eruditor.link/file/2286330>.
6. Artyleriyska balistychna ctanchiya ABS-1M URL: <https://j.twirpx.link/file/1785837/>
7. Alimpiev A.M., Pevchov G.V., Grib D.A. and etc. (2015), "Dovidnyk uchasnika ATO: Ozbroyennya i viiskova tehnika Zbroinyh syl Rosyiskoi Federachii : za zag. Red. A.M. Alimpieva" [ATO participant's witness: new and military equipment of the Armed Forces of the Russian Federation]. H.: HKB "Original". 732 p. [in Ukrainian].
8. Mortar Projectile Intermediate Ballistics Experimental Investigations by SL-520PE Weibel System. URL: https://www.researchgate.net/publication/396419173_Mortar_Projectile_Intermediate_Ballistics_Experimental_Investigations_by_SL-520PE_Weibel_System

9. Zozylyia V.M., Yula O.V. and Slednsikova O.S. (2023), "Analiz pryladiv ta system vymyruvannya dulinoi shvydkosti" [Analysis of adjustments and muzzle damping systems]. *Zbirnyk naukovykh prach DNDI ZS OVT*, Vyp. 1 (15), pp 49 – 61. [in Ukrainian].

10. Makeev V.I., Petrenko V.M. and Gytynik V.S. (2010), "Strilba artylerii: navchalnyi posibnyk" [Artillery shooting: the basic guide]. Sumy: Vydavnytstvo Sum. DU. 281 p. ISBN 978-966-657-308-0. [in Ukrainian].

11. "Ministerstvo Oborony Ukrainy. Pravila strilby s upravlynya vognem nazemnoi artylerii (dyvizion, batareya, vzvod, garmata). Zatverdgeno. Nakaz Generalnogo Shtabu Zbroynyh Syl Ukrainy 05.01.2018 № 6" [Ministry of Defense of Ukraine. Rules for shooting and fire control of unearthly artillery (division, battery, platoon, squadron). Confirmed. Order of the General Staff of the Armored Forces of Ukraine 05.01.2018 № 6]. [in Ukrainian].

12. "Efekt Doplera v klasychnyi fizychi" [The Doppler effect in classical physics]. URL: <https://www.google.com/search?q=Ефект+Доплера+в+класичній+фізиці> [in Ukrainian].

13. Travnikov E. M., Lazebny V. S., Vlasjuk G. G., Pilinskyi V. V., Spivak V. M. and Shvachenko V. B. : za zagalnoyu redakchieyu V. S. Lazebnogo. (2015), "Konstruyuvanya ta tehnologiya vyrobnytstva tehniky reestrachii informachii: U 3-h kn. Kn. 2. Osnovy konstruyuvanya : Navchalny pjsibnyk" [Design and development technology for information registration technology: In 3 books. Book 2. Basics of design : Basic handbook]. K.: «KAFEDRA». p.: il. ISBN 966-8934-05-9 (kn. 2). [in Ukrainian].

14. State Standart of Ukraine (1994), "2862-94. "Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy" [2862-94. Methods of calculating reliability indicators. general requirements]. *Derzhstandart Ukrainy*, Kyiv, 32 p. [in Ukrainian].

15. State Standart of Ukraine EN 60068-2-64:2022, "Nadiynist tehniky. Terminy ta vyznachennya" [Reliability of technology. Terms and meaning]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_2860_94_nadiynist_tekhniki_termini_ta_vyznachennja/5-1-0-1209 [in Ukrainian].

16. State Standart of Ukraine EN 60068-2-31:2022 (EN 60068-2-31:2008, IDT; IEC 60068-2-31:2008, IDT). "Vyprobuvannya na vplyv zovnishnyh chinnykiv. Chastyna 2-31. Vyprobuvannya. Vyprobuvannya Ec. Udary za grubogo povodgennya, perevagno dlya zrazkiv obladnannya - Vpershe" [DSTU EN 60068-2-64:2022 Testing for influx of external officials. Part 2-64. Testing. Viperbuvannya Fh. Vibration, broad-skinned influx and set]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=101411 [in Ukrainian].

17. State Standart of Ukraine EN 60068-2-64:2022. "Veprobuvannya na vplyv zovnishnyh chinnykiv. Chastyna 2-64. Vyprobuvannya. Vyprobuvannya Fh. Vibrachiya, shyrokosmugovy vypadkovy vplyv i nastanovy (EN 60068-2-64:2008, IDT; IEC 60068-2-64:20...) [Testing for the influx of external officials. Part 2-31. Testing. Testing Ec. Strike for rude behavior, it is important for the expression of possession]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=101410 [in Ukrainian].

**МЕТОД І ЗАСОБИ ВСТАНОВЛЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ
БОЄПРИПАСІВ НА ГАРМАТАХ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ**

А.О. Дзюба, Ю.І. Бударецький

Під час ведення бойових дій ключову роль відіграє вогневе ураження противника на максимальних дуальностях засобами артилерійських систем. Ефективність такого ураження суттєво залежить від якості повної підготовки стрільби і її складової – балістичної підготовки стрільби. Точність балістичної підготовки стрільби суттєво залежить від технічних параметрів радіолокаційного вимірювача параметрів руху боєприпасів артилерійських систем і методів його застосування. Найбільша точність такого вимірювача досягається при його встановленні безпосередньо на гарматах артилерійських систем.

Ключові слова: балістична підготовка стрільби, радіолокаційний вимірювач параметрів руху артилерійських боєприпасів, амортизаційна платформа, засоби кріплення.

УДК 623.546

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.115-126>

О.В. Корольова*, П.І. Казан, В.В. Хахула, А.В. Луцькова, І.Б. Мількович

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ВАРІАНТ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРОЗДІЛУ БЕЗЕКІПАЖНИХ НАЗЕМНИХ КОМПЛЕКСІВ

Безпілотні системи, та безекіпажні наземні комплекси зокрема, стали важливим елементом ведення бойових дій в ході війни за незалежність України проти російського загарбника. На них покладається доволі широкий спектр завдань виходячи з їх призначення: розвідувальні, ударні (вогневі), логістичні, евакуаційні тощо.

У статті наведено аналіз сучасних найбільш поширених у Збройних Силах України зразків багатофункціональних безекіпажних наземних комплексів різних типів, зокрема кодифікованих. Окреслено потенціал та обмеження безекіпажних наземних комплексів з огляду на аналіз тактико-технічних характеристик та бойових можливостей за досвідом застосування.

Визначено та обґрунтовано ключовий показник оцінювання ефективності застосування підрозділу безекіпажних наземних комплексів, який включає групові показники: функціональність / бойові спроможності, мобільність, захищеність, автономність, та прокоментовано інтерпретацію обраних складових.

Наведено розроблену методику оцінювання ефективності застосування підрозділу безекіпажних наземних комплексів, за основу якої взято мультикритеріальний метод оцінювання за групою показників з ваговими коефіцієнтами, а головним критерієм визначено кількісний (числовий) показник оцінювання. Наведено етапи роботи з оцінювання ефективності застосування бойових безекіпажного наземного комплексу із використанням створеної методики.

Проведено оцінювання ефективності виконання завдань за призначенням бойовим безекіпажним наземним комплексом, для наочності наведено приклад.

Ключові слова: безекіпажний наземний комплекс, моніторинг, розвідка, виявлення, засіб ситуаційної обізнаності, оцінювання ефективності, застосування підрозділу.

Постановка проблеми

У ході сучасної російсько-Української війни безпілотні системи (БпС) здійснюють перехід від звичайного до новітнього озброєння. Підрозділами Сухопутних військ широко використовуються повітряні комплекси та наземні роботизовані платформи, відповідно до нової класифікації [1] – безекіпажні наземні комплекси (БеНК). Спостерігається бурхливий розвиток та розробки нових зразків БеНК різними виробниками, що потребує приведення до єдиного стандарту та єдиних поглядів на визначення, класифікацію, роль і місце БпС серед інших сил і засобів ЗС України. Сьогодні триває розробка нових та удосконалення існуючих доктринальних та нормативних документів, запроваджено алгоритми щодо кодифікації вітчизняних та іноземних зразків. Ця трансформація ставить ЗС України перед низкою питань щодо мети, завдань, способів та порядку

застосування цих систем, а також постає питання оцінювання ефективності застосування БеНК.

Згідно з Доктриною «Безпілотні системи», затвердженої у серпні 2025 року [1], безекіпажний наземний комплекс – це сукупність апаратів, пов'язаних з ним станцій наземного керування, ліній керування та контролю, інші елементи, які забезпечують функціонування (за попередньою Доктриною 2023 року вживався термін наземні роботизовані комплекси або НРК).

Сьогодні розробляються БеНК різного призначення, проте досвід застосування показує, що їх доцільно використовувати переважно для логістики, евакуації та розвідки; бойові модулі – тільки в супровідних / підтримувальних діях. Необхідно вдосконалювати окремі технічні показники, для чого треба визначитись з проблемними питаннями та обґрунтувати критерії оцінювання БеНК.

Article history: Income 15 October 2025; Revised 17 October 2025; Accepted 24 October 2025; Print 05 December 2025

Корольова О.В. ORCID ID: 0000-0002-9265-8445, Казан П.І. ORCID ID: 0000-0001-5929-0469,
Хахула В.В. ORCID ID: 0000-0002-6198-8652, Луцькова А.В. ORCID ID: 0000-0002-8959-927X,
Мількович І.Б. ORCID ID: 0000-0003-4478-9536

* Corresponding author ok_im2@ukr.net

© Корольова О.В., Казан П.І., Хахула В.В., Луцькова А.В., Мількович І.Б.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

За функціональним призначенням БєНК у ЗСУ можна поділити на кілька типів, кожен з яких виконує специфічні завдання [2], [3] (на рис. 1 розташовані зліва направо):

Ударні (вогневі) комплекси – це озброєні платформи, призначені для прикриття піхоти вогнем або прямих ударів по позиціях ворога. Прикладом є БєНК «Лють» (рис. 1) або інтеграція українського бойового модуля (БМ) «Буря» виробника Frontline на платформу THeMIS.

Інженерні (саперні) комплекси обладнані інструментами для розмінування або встановлення проти-піхотних мін. Прикладом є «Гном-Мінер» (рис. 1). Вони можуть прокладати коридори для піхоти або встановлювати мінні загорождження.

Логістичні комплекси – невеликі напівавтономні платформи для перевезення вантажів, таких як боєприпаси, паливо, провіант на передову або між підрозділами. Це базова функція наземного дрона, і в цій ніші досягнуто найбільших успіхів (рис. 1 – логістичні БєНК «Терміт»).

Евакуаційні комплекси – роботизовані носії на колісному або гусеничному ході, що вивозять поранених із «червоних зон» (зокрема з мінних полів), мінімізуючи ризик для медиків. Наприклад, БєНК «Ардал» (рис. 1) вже на практиці використовувався в евакуаційних місіях [4].

Розвідувальні комплекси – малі маневрені роботи з камерами та сенсорами, які працюють у тандемі з безпілотними літальними апаратами (БПЛА), виконуючи функції «очей роботів» для спостереження та компенсації слабкого поля зору наземних машин.



Рис. 1. Різновиди БєНК, фото Центр інформаційно-комунікаційної підтримки Сухопутних військ

За даними Управління безпілотних систем Командування СВ станом на липень 2025 відомо [2-3], що на:

логістичні та евакуаційні завдання припадає 47% місій БєНК;

інженерні (мінування/розмінування) близько 25%;

ударні (вогневі) – приблизно 12%;

спеціальні місії – решта 16% (рис. 2).

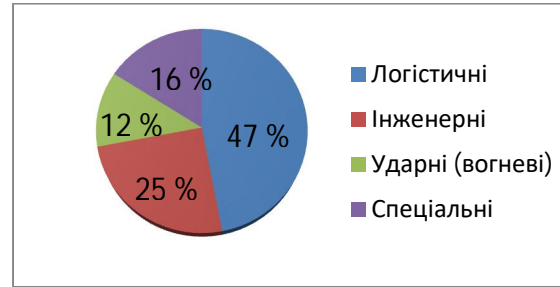


Рис. 2. Діаграма відсоткового розподілу місій БєНК

Сьогодні БпС впроваджуються у всі сфери та ділянки застосування. Згідно з Доктриною [1] від 2025 року розподіл різних типів БєНК (апаратів, БєНА) відбувається між більшістю видів (родів) військ (сил) та їх підрозділами.

Тому необхідно детально проаналізувати застосування БєНК у бойових сучасних діях та виявити їх слабкі сторони та проблемні моменти для окреслення основних показників, які впливають на ефективність застосування БєНК.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз досвіду застосування БтНК у бойових діях російсько-Української війни (публічні звіти, аналітика [1-17]. та внутрішні військові джерела) окреслює загальні проблеми:

Недостатній рівень захищеності: одна з найсерйозніших операційних загроз – вразливість до засобів РЕБ та кібератак (багато БєНК втрачають контроль через РЕБ, втручання в управління, джемінг, спуфінг); вразливість до вогню піхоти; для важких бойових функцій і захисного бронювання сьогодишні платформи ще слабкі.

Слабкий рівень керованості: необхідність постійної підтримки, БєНК потребують постійної координації з іншими силами для максимальної ефективності, оскільки самостійно вони не можуть вести затяжні бої; ризик захоплення і використання ворогом, технічна інформація та давачі можуть бути скопійовані або використані проти власних сил.

Недостатній рівень маневреності: залежність від ґрунту – поля, складний рельєф (для колісних) та урбанізована зона, вузькі міські вулиці (для гусеничних); значна залежність від особливостей довкілля та погодних умов.

Тривалість та надійність місії: енергоживлення – обмежений час автономної роботи (середній час роботи однієї батареї – години, за інтенсивних завдань менше); логістична витрата (заряд або заміна); складна логістика зарядки; відмови; зниження працездатності через екстремальні умови роботи (пил, вода, мороз/спека, пересічений рельєф тощо).

Вартість / ефективність витрат: співвідношення ефекту зекономлених людських ресурсів та виконаних завдань до загальних витрат. Корисність висока, але вартість і масштаби обмежують застосування: час і ресурси на ремонт та заміни; потреба у запчастинах; велика кількість комерційних систем; складний ремонт у полі; масштабна закупівля і підтримка потребують значних ресурсів; водночас потреба у десятках/тисячах одиниць для повсюдного застосування

З огляду на широкий перелік проблемних питань щодо застосування БпНК необхідно визначити основні часткові показники оцінювання ефективності

застосування БпНК, які роблять основний вклад в загальну оцінку.

Формулювання мети статті – обґрунтування та оцінка головного показника ефективності застосування підрозділу БпНК.

Викладення основного матеріалу

Загальний огляд джерел щодо створення наземних платформ та їх застосування у бойових діях в Україні висвітлює можливості та обмеження, які сьогодні виникають перед БпНК, табл. 1 [4-10].

Таблиця 1

Порівняння: потенціал та обмеження БпНК

Потенціал та переваги	Реальні обмеження
Висока мобільність і можливість діяти у небезпечних для людини умовах	Застригання на складному рельєфі, проблеми з пересуваністю у болотистих і гірських умовах
Точність та автоматизація завдань завдяки сенсорам та алгоритмам	Збої у позиціонуванні, залежність від GPS, вразливість до РЕБ
Можливість працювати без ризику для життя людини	Низька надійність деяких систем, ризик виходу з ладу під час операцій
Логістична підтримка (транспортування вантажів, боєприпасів, евакуація)	Мала вантажопідйомність у більшості моделей, проблеми з балансуванням
Скорочення витрат людських ресурсів, автоматизація завдань	Необхідність значного обслуговочного персоналу, складний ремонт у полі
Можливість інтеграції у системи управління військами та розвідки	Відсутність стандартизації, різні протоколи, несумісність програмного забезпечення
Розвиток технологій – підвищення бойових та інженерних можливостей у майбутньому	Обмежене фінансування, висока вартість виробництва та експлуатації

Бачимо, що кожен зразок має недоліки, тому будемо досліджувати вплив функціонального призначення БпНК на його часткові характеристики.

Виконання БпНК завдань за функціональним призначенням (тактична ефективність) можна розглядати практично як виконання бойового завдання інакше – чи досягає БпНК поставлених бойових/операційних завдань щодо розвідки, розмінування тощо). Якісне виконання покладеної місії (наприклад, здійснення евакуації або доставка вантажу) є одним з вагових показників ефективності виконання завдання БпНК. Тому логічно розглянути цю властивість БпНК більш детально і зосередитись на окремих зразках, які представляють відповідну категорію. З огляду на реальне практичне використання наземних платформ, за досвідом бойових дій [2-13], для подальшого дослідження доцільно зосередитись на трьох класах БпНК: логістичних, евакуаційних та ударних (вогневих).

Застосування логістичних БпНК (рис. 3) у бойових діях в Україні відзначається такими головними проблемами: [3], [5-13].

Вразливість до засобів РЕБ (глушіння та протидія зв'язку, перехоплення керування), особливо тих БпНК, що керуються дистанційно або мають обмежену автономію. В умовах РЕБ (російські “Житель”, “Сінтія”, “Поле-21”) канали керування глушаться, що призводить до втрати управління; лінії зв'язку часто аналогові або без зашифрованих протоколів; затримки передачі відеосигналу до 1-2 секунди. Це знижує їхню ефективність у інтенсивних зонах бойових дій і робить легкою ціллю.

Обмежений час роботи батареї й енергетична автономність. Батареї обмежують тривалість місії / патрулювання і змушують частіше відводити платформи для підзарядки або заміни акумуляторів, що ускладнює їхню безперервну експлуатацію на фронті. Це обмеження особливо помітне при інтенсивному використанні в холоді чи при транспортуванні вантажів.

Обмежена вантажопідйомність і балістична стійкість (бронювання). Більшість доступних БпНК розраховані на легкі вантажі (логістика, розвідка), але мають обмеження для встановлення важких систем

озброєння чи захисту; це знижує їхню ефективність у ролі повноцінної ударної платформи.

Недостатня підготовка операторів і відсутність відпрацьованих тактик застосування. Не вистачає підготовлених кадрів і відпрацьованих процедур / тактик інтеграції БеНК у підрозділи – як використовувати їх разом із піхотою, артилерією, РЕБ і розвідкою. Це призводить до субоптимального використання та іноді – до скорочення рот БеНК.

Логістика, технічне обслуговування та ремонт на полі бою. Забезпечення запчастинами, діагностика й

ремонт БеНК на фронті складні: багато платформ – комерційні зразки, для яких важко знайти сумісні деталі або фахівців з техобслуговування у польових умовах.

Ризик захоплення / використання ворогом (трофеїзація). У разі втрати БеНК їх можуть відремонтувати, адаптувати або використати для розвідки проти власних сил – це питання безпеки та контрзаходів.

Вартість і масштабне виробництво. Щоб впровадити БеНК у великому масштабі, потрібні значні кошти на закупівлю, локалізацію виробництва та підтримку – і це конкурує з іншими пріоритетами оборони.



а



б



в

Рис. 3. Логістичні БеНК вітчизняного виробництва:
а – TerMIT (TENCORE); б – CRAB-LS; в – Targan (TarGun)

Логістичні та евакуаційні платформи мають схоже призначення, але в евакуаційних БеНК є свої специфічні функціональні особливості та труднощі. Проблеми евакуаційних БеНК (рис. 4) на фронті України є системними, і багато з них вже зафіксовані в практичних відгуках підрозділів [4-10]. Станом на 2024–2025 роки технічний аналіз показує схожі з логістичними платформами проблеми щодо маневре-

ності та прохідності: на пересіченій місцевості (воронки, грязь, сніг) легкі колісні (на кшталт Rys-Med) часто втрачають тягу або буксують; гусеничні варіанти (наприклад, Ironclad Medevac, RoboMedic) мають вищу прохідність, але потребують потужного живлення та важчі для транспортування; часто відсутня автоматична система стабілізації при евакуації пораненого – виникає ризик повторних травм.



а



б



в

Рис. 4. Евакуаційні БеНК:
а – RoboMedic (Robotic Complexes), Україна;
б – THeMIS MedEvac (Milrem), Естонія;
в – Ardal (BUREVII), Україна

Захищеність більшості евакуаційних платформ: (як і логістичних) мають мінімальний бронезахист, розрахований лише на уламки; вразливі до FPV-дронів і стрілецької зброї калібру 7,62–12,7 мм; відсутність активних систем придушення дронів (РЕБ) або датчиків наближення FPV.

Комунікація та керування в умовах РЕБ також ускладнена через чутливість БеНК до глушіння, перехоплення та втрат керування, а затримки передачі відеосигналу у 1-2 секунди критично під час евакуації з-під вогню.

Бойова живучість і ремонтпридатність, схоже до логістичних, це: відсутність стандартизації акумуляторів та вузлів – важко відновити в польових умовах; більшість евакуаційних БеНК мають незахищені електродвигуни, які легко пошкоджуються пилом або уламками; при виході з ладу системи управління – немає аварійного режиму повернення.

Також у підрозділах часто немає спеціальних операторів, підготовлених саме до евакуаційних БеНК; несумісність між різними типами систем управління, особливо якщо техніка різних виробників.

Аналіз матеріалів досвіду застосування БеНК Силами оборони України показав, що станом на грудень 2024 року системного використання бойових БеНК не зафіксовано [11-12].

Характерною особливістю застосування бойових БеНК за досвідом російсько-Української війни є стрільба з місця (коротких зупинок). Ведення ефективної стрільби бойовими БеНК з ходу (під час руху) сьогодні, на жаль, є проблематичним, досвід постійного застосування зафіксовано лише у 4 підрозділах з 22 опитаних, а підтверджені випадки ураження живої сили противника мають поодинокий характер. Підрозділи, що застосовують бойові БеНК (рис. 5) в російсько-Українській війні, поки не визначили їх місця у власних бойових порядках. Потенціал застосування бойових БеНК залишається дискусійним. Вітчизняні розробники та виробники БеНК покращують та удосконалюють існуючі зразки, тестують та випробовують свої вироби в підрозділах під час реальних бойових дій та в полігонних умовах.

Для зручності аналізу БеНК поділено на групи: БеНК+БМ (UGV+RWS), БМ (RWS) та камікадзе (в англомовних джерелах – Unmanned Ground Vehicles та Remote Weapon Station, UGV та RWS та kamikaze).

Типовими проблемами і обмеженнями при застосуванні ударних (вогневих) БеНК можна виділити [7-17]:

Віддача і стабілізація – стрільба з крупних калібрів (особливо під час руху) потребує стабілізованої

платформи і компенсаторів, без цього значне падіння точності.

Бойовий боскомплект – обмежена вантажопідйомність зменшує кількість боеприпасів, що може призвести до «вичерпання» платформи в критичний момент.

Фізичне пошкодження модуля – ураження БМ чи сенсорів робить платформу марною як бойову одиницю.

Помилки в ідентифікації – алгоритми розпізнавання у реальному середовищі часто дають хибні спрацьовування (пил, дим, маркування, цивільний рух).

Обмеження сенсорного охоплення – вузькі кути огляду, відсутність 360° без додаткових сенсорів, тобто ситуація, коли платформа «заплющена» і не бачить загрозу збоку чи з тилу.

Втручання РЕБ – руйнація або збільшення затримки зв'язку (ускладнює прицілювання); «зависання» платформи у критичній зоні.

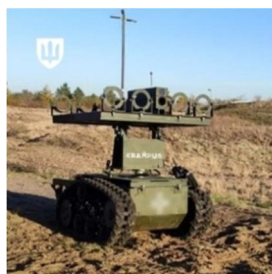
Короткий життєвий цикл – малі / середні ударні (вогневі) БеНА без броні вразливі до кулеметного, гранатометного удару та ворожої артилерії; втрата чи захоплення; навіть при захисті від осколків підрип під днищем та інженерні пастки можуть вивести платформу з ладу.

Підтримка боскомплекту і батарей – постачання, зарядка, заміна АКБ суттєво впливає на тривалість місії.

Ремонт і ресурси – ремонтувати БеНК на полі бою важче, ніж звичайну логістичну платформу.



а



б



в

Рис. 5. Ударні (вогневі) БеНК вітчизняного виробництва:

а – PROTECTOR (ТОВ «Українська бронетехніка»);

б – Krampus Brave1/Deviro; в – БУРЯ (Frontline)

Категорія «одноразові / камікадзе та імпровізовані бойові роботи» – приклади польових, одноразових або кустарних бойових платформ і модулів. Дешеві, масово вироблені або модифіковані платформи для одноразових ударів, пасток, блокування або підняття спеціальних засобів (включно зі встановленням радянських ПТРК / ПЗРК на дистанційно керовані шасі).

Реальне застосування «камікадзе» підходів представлено низкою вітчизняних розробок: Ratel S (рис. 6), MINI BRO, Гісна, Копук S, TETRIS тощо. Одноразові БеНК широко застосовуються для ризикових завдань: підрипних операцій, підходів під ворожі позиції, монтажу старих зенітних/ракетних пускових установок на дистанційні платформи тощо.



Рис. 6. Мала колісна дистанційна платформа-камікадзе Ratel S

Основними проблемами можна визначити:

Надійність і беззахисність – кустарні системи часто мають малі резерви надійності, слабе керування, легко виводяться з ладу або перехоплюються.

Операційна сумісність – багато таких саморобок важко інтегрувати в стандартні тактичні ланцюги, зв'язок і логістику.

На практиці були повідомлення про серйозні обмеження: неробочий або ненадійний зв'язок у бою, швидка втратність, технічні несправності; демонструє, що озброєний БєНК без надійного зв'язку й стійкості до РЕБ – мало корисний і швидко стає тягарем.

Таким чином, бойовий модуль підвищує тактичну корисність БєНК, але одночасно значно підвищує вимоги до інших компонентів системи – броні, енергетики, зв'язку, сенсорів і процедур керування. Найкращим застосуванням для ударних (вогневих) БєНК є доповнення/підсилення людини, робота у складі комбінованих груп (людина + БєНК + артилерія / БпЛА), де вони виконують обмежені вогневі ролі з людиною в ланці сприйняття.

Можливості сучасних розробок БєНК, демонструють широкий спектр для виконання бойових завдань, тому доцільно провести оцінювання ефективності застосування БєНК.

Показники для визначення оцінювання ефективності застосування бойових безпілотних систем (наземних роботизованих комплексів). Встановлення показників для визначення будь-якого оцінювання ефективності є ключовим кроком у підготовці до збирання даних, який впливає на якість та корисність отриманих результатів.

Враховуючи основні вимоги до показників (релевантність до мети процесу, універсальність та зрозумілий фізичний зміст) оцінювання ефективності застосування бойових безпілотних систем, зокрема безпечних наземних комплексів (БєНК), пропонується здійснювати з використанням таких чотирьох основних групових показників:

функціональність (функціональні властивості БєНК визначаються здатністю виконувати завдання за призначенням: транспортні/евакуаційні для логістичних (евакуаційних) БєНК та бойові для ударних (вогневих) БєНК),

мобільність (маневреність БєНК – це комплексна характеристика, що характеризує зразок щодо можливостей руху для забезпечення виконання його завдання, в роботі показник маневреності визначається як здатність БєНК до раптовості та вчасності дій, можливістю БєНА долати перешкоди);

захищеність (захищеність / прихованість БєНК – це комплексна характеристика, що спричиняє можливість виявлення та знищення зразка противником, тому оціночною характеристикою для них вважається наявність засобів їх приховування);

автономність (визначається здатністю БєНС виконувати поставлені завдання без постійного втручання оператора (з самостійним прийняттям рішень у межах алгоритмів керування).

Зазначений перелік і найменування показників не є сталими і можуть змінюватися залежно від конкретних умов, за яких здійснюється визначення пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень.

Порядок розрахунку ключового показника ефективності застосування бойових БєНК [18-22]. З урахуванням обраних показників для оцінювання ефективності застосування бойових БєНК та зважаючи на необхідність забезпечення достатньої оперативності й простоти обчислень, у методиці використовуються методи експертного оцінювання, достатня точність яких забезпечується консенсусним рішенням залучених експертів.

Підбір експертів, визначення їхньої компетенції, інші передбачені заходи під час експертного оцінювання здійснюються відповідно до відомих процедур, тому в цій методиці не описується. Важливо, щоб під час визначення показників для оцінювання ефективності застосування бойових БєНК усіма групами експертів використовувався той самий метод.

З метою забезпечення простоти, наочності та оперативності отримання результатів для оцінювання ефективності застосування бойових БєНК пропонується використовувати метод зваженої суми, який є ефективним для визначення пріоритетів серед кількох варіантів. Цей метод дозволяє упорядкувати варіанти за ступенем їхньої важливості або значущості на основі визначених показників. На цьому етапі відбувається оцінювання ефективності зразка (бойовий потенціал), його можливості до виконання означених завдань згідно з дослідженням реальних ТТХ БєНК.

Для оцінювання ефективності застосування БєНК необхідно врахувати вплив динамічних чинників, які виникають протягом виконання завдання і ступінь спроможності зразка витримувати цей вплив – надійності за один бойовий вихід.

Тому основним показником оцінювання ефективності застосування бойових БєНК визначено ключовий показник ефективності застосування (КПЕЗ), з урахуванням надійності за один бойовий вихід.

Для визначення E_{tot} – КПЕЗ запропоновано ввести корегуючий коефіцієнт K^H – коефіцієнт надійності за один бойовий вихід (КНОБ). Так оцінювання ефективності застосування БєНК розраховується за співвідношенням (1)

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^N \omega_i E_i K_i^H, \quad (1)$$

де:

E_i – нормалізовані оцінки групових критеріїв за визначеною експериментальною шкалою;

ω_i – вагові коефіцієнти важливості (визначаються методом експертного оцінювання), де $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$;

K_i^H – коефіцієнти надійності за один бойовий вихід для відповідного групового показника;

N – кількість групових критеріїв.

Значення КНОБ знаходиться в інтервалі $K_i^H \in [0,1]$, залежить від ступеня впливу. В разі виведення з роботи відповідного групового показника відбувається втрата спроможності до подальшого виконання завдання (наприклад, відбулось застрягання БеНК з високим ступенем відмови до подальших дій – повне виведення з ладу зразка), тоді $K_i^H = 0$, що призводить до суттєвого зменшення КПЕЗ.

У рамках цього дослідження приклади розрахуноків для статичної моделі, без врахування динаміки бою та змін, що відбуваються, тому коефіцієнт надійності за один бойовий вихід приймається за 1 і на результати дослідження не впливає – $K_i^H = 1$.

Розрахунок вагових коефіцієнтів показників оцінювання ефективності застосування бойових БеНК здійснюється за допомогою методу попарних порівнянь. Для можливості порівняння якісних показників підкритеріїв групового критерію, які мають різну природу, використовується нормалізація значень оцінок методом min–max. У разі покращення одного або декількох значень підкритеріїв (наприклад, при модернізації зразка), для оцінювання впливу цих покращень на загальний показник ефективності зразка, використовується методом аналізу чутливості.

Методика оцінювання ефективності застосування бойових БеНК передбачає формування вхідних даних; розрахунок складових для оцінювання ефективності застосування бойових БпС (БеНК); оцінка результату. Структурну схему методики оцінювання ефективності застосування бойових БеНК наведено на рис. 7.

Основними припущеннями при вирішенні задачі оцінювання ефективності застосування підрозділів бойових БеНК є:

- противник може здійснювати вплив по наших військах;
- підрозділи БеНК спроможні виконувати бойові завдання (боездатні);
- підрозділи БеНК забезпечені необхідними матеріальними засобами;
- система управління забезпечує доведення інформації до різних ланок управління військами.

Під бойовим застосуванням (БЗ) розуміється виконання БеНК завдань за призначенням в умовах бойових дій, БеНК виконують завдання щодо підтримки основних сил підрозділу, ВЗ – виконання завдання.

Етапи роботи з оцінювання ефективності застосування бойових БеНК.

Етап 1 – підготовка вихідних даних, формування експертної групи, підготовка матеріалів для проведення процедур оцінювання.

Етап 2 – формування складових для оцінювання ефективності бойового БеНК.

Етап 3 – оцінювання ефективності застосування бойового БеНК.

Етап 4 – формування висновків експертної групи щодо оцінювання ефективності застосування бойових БеНК.

На першому етапі для експертної групи готуються вихідні дані щодо умов оцінювання ефективності застосування бойових БеНК (відбувається визначення еталонного зразка та значення його ТТХ та економічної складової); проходить визначення об'єктів оцінювання та підготовка матеріалів для проведення процедур оцінювання (відомості щодо ТТХ, звіти та протоколи випробувань тощо); здійснюється підбір експертної групи та підготовка необхідних для проведення процедур оцінювання (складання аркушів опитування, анкет, чек-листів тощо).

На другому етапі відповідно до відомих процедур проводиться формування матриці вагових коефіцієнтів бойових властивостей БеНК за результатами усвідомлення бойового завдання. Експертною групою здійснюється вивчення підготовлених на першому етапі вихідних даних, їх узагальнення та визначення переліку групових критеріїв та часткових складових для оцінювання ефективності бойового БеНК. Проводиться розрахунок коефіцієнта ефективності КПЕЗ.

На третьому етапі експертною групою проводиться оцінювання ефективності застосування бойового БеНК. На етапі оцінювання відбуваються дві перевірки значень зразка, що досліджується: ключового показника ефективності застосування бойового БеНК та економічної складової зразка, за потреби. В разі необхідності пошуку шляхів покращення зразка проводиться повторна перевірка отриманих після модернізації значень.

На четвертому етапі експертною групою формуються висновки щодо оцінки ефективності застосування бойових БеНК, готуються пропозиції та подаються на подальший розгляд.

Для визначення якісної оцінки ефективності застосування бойових БеНК (високий, середній та низький рівні) використовується загальновідома шкала Харрінгтона.

Практична реалізація запропонованої методики на основі використання даних КПЕЗ бойових БеНК дозволяє забезпечити оцінювання ефективності виконання завдань за призначенням ударних (вогневих) БеНК, наочно побачити існуючі проблемні питання та обґрунтувати напрями їх усунення.

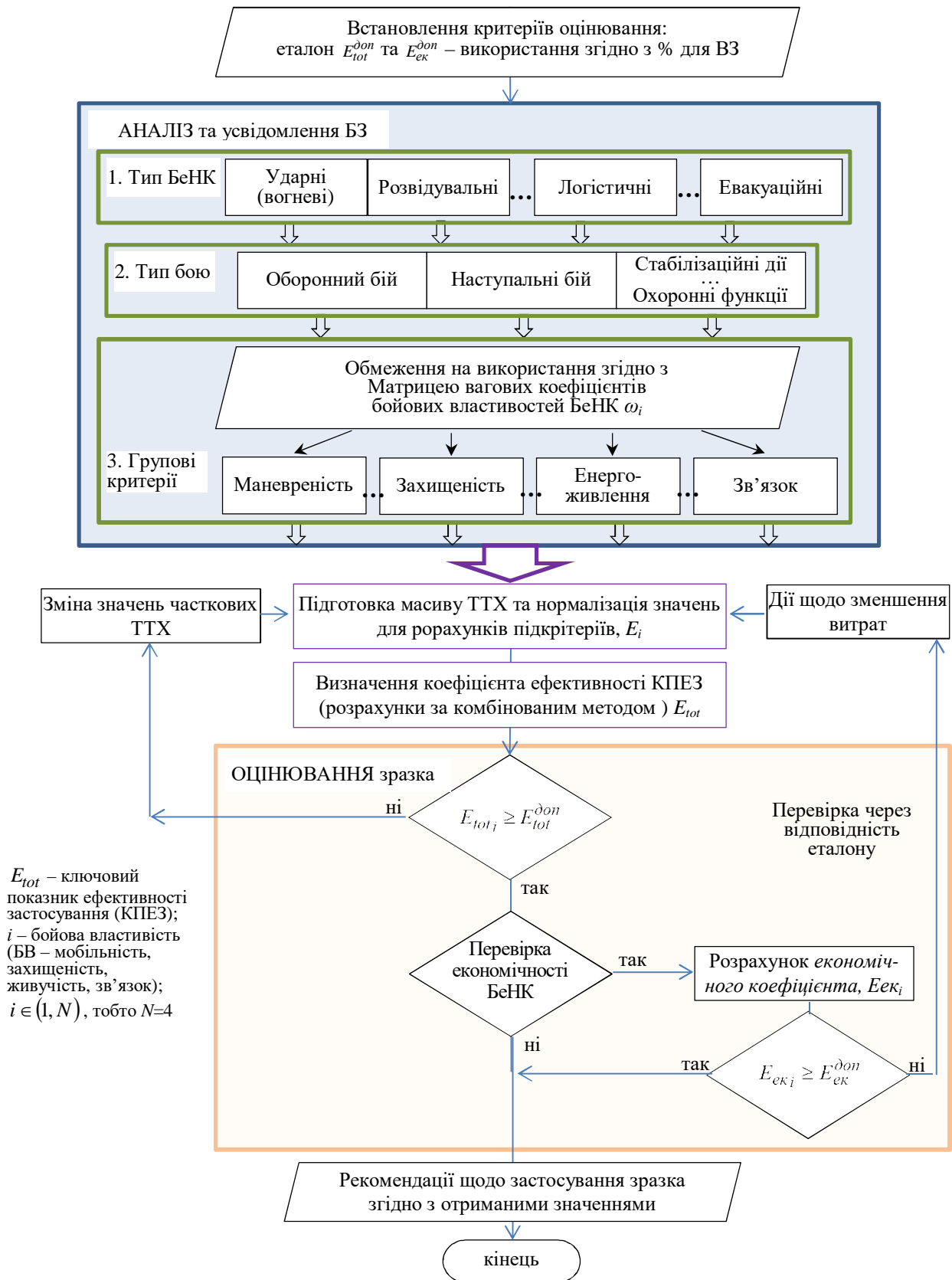


Рис. 7. Схема методики оцінювання ефективності застосування бойових БпС (БєНК)

Приклад оцінювання ефективності БеНК у різних сценаріях. Для визначення КПЕЗ у різних сценаріях (видах бою) пропонується змінювати значення вагових коефіцієнтів важливості для окремих групових критеріїв згідно з потребами бойових дій. В табл. 2 наведено розрахунок КПЕЗ для 5 зразків бойових турелей (Buria, ShaBlya, Wolly, Pernach, Tavria) для трьох альтернативних вагових наборів дій (тактичних ситуацій):

Сценарій 1 «Стаціонарний / оборонний» (наприклад, середній БеНК з БМ забезпечує обороні тригодинний вогневий пункт) – підвищена вага для виконання бойового завдання, середні для забезпечення автономності);

Сценарій 2 «Міський / захищений» (наприклад, колісний БеНК з кулеметом прикриває евакуацію) – підвищена вага захищеності;

Сценарій 3 «Мобільний наступ / удар» (наприклад, малі БеНК здійснюють влучні атаки на легкі склади противника) – підвищена вага бойових властивостей і маневреності.

Визначено групові критерії та їхні показники: бойова спроможність (вогнева міць, точність, сумісність, автоматизація); мобільність (швидкість, прохідність, запас ходу, маневри); захищеність (броня, протидія РЕБ (EW), помітність); автономність (енергія, алгоритми, зв'язок). Проведено нормалізацію оцінок [19-20] та виставлено відповідні бали, згідно з ТТХ зразків. За співвідношенням (1) визначено КПЕЗ для відповідного сценарію для кожного зразка.

Таблиця 2

Значення КПЕЗ бойових турелей для 3 альтернативних сценаріїв дій

Сценарій		Критерій	Підкритерій	Зразок				
№	Ваги			Buria	ShaBlya	Wolly	Pernach	Tavria
1	0,45	Бойова спроможність	вогнева міць	7	8	6	5	7
2	0,4		точність	6	6	7	6	6
3	0,5		сумісність	7	6	7	6	5
			автоматизація	5	4	7	4	5
1	0,25	Мобільність	швидкість	5	4	4	4	4
2	0,2		прохідність	5	4	4	5	5
3	0,3		запас ходу	6	4	4	4	4
			маневри	4	3	3	4	4
1	0,2	Захищеність	броня	2	2	2	1	3
2	0,35		помітність	3	3	3	3	3
3	0,1		EW	3	2	2	2	3
1	0,1	Автономність	енергія	5	4	5	4	5
2	0,15		алгоритми	5	4	6	4	5
3	0,1		зв'язок	5	4	5	4	4
		КПЕЗ E_{tot}^i , у.о.	Сценарій 1	5,10	4,54	5,21	4,19	4,78
			Сценарій 2	5,18	4,57	5,07	4,25	4,90
			Сценарій 3	5,39	4,76	5,27	4,50	4,92

Аналіз отриманих даних показує (рис. 8), що за визначених вагових оцінок для трьох альтернативних сценаріїв, обраних групових критеріїв та значень балів їх підкритеріїв, а також значення КПЕЗ для відібраного парку зразків кращі оцінки у бойових турелях Buria та Wolly.

Можна зробити висновок, що для:

Сценарію 1 доцільно обрати бойову турель Wolly – $E_{tot}^1=5.21$;

Сценарію 2 доцільно обрати бойову турель Buria – $E_{tot}^2=5.18$;

Сценарію 3 доцільно обрати бойову турель Buria – $E_{tot}^3=5.39$.

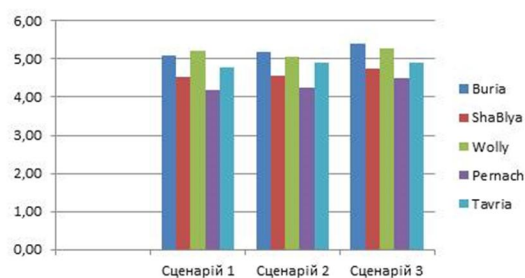


Рис. 8. Розподіл балів обраних зразків БеНК для трьох сценаріїв

В подальшому планується дослідити вплив динаміки бою та змін, які відбуваються з урахуванням КНОБ на оцінювання ефективності застосування БеНК.

Висновки

Проведено аналіз ТТХ та визначення бойових можливостей, потенціалу та проблем найбільш поширених у Збройних Силах України зразків БеНК різних типів, зокрема кодифікованих бойових БеНК згідно з досвідом застосування за функціональністю (призначенням). Визначено, що на ефективність зразків БеНК всіх типів найбільше впливають: функціональність, мобільність, захищеність та автономність.

Обрано методологічний підхід щодо оцінювання ефективності зразків БеНК – мультикритеріальний метод оцінювання за групою показників з ваговими коефіцієнтами. За кількісний (числовий) показник оцінювання ефективності застосування БеНК визначено ключовий показник ефективності застосування, для чого аргументується введення додаткового корегуючого коефіцієнта надійності за один бойовий вихід, який буде враховувати вплив змін за бойових умов.

Наведено структурну схему розробленої методики оцінювання ефективності застосування бойових БпС (НРК) з описом етапів роботи з проведення оцінювання.

Розглянуто приклад для визначення КПЕЗ у різних сценаріях (видах бою), запропоновано змінювати значення вагових коефіцієнтів важливості для окремих групових критеріїв згідно з потребами бойових дій. Проведено розрахунок КПЕЗ для 5 зразків бойових турелей (Buria, ShaBlya, Wolly, Pernach, Tavria) для трьох альтернативних вагових наборів дій (тактичних ситуацій): Аналіз отриманих даних показав, що кращі вагові оцінки у бойових турелях Buria та Wolly (Сценарій 1 – $E_{tot}^1 = 5.21$, Сценарій 2 – $E_{tot}^2 = 5.18$, Сценарій 2 – $E_{tot}^3 = 5.39$).

Список літератури

1. Доктрина «Безпілотні системи» ОП 3.0 (46), затверджено 14.08.2025. Командування Сил безпілотних систем. 34 с. Інв. НАСВ № 2275д (Вх. № 5795д від 18.08.2025).
2. Олег Онопрієнко. Роботи на передовій беруть у полон, трофеяють зброю і рятують життя. Як працюють наземні роботизовані комплекси, які стали невіддільним технологічним елементом війни. 2 вересня 2025. URL: <https://dev.ua/news/UGV-na-peredovii>
3. Антон Печерський. Замінити піхоту: перспективи наземних дронів представили у Сухопутних військах. 11 Липня 2025. *АрміяInform*. URL: <https://armyinform.com.ua/2025/07/11/zaminyty-pihotu-perspektyvy-nazemnyh-droniv-predstavlyu-u-suhoputnyh-vijskah/>
4. THeMIS Dorsel Boyer II, TRADOC Military Analyst. Ukraine's Uncrewed Air and Ground Systems

Teaming Marks a Watershed Moment. June 18 2025. URL: <https://oe.tradoc.army.mil/product/ukraines-uncrewed-air-and-ground-systems-teaming-marks-a-watershed-moment/>

5. В.М. Руснак, С.В. Хоменко, О.О. Лисий Інноваційний підхід щодо науково-технічного супроводу експериментальних досліджень роботизованих комплексів. *Журнал Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (ДНДІ ВС ОВТ)*. 2024. № 2(58). С. 45–53. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/396/367> <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.10>

6. Україна активніше застосовує наземні дрони на полі бою, але є проблеми – WSJ. Інформатор. 2024. 17 вересня. URL: <https://informator.ua/uk/ukrajina-aktivnishe-zastosovuye-nazemni-droni-na-poli-boyu-ale-ye-problemi-wsj>

7. Довгополий А., Загірський А. Механіка та керованість безпілотних наземних роботизованих комплексів в умовах складного рельєфу. *Механіка та гідрравлічні системи*, 2023. КП. № 46. С. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678> URL: <https://mgsys.kpi.ua/article/view/302678>

8. 170 типів безпілотників у ЗСУ – досягнення і проблема. NV.ua. 2024. 10 липня. URL: <https://nv.ua/ukr/amp/170-tipiv-bezpilotnikov-u-zsu-ye-dosyagnennjam-i-problemoyu-novini-ukrajini-50456906.html>

9. Zoran Gacovski. Mobile Robots Current Trends. Rijeka: In Tech. 2011. 414 p.

10. Відомості щодо випробувань, проведених з 25.06-24.10.2024 року. *Наука і випробування у полум'ї війни*. 36. № 8. 2025. Черкаси: ДНДІ ОВТ. с. 99.

11. Звіт з вивчення досвіду застосування наземних роботизованих комплексів Силами оборони України. Сили безпілотних систем, 2025. 60 с.

12. Інформаційний бюлетень з вивчення та впровадження досвіду : СВП 7-00(11). *Управління вивчення та впровадження досвіду Командування Сухопутних військ ЗС України*. Липень 2025. с. 96.

13. The Russia-Ukraine Drone War: Innovation on the Frontlines and Beyond. May 28, 2025. URL: <https://www.csis.org/analysis/russia-ukraine-drone-war-innovation-frontlines-and-beyond>

14. Janusz Kacprzyk. Robot Intelligence Technology and Applications. Warsaw: Springer. 2014. 610 p.

15. Guslyakov O. M., Dovgopoliy A. S., Chepkov I. B. Critical technologies for the creation of ground robotic complexes of heavy and medium classes. Armament and military equipment. 2020. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1\(25\).24-34](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1(25).24-34)

16. A. Rankin, A. Huertas, L. Matthies, M. Bajracharya, Ch. Assad, Sh. Brennan, and P. Bellutta. Unmanned ground vehicle perception using thermal infrared cameras. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2011. № 8045. DOI:10.1117/12.884349

17. S. Minaeian, J. Liu and Son Y. Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.: Syst.* 2016. 46 (7), 1005–1016. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2015.2491878>

18. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. метод анализа иерархических структур [Т. L. Saati,

K.P. Kearns. Analitical Planning the Organization of Systems]. переклад з англ. М. Радіо и сввзь. 1994. 224 с.

19. Казан П.І., Корольова О.В. Визначення кращого мультикоптера для виконання завдань за рівнем технічної досконалості. *Proceeding of XV International Scientific and Practical Conference "INTERNATIONAL SCIENTIFIC INNOVATIONS IN HUMAN LIFE"*. September 1-3, 2022, Manchester, United Kingdom. С. 88-93.

20. Корольова О.В., Казан П.І., Мількович І.Б. Оцінювання рівня технічної досконалості крокуючих безпілотних наземних комплексів типу Robot Dog. *Військово-технічний збірник. НАСВ, Львів. № 31. С. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.27-38>*

21. Павлов А. А., Лишук Е. И. Принятие решений на основе метода анализа иерархий. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Системный анализ, управление и информационные технологии. Харьков : НТУ "ХПИ", 2007 № 41. С. 69-76.*

22. Methods of Evaluation and Modelling of Autonomous Ground Vehicles. IEEE Robotics and Automation Society. IEEE Access, 2024. Vol. 12. pp. 14560–14578.

References

1. (2025), "Doktryna «Bezpilotni systemy» OP 3.0 (46), zatverdzheno 14.08.2025" [Doctrine "Unmanned Systems" OP 3.0 (46), approved on 08/14/2025]. Command of the Unmanned Systems Forces. 34 p. [in Ukrainian]

2. Oleh Onoprienko (2025), "Roboty na peredovii berut u polon, trofeiat zbroiu i riatiut zhyttia. Yak pratsiuiut nazemni robotyzovani kompleksi, yaki staly neviddilnym tekhnolohichnym elementom viiny" [Robots on the front line are taking full advantage, honing weapons and saving lives. How ground-based robotic complexes work, which have become an integral technological element of war]. September 2, 2025. URL: <https://dev.ua/news/UGV-na-peredovii> [in Ukrainian]

3. Anton Pecherskyi (2025), "Zaminyty pikhotu: perspektyvy nazemnykh droniv predstavlyu u Sukhoputnykh viiskakh " [Replacing the infantry: the prospects of ground drones presented in the Land Forces]. July 11, 2025. *ArmyInform*. URL: <https://armyinform.com.ua/2025/07/11/zaminyty-pikhotu-perspektyvy-nazemnykh-droniv-predstavlyu-u-sukhoputnykh-viiskakh/> [in Ukrainian]

4. TheMIS Dorsel Boyer II, TRADOC Military Analyst. Ukraine's Uncrewed Air and Ground Systems Teaming Marks a Watershed Moment. June 18 2025. URL: <https://oe.tradoc.army.mil/product/ukraines-uncrewed-air-and-ground-systems-teaming-marks-a-watershed-moment/>

5. Rusnak V.M., Khomenko Ye.V. and Lysyi O.O. (2024), "Innovatsiyni pidkhid shchodo naukovotekhnichnoho suprovodu eksperymentalnykh doslidzen robotyzovanykh kompleksiv" [Innovative approach to scientific and technical support of experimental research of robotic complexes]. *Journal of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment (SRITCAME)*. 2024. No. 2(58). Pages 45–53. URL: <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/396/367> <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.10> [in Ukrainian]

6. (2024), "Ukraina aktyvnishe zastosovuye nazemni drony na poli boiu, ale ye problemy – WSJ" [Ukraine is more actively using ground drones on the battlefield, but there are

problems – WSJ]. *Informer*. 2024. September 17. URL: <https://informer.ua/uk/ukrajina-aktivnishe-zastosovuye-nazemni-droni-na-poli-boyu-ale-ye-problemi-wsj> [in Ukrainian]

7. Dovhopolyi A. and Zahirskyi A. (2023), "Mekhanika ta kerovanist bezpilotnykh nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv v umovakh skladnoho reliefu" [Mechanics and controllability of unmanned ground robotic complexes in difficult terrain]. *Mechanics and hydraulic systems*, 2023. KPI. No. 46. Pages. 5–21. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678> URL: <https://mgsys.kpi.ua/article/view/302678> [in Ukrainian]

8. (2024), "170 tipiv bezpilotnykiv u ZSU – dosiahnennia i problema" [170 types of drones in the Armed Forces of Ukraine – achievements and problems]. NV.ua. 2024. July 10. URL: <https://nv.ua/ukr/amp/170-tipiv-bezpilotnykiv-u-zsu-ye-dosyagnenniam-i-problemoyu-novini-ukrajini-50456906.html> [in Ukrainian]

9. Zoran Gacovski. Mobile Robots Current Trends. Rijeka: In Tech. 2011. 414 p.

10. (2025), "Vidomosti shchodo vyprobuvan provedenykh z 25.06-24.10.2024 roku" [Information on tests conducted from 25.06-24.10.2024]. *Science and tests in the flames of war*, Collection. No. 8. 2025. Cherkasy: State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification. 99 pages. [in Ukrainian]

11. (1994), "Zvit z vyvchennia dosvidu zastosuvannia nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv Sylamy oborony Ukrainy" [Report on the study of the experience of using ground robotic complexes by the Defense Forces of Ukraine]. Forces of Unmanned Systems, 2025. 60 pages. [in Ukrainian]

12. (2025), "Informatsiyni biuletyn z vyvchennia ta vprovadzhennia dosvidu : SVP 7-00(11)" [Information Bulletin on the Study and Implementation of Experience: MSP 7-00(11)]. Department of the Study and Implementation of Experience of the Land Forces Command of the Armed Forces of Ukraine. July 2025. 96 pages. [in Ukrainian]

13. The Russia-Ukraine Drone War: Innovation on the Frontlines and Beyond. May 28, 2025. URL: <https://www.csis.org/analysis/russia-ukraine-drone-war-innovation-frontlines-and-beyond>

14. Janusz Kacprzyk. Robot Intelligence Technology and Applications. Warsaw: Springer. 2014. 610 p.

15. Guslyakov O. M., Dovgopolyi A. S., Chepkov I. B. Critical technologies for the creation of ground robotic complexes of heavy and medium classes. Armament and military equipment. 2020. [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1\(25\).24-34](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2020.1(25).24-34)

16. A. Rankin, A. Huertas, L. Matthies, M. Bajracharya, Ch. Assad, Sh. Brennan, and P. Bellutta. Unmanned ground vehicle perception using thermal infrared cameras. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2011. № 8045. DOI:10.1117/12.884349

17. S. Minaeian, J. Liu and Son Y. Vision-based target detection and localization via a team of cooperative UAV and UGVs. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.: Syst.* 2016. 46(7), 1005–1016.

<https://doi.org/10.1109/TSMC.2015.2491878>

18. Saati T. and Kearns K. (1994), "Analytycheskoe planirovaniye. metod analiza yerarkhicheskikh struktur"

[Analytical planning. method of analyzing hierarchical structures]. Translation from English. M. Radio and television. 1994. 224 pages. [in Russian]

19. Kazan P.I. and Koroleva O.V. (2022), "Vyznachen-nya krashchoho mul'tykoopera dlya vykonannya zavdan' za rivnem tekhnichnoyi doskonalosti" [Determining the best multicopter for performing tasks by the level of technical perfection]. *Proceeding of XV International Scientific and Practical Conference "INTERNATIONAL SCIENTIFIC INNOVATIONS IN HUMAN LIFE"*. September 1-3, 2022, Manchester, United Kingdom. pp. 88-93. [in Ukrainian]

20. Koroleva O.V., Kazan P.I. and Milkovich I.B. (2024), "Otsinyuvannya rivnya tekhnichnoyi doskonalosti krokuyuchykh bezpilotnykh nazemnykh kompleksiv typu Robot Dog" [Asses-

sing the level of technical perfection of walking unmanned ground complexes of the Robot Dog type]. *Military-technical collection*. NAA, Lviv. No 31. pp. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.27-38> [in Ukrainian]

21. Pavlov A.A. and Lyshchuk E.Y. (2007), "Pryniatye reshenyi na osnove metoda analiza yerarkhyi" [Making decisions based on the method of hierarchical analysis] Bulletin of the National technical "KhPI" University: *Collection of Scientific works Thematic Issue: System analysis, management and information technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2007 No. 41. Pp. 69-76. [in Ukrainian]

22. *Methods of Evaluation and Modelling of Autonomous Ground Vehicles*. IEEE Robotics and Automation Society. IEEE Access, 2024. Vol. 12. pp. 14560–14578.

A VARIANT FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF UNMANNED GROUND VEHICLE UNIT APPLICATION

O. Korolova, P. Kazan, V. Khakhula, H. Lunkova, I. Milkovych

Unmanned systems, and specifically Unmanned Ground Vehicles, have become a crucial element in conducting combat operations during Ukraine's war for independence against the russian aggressor. A fairly wide range of tasks is assigned to them, based on their purpose: reconnaissance, strike (fire support), logistics, evacuation, and others.

The article provides an analysis of the most common multifunctional Unmanned Ground Vehicle models of various types, including those officially codified, currently in use by the Armed Forces of Ukraine. The potential and limitations of Unmanned Ground Vehicles are outlined based on an analysis of their tactical and technical characteristics and combat capabilities drawn from operational experience.

The key performance indicator for evaluating the effectiveness of a Unmanned Ground Vehicle unit's application is defined and substantiated. This indicator incorporates group metrics: functionality / combat capabilities, maneuverability, protection (survivability), and autonomy. The interpretation of the chosen components is also commented upon.

A developed methodology for evaluating the effectiveness of Unmanned Ground Vehicle unit application is presented. This methodology is based on a multi-criteria evaluation method using a group of indicators with weighting coefficients, and the main criterion is defined as a quantitative (numerical) performance indicator. The stages for evaluating the effectiveness of combat Unmanned Ground Vehicle application using the developed methodology are provided.

An evaluation of the effectiveness of a combat Unmanned Ground Vehicle in performing its assigned tasks is conducted, and an illustrative example is provided for clarity.

Keywords: *unmanned ground complex, monitoring, reconnaissance, detection, means of situational awareness, Evaluating the Effectiveness, Unit Application.*

УДК 355.45:623.746.2:623.739:623.4(477)(=161.2)

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.127-140>

О.О. Мальков¹, С.В. Похнатюк^{1*}, С.М. Кудимов¹, І.В. Шерихов²

¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

² Національний університет оборони України, Київ

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ВІЙСЬК АРМІЙСЬКОЮ АВІАЦІЄЮ ЗА ДОСВІДОМ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ТА МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

У статті проаналізовано сучасний стан виконання завдань з авіаційної підтримки військ армійською авіацією Сухопутних військ Збройних Сил України в умовах російсько-Української війни. Встановлено низку ключових проблемних питань, що унеможливають якісне виконання завдань з авіаційної підтримки військ, зроблено висновок, що класична тактика дій вертольотів із використанням некерованих авіаційних ракет зазнала значних змін, а застосування керованого авіаційного озброєння вертольотів є вкрай небезпечним в умовах насиченості тактичної зони засобами протиповітряної оборони та активного залучення безпілотних літальних апаратів для боротьби з вертольотами. Запропоновано шляхи розв'язання виявлених проблем авіаційної підтримки військ за рахунок інтеграції безпілотних авіаційних систем з вертольотами армійської авіації та розробки сценаріїв їх бойового застосування. Проаналізовано перспективні типи ударних безпілотних літальних апаратів, їхні технічні характеристики та можливості інтеграції з платформою Mi-8. Обґрунтовано необхідність зміни ролі вертольота з платформи безпосереднього ураження в командно-ударну платформу. Запропоновано модель інтеграції безпілотних літальних апаратів, обладнаних системою штучного інтелекту, подібною до Hivemind від компанії Shield AI з вертольотами армійської авіації як безпілотну авіаційну ройову систему для підвищення точності ураження й зниження ризику для екіпажів під час виконання завдань з авіаційної підтримки військ. Визначено напрями подальших досліджень, зокрема порівняння ефективності класичних способів авіаційної підтримки військ та із застосуванням безпілотної авіаційної ройової системи, розробці тактики групового застосування вертольотів і дронів, створення моделі командного центру на борту вертольота для керування "роєм" дронів та розробки систем контейнерного старту дронів із зовнішніх підвісок вертольотів.

Ключові слова: армійська авіація, вертоліт, авіаційна підтримка, безпілотні літальні апарати, дрони-камікадзе, рій дронів, авіаційне озброєння, групове застосування вертольотів і дронів, командно-ударна платформа, безпілотна авіаційна ройова система.

Постановка проблеми

Армійська авіація (АА) Сухопутних військ (СВ) Збройних Сил України (ЗС України) призначена для авіаційної підтримки (АП) військ (сил) шляхом ураження наземних (морських) переважно рухомих броньованих об'єктів противника на передньому краї і в тактичній глибині, а також для виконання завдань всебічного забезпечення загальновійськового бою. Однак практичний досвід [1] застосування АА у ході російсько-Української війни, особливо з 2022 року, свідчить про

значні зміни умов застосування авіаційної компоненти, що створює критичні проблеми та унеможливорює ефективне використання вертольотів за бойовим призначенням у класичному розумінні.

Нижче наведені основні з них.

Відсутність ефективного озброєння для боротьби з броньованими цілями. Некеровані авіаційні ракети (НАР), що залишаються основним засобом ураження, мають низьку точність і вимагають наближення екіпажу вертольота на небезпечну відстань до противника в ході виконання завдань з АП.

Article history: Income 24 September 2025; Revised 02 October 2025; Accepted 13 October 2025; Print 05 December 2025

Мальков О.О. ORCID ID: 0000-0002-4303-1726, Похнатюк С.В. ORCID ID: 0000-0003-0529-0353,
Кудимов С.М. ORCID ID: 0009-0004-9549-0758

* Corresponding author psvvp72@gmail.com

© Мальков О.О., Похнатюк С.В., Кудимов С.М., Шерихов І.В.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Неможливість безпечного застосування керованого авіаційного озброєння (КАОЗ). Комплекс КАОЗ “Штурм-В” на вертольотах Мі-24 передбачає візуальне супроводження цілі протягом усього польоту ракети, що потребує зависання або польоту на середній висоті – у зоні гарантованого ураження засобів протиповітряної оборони (ППО) об’єкта атаки.

Зміни на полі бою. Противник широко застосовує засоби ППО ближньої дії та дрони-камікадзе (FPV-дрони), що значно підвищує ризик втрат екіпажів та авіаційної техніки при традиційному застосуванні вертольотів.

Втрата тактичної ролі вертольотів. В умовах неможливості безпечного ураження цілей бойові дії вертолітних підрозділів зводяться до допоміжної логістичної функції або застосування в обмеженому обсязі для завдання ударів з дальньої дистанції без прицільного наведення.

Водночас вертоліт зберігає низку потенційних унікальних переваг – вантажопідйомність, маневреність, здатність до польоту на малих висотах та можливість автономної дії – що потребує переосмислення його ролі у виконанні завдань з авіаційної підтримки військ.

Ці зміни поставили під сумнів традиційні підходи до ведення бойових дій, зокрема АП, яка раніше ґрунтувалась на застосуванні пілотованих платформ, якот вертольоти АА. У зв’язку з цим постає необхідність переосмислення ролі вертольотів та пошуку нових способів їхнього застосування.

Отже, в умовах високого ризику при класичному бойовому застосуванні вертольотів необхідно знайти нову модель їх ефективної участі в АП. Зокрема, дослідити можливість інтеграції ударних безпілотних систем із вертолітними платформами для відновлення спроможності АА виконувати завдання за призначенням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика АП із застосуванням вертольотів у сучасній війні привертає увагу вітчизняних та іноземних науковців. Більшість сучасних досліджень зосереджені на технічних аспектах модернізації авіаційної техніки [2], удосконаленні загальних характеристиках вертолітних систем [3], а також описі тактики застосування [4, 5]. Натомість цілісного аналізу системної кризи у спроможностях армійської авіації Сухопутних військ Збройних Сил України щодо АП – майже немає.

Також дослідження описують зміни, що відбулися у військових конфліктах ХХІ століття, зокрема тенденція до автономізації бойових платформ [6] та масове використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [7]. Публікації закордонних та українських експертів відображають досвід застосування FPV-дронів, дронів-камікадзе та розвідувальних БпЛА у бойових умовах [8]. Зокрема, відзначено ефективність дронів у виявленні цілей, коригуванні артилерії [9] та завданні ударів по техніці й особовому складу противника [10].

У низці українських публікацій, зокрема в роботах Центру оборонних стратегій [11] та у спеціалізованих

виданнях [12, 13], наголошується на зміні характеру бойових дій, зумовленій комплексним застосуванням БпЛА, зокрема FPV-дронів, баражуючих боеприпасів і дронів-розвідників. Ці дослідження підкреслюють, що нові засоби повітряної розвідки і ураження не лише підвищують якість ведення бойових дій, а й істотно впливають на застосування класичних авіаційних платформ, таких як вертольоти.

У роботах RAND Corporation [14] та інших західних дослідженнях фіксується перехід до нових способів АП, де ключову роль відіграють автономні та напіваавтономні системи. Автори наголошують, що ефективність безпосередньої авіаційної підтримки пілотованими літальними апаратами стрімко знижується в умовах насиченої ППО, широкого застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), а також асиметричних засобів ураження, зокрема ударних БпЛА, FPV-дронів.

Експерименти компаній Shield AI [15] та ін. демонструють успішну апробацію концепції бойового застосування дронів з борту пілотованих літальних апаратів. Зокрема, йдеться про експерименти із запуском ударних БпЛА типу VBAT, ALTIUS та Hero-120 з літаків і вертольотів, що дозволяє реалізовувати удари без входження у зону дії ППО противника. Попри відсутність офіційного визнання подібної концепції в ЗС України ці підходи активно аналізуються в експертному середовищі як потенційно ефективні та адаптивні до українського бойового контексту. Крім того, експерименти компанії Shield AI [15] з використання навігаційної системи Hivemind у дронах VBAT показують, що автономні рої БпЛА, здатні діяти в умовах РЕБ, стають практичною реальністю. У спільних дослідженнях Королівської Норвезької академії повітряних сил (RNoAFA) та Королівського інституту об’єднаних збройних сил (RUSI) [16], а також у вітчизняних дослідників [17] підкреслюється, що традиційна роль вертольотів як вогневих платформ потребує радикальної трансформації. Приклади реальних бойових дій, зокрема випадки втрати російських вертольотів унаслідок дій FPV-дронів, підтверджують цю тезу.

Окрему увагу в сучасних публікаціях приділено перевагам ударних БпЛА над традиційними НАР. Зокрема, дослідження Social Development and Security [18] та Аналітичного центру Center for Naval Analyses (CNA) [19] порівнюють точність, вартість, безпеку для екіпажів і ефективність ураження цілей, надаючи перевагу дронам. Особливо наголошується, що рої FPV-дронів може виявити та уразити ціль навіть у складних умовах РЕБ, чого не можуть гарантувати навіть найдосконаліші варіанти стрільби НАР.

Водночас більшість публікацій мають описовий характер і не формують системного бачення проблеми. Зокрема, поза увагою залишаються такі аспекти, як:

організаційна невідповідність класичної системи авіаційної підтримки сучасним реаліям на полі бою і застарілі доктринальні положення щодо тактики дій армійської авіації;

обмеженість у застосуванні НАР та КАОЗ через умови бойового середовища;

перехід від технічної апробації окремих зразків інтеграції ударних БпЛА з пілотованими платформами до розвитку теоретичної концепції комплексного застосування командно-ударних платформ.

Таким чином, незважаючи на наявність досліджень та окремих аналітичних матеріалів, питання інтеграції вертольотів, як високомобільної платформи для обладнання пунктів управління роями БпЛА з одночасним використанням вертольотів як вантажної платформи для перебазування значної кількості ударних БпЛА з тилу до фронту та здійснення швидкого маневру вздовж фронту в умовах сучасної війни залишається практично не дослідженим. Це обумовлює актуальність запропонованого дослідження, яке покликане не лише зафіксувати наявні проблеми виконання завдань з авіаційної підтримки військ армійської авіацією, а й запропонувати шляхи їх розв'язання.

Мета досліджень

Стаття має на меті виявити ключові проблеми виконання завдань з авіаційної підтримки військ армійською авіацією ЗС України в умовах сучасної війни та визначити шляхи їх розв'язання, зокрема теоретично обґрунтувати можливість впровадження нових способів авіаційної підтримки військ за рахунок інтеграції безпілотних авіаційних систем з вертольотами армійської авіації та розробки сценаріїв їх бойового застосування.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення завдань дослідження необхідно на підставі аналізу бойового досвіду, змін у характері бойових дій та розвитку безпілотних технологій сформулювати проблемні питання АП, викликані загрозами, що існують для АА під час виконання бойових завдань, виявити обмеження, що діють на традиційні способи АП, зокрема застосування НАР, та переваги нових способів, таких як застосування ударних БпЛА, обґрунтувати використання вертольота як інтелектуальної командно-ударної платформи-носія ударних БпЛА, дослідити та порівняти сучасні ударні БпЛА через призму інтеграції з вертольотом-платформомою та виробити основні сценарії застосування такої інтеграції. Це дасть змогу створити модель АП роєм БпЛА з борту вертольота, реалізація якої дозволить виконувати завдання з розвідки, цілевказання і ураження наземних цілей із вищою точністю, мінімізуючи ризики для екіпажів вертольотів.

1. Проблемні питання АП, викликані загрозами, що існують для армійської авіації під час виконання бойових завдань з авіаційної підтримки військ в сучасних умовах.

Починаючи з 2014 року, збройні сили РФ поєднують традиційні та нетрадиційні методи ведення збройної боротьби проти України, гібридні загрози постійно

змінюють свою тактику, техніку та процедури, щоб отримати асиметричні можливості для послаблення технічної переваги АА при безпосередньому бойовому зіткненні. Сучасні та перспективні технології значно прискорили темпи вдосконалення існуючих, а також створення нових традиційних і нетрадиційних загроз для АА.

Сучасна війна в Україні демонструє безпрецедентний рівень насиченості тактичного простору засобами ураження, РЕБ та розвідувальними БпЛА, що призводить до суттєвого зменшення можливостей класичної АП із застосуванням АА. Проаналізувавши досвід бойових дій АА ЗС України [1], можна визначити низку ключових проблем, які обмежують ефективність дій вертольотів.

1.1. Висока цільність ППО ближньої дії.

Однією з головних особливостей застосування АА в російсько-Українській війні стала необхідність дій в умовах неподавленої та ешелонованої ППО противника.

У зоні бойових дій постійно розгорнуті засоби ППО противника, серед яких особливу небезпеку становлять переносні зенітно-ракетні комплекси (ПЗРК) радянського та російського виробництва, зокрема "Ігла", "Ігла-С", "Верба" та модернізовані версії переносних зенітно-ракетних комплексів (ПЗРК) "Стріла", а також зенітно-ракетні комплекси (ЗРК) ближньої дії на зразок "Тор-М2", "Панцир-С1". Ці комплекси мають здатність уражати повітряні цілі на дистанціях 3 – 10 км, що перекидає типові рубежі бойового застосування НАР. Як свідчать доповіді британського Royal United Services Institute (RUSI) [20], ризик ураження вертольотів у зоні переднього краю залишається критичним навіть для сучасних платформ. Це змусило розробити нові тактичні прийоми, зокрема:

нанесення вогневого ураження з режиму кабрирування з одночасним зменшенням загального кроку несучого гвинта для зменшення максимальної висоти маневру;

виконання польотів на гранично малих висотах (5-10 м) з виконанням тактичних прийомів подолання протидії засобів ППО противника;

виконання вогневих завдань з виділенням груп різного тактичного призначення;

здійснення польотів до цілі в режимі радіомовчання.

До появи БпЛА вертольоти виконували завдання вогневої підтримки з маневруванням на низькій висоті. Але сучасні засоби ППО ближньої дії, FPV-дрони та РЕБ-системи зробили це надзвичайно ризикованим [3]. Висока вартість і втрата екіпажів роблять застосування навіть ефективних машин типу Мі-24 або АН-64 Apache обмеженим. Успішні дії російських вертольотів з НАР у горизонтальному польоті з відстані 3–6 км – радше виняток, що базується на масовості, а не на ефективності.

Аналіз статистичних даних (рис. 1) показав, що найбільших втрат вертольоти АА зазнали під час виконання вогневих завдань вдень у простих метеорологічних умовах від ураження зенітними керованими ракетами типу “земля – повітря” на етапі польоту в район цілі та дій в районі цілі.

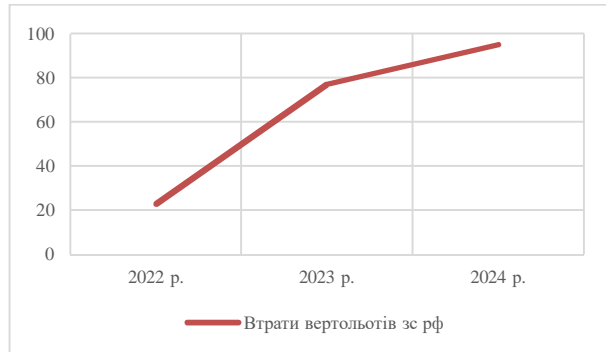


Рис. 1 Динаміка втрат вертольотів зс рф у зоні бойових дій 2022 – 2024 рр.

1.2. Висока активність FPV-дронів.

Масоване застосування БпЛА у російсько-Українській війні призвело до втрати противниками традиційної переваги у повітрі. БпЛА стали повсякденним інструментом розвідки, виявлення вогневих засобів і їх ураження. FPV-дрони активно використовуються як заміна артилерії у ближньому бою, забезпечуючи точність, миттєву реакцію і дешевизну [8]. Це спровокувало переосмислення використання авіації, яка тепер змушена діяти з більшими обмеженнями: під прикриттям, з мінімальним часом перебування в зоні ураження [1].

FPV-дрони, що масово застосовуються обома сторонами конфлікту, виявились ефективним інструментом ураження повітряних цілей, так, мали місце випадки ураження російських Мі-8 під час зависання та навіть у русі. Тактична мобільність FPV-дронів і низька вартість створюють асиметричну загрозу, особливо в районах очікування або в процесі бойового маневрування.

1.3. Суцільне радіоелектронне придушення.

Значне насичення простору засобами РЕБ російського виробництва, зокрема комплексами “Поле-21”, “Тірада-2С”, “Ртуть-БМ”, “Красуха-4” та “Бук-Автомат”, створює серйозні перешкоди для використання традиційних каналів зв’язку, навігації та управління. Це суттєво ускладнює як ефективне застосування бортової зброї, так і координацію дій екіпажів вертольотів з наземними підрозділами під час виконання бойових завдань.

1.4. Насичення поля бою розвідкою.

Високий ступінь ситуаційної обізнаності противника (через постійне застосування БпЛА типу Mavic, Autel, Orlan, Supercam) значно зменшує ефективність тактики “несподіваного удару”. Вертольоти майже завжди виявляються до моменту завдання удару, що

зменшує ймовірність успішного завершення місії та підвищує загрозу ураження.

1.5. Низька ефективність НАР у сучасних умовах.

Удар НАР з великої дистанції (3–6 км) потребує наведення з інших джерел (дронів-розвідників, передових авіаційних навідників) і має значне розсіювання. Як свідчать експертні дослідження, при стрільбі з горизонтального польоту кругове ймовірне відхилення (КЙВ) може сягати 100–150 м [21], що є неприйнятним для знищення малогабаритних рухомих цілей. Більш детально ця проблема буде досліджена під час вивчення обмежень, що діють на традиційні способи АП.

1.6. Логістичні обмеження.

Підготовка НАР до бойового застосування вимагає великої кількості ресурсів, спеціального обладнання, захищених арсеналів, ретельного обслуговування та періодичних перевірок. В умовах мобільної війни ці вимоги ускладнюють забезпечення безперервної боєготовності підрозділів армійської авіації.

1.7. Залежність від міжнародної матеріально-технічної допомоги.

Оскільки частина озброєння, пально-мастильних матеріалів та запчастин до вертольотів типу Мі-24/Мі-8 наразі постачаються з-за кордону, кожна втрата машини – стратегічно чутлива подія. Це зменшує готовність командирів ризикувати технікою під час АП в складних умовах.

1.8. Неможливість прихованого виходу на ціль.

На відміну від ударних FPV-дронів, що можуть атакувати з будь-якого ракурсу, вертоліт завжди потребує відкритого коридору для пуску НАР або КАОЗ, і не здатен реалізувати раптову атаку без попереднього виявлення себе в повітряному просторі.

Отже, структура бойових дій змінилась: домінують малі цілі, висока мобільність, постійна ротація підрозділів, сильна насиченість засобами ППО, РЕБ, БпЛА противника. Вертольоти, що раніше діяли безпосередньо над полем бою, зараз змушені або діяти на межі досяжності, або бути перетвореними на платформу для пуску НАР непрямою наводкою.

Сукупність вказаних загроз свідчить про неможливість забезпечення АП військ традиційними силами та засобами АА у повному обсязі. Вертольоти не здатні ефективно діяти у зоні ППО противника, особливо проти малорозмірних, рухомих броньованих цілей на передньому краї та тактичній глибині. Ці фактори вимагають кардинального перегляду способів АП та адаптації нових підходів.

2. Обмеження, що діють на традиційні способи АП.

2.1. Обмеження бойового застосування КАОЗ.

На озброєнні АА ЗС України залишаються лише радянські ПТРК “Штурм-В”, які вимагають візуального супроводу цілі, обмежені кутом атаки, і не дозволяють працювати із закритих позицій або в

умовах РЕБ. Їх застосування пов'язане з тривалим перебуванням екіпажу у зоні ураження, що є неприйнятним в сучасному бою.

2.2 Обмеження бойового застосування НАР.

Одним із традиційних засобів ураження АА є НАР, що широко використовуються в озброєнні вертольотів типу Мі-8, Мі-24. У мирний час та в умовах локальних конфліктів НАР демонстрували достатню ефективність ураження цілей, особливо при застосуванні з малих висот у режимі ближнього маневреного бою. Проте в умовах сучасної високоінтенсивної війни – такої, як російсько-Українська, ефективність НАР значно знижується через низку критичних обмежень.

По-перше, для застосування НАР вертоліт змушений наблизитися до переднього краю оборони противника на відстань 2–4 км, що робить його надзвичайно вразливим до засобів ППО ближньої дії.

По-друге, застосування НАР із горизонтального польоту або з кабрирування (маневру з підняттям носа вертольота для збільшення дальності стрільби) передбачає зростання висоти польоту вертольота, що ще більше підвищує ризики ураження засобами ППО об'єкта атаки. Досвід бойового застосування [1] свідчить, що під час завдання авіаційних ударів з кабрирування з дальності 3–6 км екіпаж вертольота перебуває в зоні дії засобів ППО противника впродовж 20–30 секунд – критичний інтервал часу, під час якого ракета має високу ймовірність ураження цілі.

Крім того, точність ураження цілей НАР залишається низькою порівняно з високоточними засобами. Середнє кругове ймовірне відхилення при стрільбі з горизонтального польоту на дальність 2 км становить 100–150 метрів [21], що є прийнятним лише для площинних цілей, але неприйнятним для ураження точкових або мобільних об'єктів.

Таким чином, у комплексі всі перелічені фактори – вразливість при наблизненні до цілі, низька точність, залежність від метеумов і РЕБ, складність обслуговування – роблять традиційне застосування НАР недостатньо ефективним та надмірно ризикованим у сучасних умовах. Це формує об'єктивну потребу у пошуку альтернатив – таких, як інтеграція ударних БпЛА з вертольотами як командно-ударними платформами-носіями, що дозволяє перенести точку запуску на безпечну відстань і зменшити ризики для екіпажу.

3. Переваги ударних БпЛА над некерованими авіаційними ракетами в сучасних умовах війни.

На сучасному театрі воєнних дій, насиченому засобами ППО, РЕБ та високою динамікою змін на лінії фронту, ударні БпЛА демонструють низку критичних переваг над традиційними засобами авіаційного озброєння – зокрема, над НАР.

3.1. Точність ураження.

Однією з ключових переваг ударних БпЛА є їхня здатність до високоточного ураження цілей. У той час

як НАР мають КЙВ до 100–150 метрів на відстані 2 км [21], FPV-дрони з ручним керуванням здатні уражати цілі з КЙВ 3–5 метрів, а у разі використання систем автономного наведення – навіть до 1 метра [22]. Це дозволяє ефективно уражати не тільки групові або площинні цілі, але й окремі одиниці бронетехніки чи фортифікаційні споруди.

3.2. Зниження ризиків для екіпажу.

БпЛА є безпілотними системами, що дозволяє знизити або повністю уникнути бойових втрат серед льотного складу. НАР, навпаки, вимагають від вертольотів підльоту на 2–4 км до лінії бойового зіткнення, що в умовах присутності ЗРК, ПЗРК і FPV-дронів ворога створює критичну загрозу для екіпажу [1, 8, 20].

При цьому FPV-дрони працюють у межах прямої радіовидимості між антеною оператора та дроном. Дальність такого зв'язку обмежується кривизною Землі [23].

Одним із найбільш перспективних способів вирішення проблеми обмеженої дальності FPV-дронів є розміщення оператора дрона на борту вертольота, що дозволить забезпечити мобільність оператора (вертикальне переміщення дозволяє оператору працювати без прив'язки до фіксованих пунктів управління) та зменшити вплив рельєфу (на великій висоті усувається більшість перешкод, які блокують сигнал (дерева, будівлі, пагорби).

На підставі розрахунку дальності прямої радіовидимості та дальності передачі відеопотоку з FPV-дрона на приймач відеосигналу, що знаходиться у оператора [23], виведено залежність радіовидимості від висоти антени (рис. 2). Значення лінії червоного кольору показують, на яку висоту потрібно підняти антену, щоб забезпечити радіозв'язок з БпЛА, а значення лінії синього кольору вказують відстань від антени до БпЛА. Як видно з графіку, на віддаленні до 20 кілометрів від лінії бойового зіткнення (ЛБЗ) вистачає висоти антени до 15 метрів, після чого необхідно підіймати антену для збільшення відстані радіозв'язку.

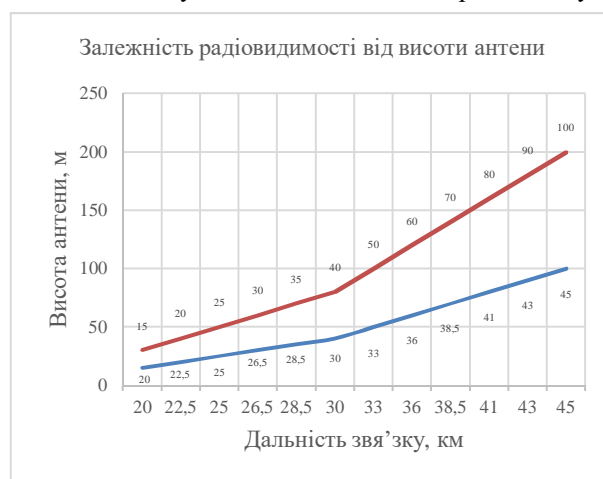


Рис. 2. Залежність радіовидимості від висоти антени

Для екіпажу вертольота висота польоту 20 метрів на віддаленні 20 кілометрів від ЛБЗ не несе загрози від засобів ППО противника. Для застосування БпЛА більшої дальності необхідно використовувати вертоліт в нічних умовах, де він може піднятися на висоту 150 метрів на відстані 40 км від ЛБЗ.

Таким чином, ударні БпЛА, що запускаються з вертольота, можуть уражати цілі на глибині до 25 км за ЛБЗ без входження платформи-носія у зону дії ППО тактичного рівня.

3.3. Гнучкість сценаріїв застосування.

Сьогодні коло задач, що вирішуються за допомогою БпЛА, постійно розширюється. В основному – при самостійній бойовій роботі з можливим застосуванням їх як в автоматизованих системах управління військами, так і в автономному порядку у якості засобів розвідки, ведення радіоелектронної боротьби або для завдання ударів, а також засобів цілевказання для систем високоточної зброї, ретрансляції в системах зв'язку [23].

БпЛА дають змогу реалізовувати широкий спектр бойових сценаріїв: від точкових ударів по бронетехніці на передньому краї до операцій у тактичній глибині, наприклад, ураження засобів управління, логістичних об'єктів чи ППО [13]. Ударний дрон може знаходитися в режимі очікування (баражування) до моменту виявлення цілі, що у випадку з НАР неможливо. Більше того, БпЛА здатні виконувати завдання у міській забудові, ущелинах, за складного рельєфу – де вертольотам важко маневрувати або наводити НАР.

3.4. Економічність.

Вартість однієї НАР коливається в межах 4000–5000 доларів США [24], при цьому для ефективного ураження цілі потрібно залпом запускати не менше 5–10 ракет. Вартість одного FPV-дрона становить 300–3000 доларів США залежно від типу й оснащення [25]. За аналітичними оцінками, ураження однієї одиниці бронетехніки FPV-дроном обходиться в 3–5 разів дешевше, ніж із використанням НАР [26]. Враховуючи фінансові обмеження держави у воєнний час, фактор економічної доцільності набуває особливої актуальності.

3.5. Проста логістика та мобільність.

На відміну від НАР, які потребують прихованого зберігання, транспортування, спеціальних інструментів під час їх заряджання в блоки та кваліфікованого обслуговування, ударні дрони компактні, можуть перевозитися у стандартних контейнерах і готуються до запуску в польових умовах. Їх підготовка та заряджання потребують значно менше ресурсів і часу, що робить їх ідеальними для мобільних груп операторів БпЛА і швидкого реагування на різних операційних напрямках бойових дій.

3.6. Менша залежність від погодних умов.

Ударні БпЛА можуть діяти в умовах хмарності, слабкої освітленості та змін напрямку вітру завдяки

використанню оптичних, інфрачервоних або мульти-спектральних систем наведення та корегування траєкторії польоту. Для НАР, прицілювання яких базується на візуальному контакті з ціллю через приціли екіпажу, а траєкторія не корегується під час польоту, погодні умови критично впливають на точність удару.

3.7. Адаптивність до умов РЕБ.

Середній відсоток втрат дронів через засоби РЕБ становить 30-35%. Українські військові вдосконалюють методи обходу РЕБ, зокрема використовують шифрування сигналу та спеціалізовані канали зв'язку. Слід також зазначити, що використання FPV-дронів з машинним зором нівелює ефективність купольних систем РЕБ, бо FPV йде на ціль автономно.

Машинне навчання для БпЛА активно розвивається, адже алгоритми можуть допомогти БпЛА в автономній навігації, виявленні об'єктів, ухилянні від перешкод.

Сучасні БпЛА, особливо з автономними навігаційними системами (наприклад, Hivemind у VBAT) [27], здатні функціонувати без GPS та стійкі до перешкод у каналах зв'язку. Це забезпечує їх перевагу в умовах дії потужних засобів РЕБ, які обмежують можливості екіпажу по точному виходу на точку пуску НАР.

3.8. Можливість ройового застосування.

Розгортання груп дронів у складі “рою” дає змогу забезпечити масовану атаку з одночасним виявленням і ураженням багатьох цілей. При цьому втрата окремих одиниць не впливає критично на загальний результат операції [7]. Такі можливості принципово недоступні для НАР, які застосовуються у вигляді одноразового залпу по одній ділянці місцевості.

З огляду на ці фактори, стає очевидним, що ударні БпЛА мають не лише тактичну доцільність, а й стратегічну перевагу в умовах війни XXI століття. Вони дозволяють суттєво змінити характер авіаційної підтримки військ, знизити бойові втрати та підвищити ефективність ураження пріоритетних цілей. Саме тому питання інтеграції БпЛА до структури АА стає пріоритетним напрямом розвитку.

4. Обґрунтування використання вертольота типу Мі-8 як командно-ударної платформи-носія БпЛА.

У контексті сучасної війни платформи для АП мають відповідати ряду вимог: мобільність, здатність тривалого перебування в повітрі, вантажопідйомність, наявність місця для розміщення операторів та обладнання, можливість забезпечення зв'язку в умовах РЕБ, а також адаптація під нові способи ведення бою.

Вертоліт загалом має низку унікальних переваг, як носій БпЛА, а саме:

оперативність застосування на широкому фронті бойових дій (можливість перекидання протягом декількох годин значної кількості БпЛА з розрахунками з одного операційного напрямку на інший);

тривалість польоту (2–4 години);

велика вантажопідйомність (до кількох десятків дронів);

можливість зависання або польоту на малих швидкостях;

потенціал для автономного керування роями з бортової системи;

захищеність від РЕБ завдяки потужним ретрансляторам і обчислювальним потужностям на борту. Це робить вертоліт ідеальним вузлом – материнською платформою для запуску, супроводу й управління тактичними БпЛА.

З усього парку авіаційної техніки вертоліт Мі-8, попри свій вік, залишається однією з найкращих платформ у Збройних Силах України для реалізації концепції повітряного носія ударних БпЛА.

4.1. Універсальність конструкції та внутрішній об'єм.

Мі-8 є багатоцільовим вертольотом, що має великий внутрішній об'єм (до 27 м³ у вантажній кабіні) та здатен перевозити до 4 т вантажу або 24 пасажери [28]. Такий простір дозволяє:

розміщувати командні пункти управління БпЛА;

перевозити кілька десятків FPV-дронів;

розгортати ретрансляційне обладнання та автономні системи зв'язку;

встановлювати спеціалізовані пускові контейнери на борту або підвісках.

Це надає Мі-8 значну перевагу перед меншими бойовими вертольотами, які мають обмежений простір і не пристосовані до гнучкої модифікації для нових задач.

4.2. Висока вантажопідйомність та адаптивність до модифікацій.

Вантажопідйомність Мі-8 сягає до 4 т на зовнішній підвісці або до 2,5 т у кабіні [28]. Це дозволяє адаптувати платформу для використання:

до 40 ударних дронів із боезарядом 0,5 кг;

або до 10 більших апаратів (до 3,5 кг корисного навантаження кожен);

або змішаного бойового комплексу (наприклад, 20 дронів-камікадзе та 10 розвідувальних).

Додатково можливе встановлення платформ-ретрансляторів, систем РЕБ чи аналітичних станцій для обробки відео з БпЛА.

Але, проблематика використання вертольота типу Мі-8 як командно-ударної платформи-носія БпЛА не обмежується лише її вантажопідйомністю, лінійними розмірами вантажної кабіни та вузлів підвішування, а й потребує вивчення з точки зору аеродинаміки.

На підставі розрахунку виведено залежність лобового опору БпЛА різних форм, що можуть бути підвішені на вузли зовнішньої підвіски вертольота (запускаються з вантажної кабіни) і обдуваються повітряним потоком несучого гвинта від швидкості горизонтального польоту вертольота (рис. 3).

Отже, з діаграми видно, що найбільший опір досягається на швидкостях польоту близьких до нуля і у міру переходу вертольота з режиму “осьової обдувки” на режим “косої обдувки” повітрям, опір зменшується, а на швидкостях 70 км/год практично зникає.

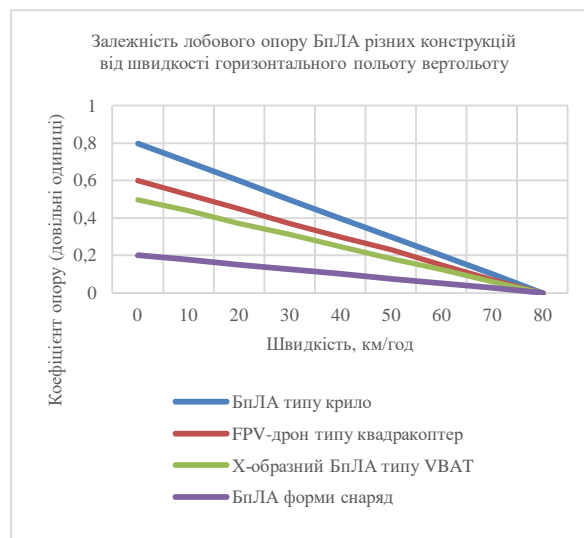


Рис. 3. Залежність лобового опору БпЛА різних конструкцій від швидкості горизонтального польоту вертольота

Важливо зауважити, що з чотирьох форм БпЛА, які розглядалися (БпЛА типу крило, FPV типу квадрокоптер, Х-подібний БпЛА типу VBAT, БпЛА форми снаряд), БпЛА форми снаряд (типу Warmate / Switchblade 300) є найбільш аеродинамічно обтічним. Тому варто розглядати в якості основних для інтеграції саме такі БпЛА, а при використанні БпЛА форми крило – варто виконувати зліт вертольота по літаковому, з розгоном по земній поверхні. В іншому випадку необхідно встановлювати захисні щитки або обирати БпЛА більш міцної конструкції. Але це поки що тільки теоретичні здогадки, які необхідно перевірити спочатку в аеродинамічній трубі, а потім і на випробуваннях.

При цьому експерименти, що проводяться в арміях передових країн світу, а також противником по запуску БпЛА з борту вертольота (від легких FPV-дронів для боротьби з морськими дронами до достатньо важких ударних БпЛА типу VBAT, ALTIUS та Hero-120) [15, 27], свідчать, що конструкція вертольота дозволяє адаптувати як вантажну кабіну вертольота для запуску роїв легких FPV-дронів, так і вузли зовнішньої підвіски для запуску важких БпЛА з розмахом крил до 3-х метрів.

4.3. Можливість малошвидкісного польоту і зависання.

Мі-8 здатен здійснювати політ на низькій швидкості (до 60 км/год) та тривале висіння [28], що критично важливо для:

розгортання дронів з борту у повітрі;

забезпечення стійкого радіозв'язку з БпЛА у складних умовах рельєфу;

мінімізації впливу рельєфу та перешкод на наведення дронів.

У багатьох випадках застосування БпЛА потребує ретрансляції сигналу або координації групи апаратів [29], яку ефективно можна забезпечити саме з борту вертольота під час висіння поза зоною прямої видимості противника.

4.4. Сумісність із засобами РЕБ та захистом від ураження.

На відміну від легких безпілотників, Мі-8 може бути оснащений:

станціями оптико-електронної протидії (СОЕП);
системами відстрілу теплових пасток;
комплексами попередження про радіолокаційне опромінення;
ретрансляторами та направленими антенами із потужним захистом від РЕБ.

Завдяки цьому вертоліт виступає не лише як носій, а й як захищена база для управління дронами в умовах подавлення зв'язку та GPS-навігації.

4.5. Оперативність перекидання та гнучкість розгортання.

Мі-8 здатен перекидати бойовий розрахунок операторів, обладнання та боєкомплект дронів на інші напрямки фронту протягом 2–8 годин. Це робить його ідеальним засобом для:

швидкого реагування на загрози;
розгортання тимчасових пунктів управління БпЛА поблизу лінії бойового зіткнення;
доставки дронів і команд їх операторів у важкодоступні ділянки місцевості.

Також можливе десантування або посадка на обладнані та необладнані майданчики з подальшим розгортанням пускової позиції на землі.

4.6. Досвід експлуатації та ресурсна база.

В Україні наявні десятки одиниць Мі-8, а також навчена інженерна та льотна база. Платформа добре відома екіпажам, укомплектована запасними частинами та має широкий досвід застосування у війні, що

дозволяє швидко розпочати експериментальні програми без очікування постачання іноземних зразків.

4.7. Аналіз світових практик.

Подібні концепції реалізуються в арміях США, Ізраїлю, Великої Британії. Наприклад, у 2023 році компанія Shield AI спільно з ВПС США тестувала можливість запуску рою БпЛА VBAT з борту транспортного вертольота Black Hawk у форматі мобільного пункту управління і ретрансляції [27]. Також ізраїльські ударні безпілотні апарати типу Heron-400EC інтегруються з вертольотами класу CH-53 [30]. Таким чином, концепція “вертоліт-матка” знаходить практичне втілення у передових арміях світу.

З огляду на перелічене, Мі-8 об'єктивно виступає найбільш придатною платформою ЗС України для інтеграції ударних БпЛА, принаймні на етапі теоретичного обґрунтування та початкових експериментів. Його можливості дозволяють реалізувати одночасно сценарії доставки, управління, автономного запуску та ретрансляції без потреби у закупівлі нових платформ або складного переоснащення парку АА. З урахуванням можливостей Мі-8 щодо корисного навантаження, радіозв'язку та просторової гнучкості, ця платформа є універсальною для багаторівневої БпЛА-інтеграції.

5. Порівняння сучасних ударних БпЛА через призму інтеграції з вертольотом типу Мі-8.

Інтеграція ударних БпЛА до системи АП з борту вертольотів вимагає ретельного вибору моделей безпілотників за низкою ключових критеріїв. Серед них – не лише маса й габарити, які визначають можливість транспортування у вантажному відсіку чи на підвісці вертольота, а й тактичні показники: дальність, тривалість польоту, тип навігації, стійкість до РЕБ, спосіб запуску та бойове навантаження.

Спираючись на ці показники проаналізовано та зведено у таблицю 1 переваги і обмеження різних класів ударних БпЛА, що потенційно можуть бути інтегровані з вертольотом типу Мі-8 та його модифікаціями.

Таблиця 1

Характеристики ударних дронів та можливості щодо їх інтеграції з вертольотом Мі-8

Параметр	FPV-дрони (типу Alpha, UJ-22 або саморобні бойові конструкції)	VBAT (Shield AI)	Warmate (Польща) / Switchblade 300 (США)
Злітна маса, кг	0.7–1.2	до 38	5.5–6.5
Габарити, м	0.3×0.3×0.15	2.4×0.3×0.3	1.1×0.2×0.2
Об'єм, м³	~0.02	~0.25	~0.05
Дальність, км	до 10	до 150	до 20
Тривалість польоту	15–30 хв	до 8 год	до 1 год
Тип навігації	ручна/ напівавтономна	автономна (без GPS)	напівавтономна
Стійкість до РЕБ	низька	висока	середня
Спосіб запуску	ручний, скид з контейнера	вертикальний зліт і посадка (VTOL) або з ПУ	катапульта або трубчаста ПУ
Бойове навантаження, кг	0.3–0.5	до 3.6	1.2
Вартість, \$	500–1500	50,000–100,000	6,000–10,000
Інтеграція з Мі-8:			
У вантажній кабіні, шт.	максимально до 150 (в середньому – до 100 з урахуванням розміщення операторів та обладнання)	до 8 (разом з ретрансляторами, наземними станціями або бортовими терміналами)	до 60

Продовження табл. 1

Параметр	FPV-дрони (типу Alpha, UJ-22 або саморобні бойові конструкції)	VBAT (Shield AI)	Warmate (Польща) / Switchblade 300 (США)
На зовнішній підвісці, шт.	4–6 контейнерів по 10–12 дронів у кожному	до 4 контейнерів (по 1 дрону у кожному)	до 8 контейнерів по 2–3 БпЛА у кожному
Основні переваги	низька ціна, масовість, адаптованість до ближнього бою; висока точність ураження малорухомих і рухомих цілей; мінімальні вимоги до бортових систем керування	автономна навігація без GPS, стійка до РЕБ; можливість розвідки на глибину 100+ км; сумісність із концепцією “розумного рою” з колективним цілевказанням	дальність більша, ніж у FPV-дронів; висока точність удару (КІВ < 2 м); можливість запуску із закритих позицій
Основні обмеження	низька стійкість до РЕБ; малий радіус дії; обмежене бойове навантаження (~0.5 кг)	висока вартість; невелика кількість, що може бути одночасно інтегрована; складна система логістики та підготовки операторів	обмежений бойовий заряд (~1.2 кг); висока ціна за одиницю; наявність одноразової конструкції

В результаті аналізу встановлено, що залежно від місії (розвідка, точкове ураження, авіаційний удар), Мі-8 може бути адаптований під відповідний тип БпЛА. Так, FPV-дрони забезпечують масовість ударів у ближній зоні, VBAT – автономну глибоку підтримку та цілевказання, а Switchblade – точкові ураження на середніх відстанях.

6. Можливі сценарії застосування командно-ударної платформи для автономних роїв БпЛА.

Попередні розділи дослідження підтвердили гіпотезу, що вертольоти типу Мі-8 та їх модифікації, які перебуває на озброєнні АА ЗС України, можуть бути адаптовані під командно-ударну платформу-носії ударних БпЛА, здатну діяти в умовах домінування рухомих малорозмірних цілей, високої мобільності, постійної ротації підрозділів, сильної насиченості засобами ППО, РЕБ, БпЛА противника та забезпечувати комплексну АП за певних сценаріїв її бойового застосування. Далі представлено декілька сценаріїв бойового застосування інтегрованих платформ, що охоплюють: основний, альтернативний, розвідувальний, транспортно-вогневий та застосування в ролі пункту управління роєм й ретранслятора.

6.1. Основний сценарій: застосування автономного рою БпЛА, стійкого до РЕБ, з борту вертольота (наприклад, дронів типу VBAT з Hivemind) для завдання ударів по бронетехніці та позиціях ППО. Важливо, що рій може діяти автономно, без радіозв'язку з оператором, обходячи системи РЕБ [21].

6.2. Альтернативний сценарій: запуск FPV-дронів з машинним зором або дронів типу Warmate / Switchblade з борту вертольота з віддалення 20 кілометрів і більше від ЛБЗ для завдання точкових ударів по цілях в тактичній глибині 5–25 км (аналог розосередженого бою) без входу командно-ударної платформи-носія у зону дії ППО тактичного рівня.

6.3. Розвідувальний сценарій: застосування вертольота, як ретранслятора для розвідувальних БпЛА шляхом забезпечення зв'язком у складних умовах, зокрема в горах чи міській забудові.

6.4. Транспортно-вогневий сценарій: супровід транспортних вертольотів роєм дронів, які виконують вогневе прикриття маршруту (в цьому випадку дрони виконують завдання елементів бойового порядку вертолітних підрозділів, чим значно знижують навантаження на ці підрозділи).

6.5. Ретранслятор командування: вертоліт з потужною обчислювальною системою координує дії груп дронів у різних районах одночасно.

7. Модель інтеграції тактичного рою БпЛА з вертольотом як командно-ударною платформою.

На підставі отриманих в ході цього дослідження даних пропонується наступна модель інтеграції.

Модель “БАРС” (Безпілотна Авіаційна Ройова Система) (див. рис. 4).

Носій: вертоліт Мі-8 або легкий багатоцільовий вертоліт (типу H145M та ін.).

Навігаційний блок керування роєм з автономним ядром (подібним до Hivemind) що здатний функціонувати без GPS та стійкий до перешкод у каналах зв'язку.

4 стартових контейнери для дронів (40–50 од. FPV з машинним зором або 4 од. дронів типу VBAT, або 16–24 дронів типу Warmate / Switchblade 300).

Ретранслятор РЕБ-захисеного каналу зв'язку.

Система цілевказання (інтегрована з даними від БпЛА).

Вертоліт виступає як командний центр і платформа запуску БпЛА.

Розгортаються тактичні дрони різного призначення (розвідка, удар, радіоелектронна боротьба).

Передача даних здійснюється між БпЛА, вертольотом та командними пунктами.

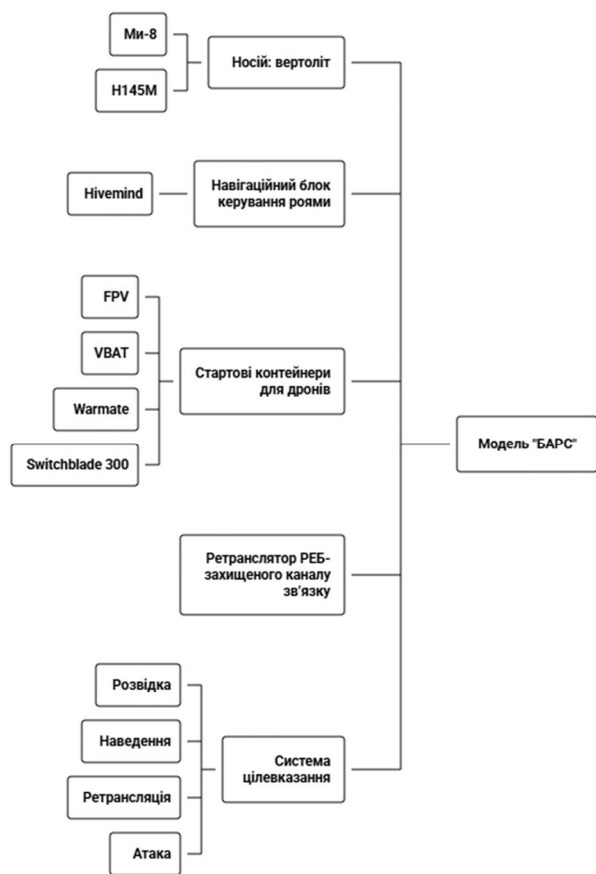


Рис. 4. Модель "БАРС" (Безпілотна Авіаційна Ройова Система)

Реалізовано функції: розвідка, наведення, ретрансляція, атака.

У межах запропонованої моделі "БАРС" ключову роль можуть відіграти безпілотні апарати типу VBAT (або подібні), оснащені стійкою до впливу засобів РЕБ системою автономного управління Hivemind на базі штучного інтелекту. Вибір саме цієї платформи продиктований низкою технологічних, тактичних та операційних переваг.

1. Вертикальний зліт та посадка (VTOL): VBAT не потребує спеціально обладнаних злітних смуг, що критично важливо для розгортання з бортів вертольотів або у польових умовах. Це дозволяє як оперативно їх доставляти на різні операційні напрямки у вантажній кабіні, так і інтегрувати їх у командно-ударну платформу-носіїв для запуску з повітря, наприклад, із контейнерів або вузлів зовнішньої підвіски.

2. Тривалість польоту до 8+ годин: VBAT забезпечує тривалу присутність у повітрі, дозволяючи здійснювати розвідку в режимі реального часу на значній глибині [15] та підтримувати операції в динамічному середовищі. У жовтні 2024 року повідомлялося, що українські сили використовували V-BAT для виявлення російських зенітно-ракетних комплексів "Бук" (SA-11) в умовах активного РЕБ. Завдяки тривалому перебуванню

в повітрі та стійкості до засобів РЕБ, V-BAT зміг передати точні координати цілей для ударів системою HIMARS [31]. Цей випадок демонструє ефективність V-BAT у складних бойових умовах.

3. Автономна навігація без GPS: Завдяки системі Hivemind, що забезпечує автономну побудову карти місцевості [21], дрон здатен орієнтуватися у складних умовах РЕБ, що є вирішальним фактором в умовах сучасної війни. При втраті сигналу GPS чи впливу засобів РЕБ, система Hivemind дозволяє зберегти стабільність місії, на відміну від більшості комерційних БПЛА [21].

4. Ройове застосування: Hivemind дозволяє VBAT працювати у складі розподіленого рою, що координується без централізованого управління. Такий підхід забезпечує живучість рою при втраті окремих елементів та підвищує ефективність виявлення й ураження цілей. У тестових сценаріях Shield AI, рій VBAT з Hivemind виконував пошук і розпізнавання рухомих цілей у зоні 50 кв. км за 12 хвилин без жодного втручання оператора [21].

5. Швидка інтеграція зі штатними системами вертольота: за рахунок відкритої архітектури управління та підтримки протоколів API, VBAT може бути інтегрований з бортовими інформаційними системами вертольотів для передачі цілевказання, зображень або телеметрії [21].

6. У запропонованій моделі БАРС VBAT з Hivemind відіграє роль "розумного розвідника" і "цілевказувача", що діє синхронно з вертольотом, забезпечуючи:

дистанційне сканування місцевості на маршруті польоту;

розпізнавання та класифікацію цілей без потреби ручного аналізу;

надання координат для ударів вертольотів із закритих позицій (з кабрирування або високоточною далекобійною зброєю за принципом "пустив-забув").

Ці особливості роблять дрони типу VBAT із Hivemind оптимальним вибором для реалізації концепції АП нового покоління – мобільної, точкової, безпечної для екіпажу та стійкої до перешкод.

Висновки

У ході проведеного дослідження встановлено, що сучасні умови ведення бойових дій у межах російсько-Української війни докорінно змінили уявлення про роль АА у системі АП. Ключовою проблемою стала неспроможність АА якісно виконувати основне завдання за призначенням – авіаційну підтримку військ шляхом ураження наземних (морських) переважно рухомих броньованих об'єктів противника на передньому краї та в тактичній глибині. Це пов'язано як із фізичними загрозами з боку ППО противника, так і з обмеженнями існуючого озброєння та способів застосування вертольотів.

Традиційні підходи до використання вертольотів як вогневих платформ вичерпали свій потенціал через уразливість, вартість та ризики.

Перспективним напрямом розв'язання виявлених проблем виконання завдань з авіаційної підтримки військ армійською авіацією ЗС України в умовах сучасної війни є перетворення вертольота в командно-ударну платформу для автономних роїв БпЛА, здатних діяти в умовах РЕБ та забезпечувати комплексну АП за певних сценаріїв її бойового застосування.

Модель вертольота Мі-8 показала високу потенційну ефективність, як командно-ударна платформа-носій дронів, завдяки значному корисному навантаженню, великому внутрішньому об'єму, добрій керованості, можливості зависання, а також наявності ресурсів для розміщення командно-управляючого обладнання на борту.

Запропонована модель "БАРС" дозволяє знизити ризики для екіпажів АА, забезпечує багаторівневу авіаційну підтримку військ, підвищує точність ударів, реалізує концепцію мереже-центричної війни і може бути основою для розробки нових способів АП.

Розроблені сценарії бойового застосування таких інтегрованих платформ створюють підґрунтя для пошуку та впровадження нових способів авіаційної підтримки військ армійською авіацією ЗС України, релевантні для інших армій світу.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на:

розробці та моделюванні нових тактичних сценаріїв та способів АП із використанням моделей типу БАРС, зокрема в умовах сильної ППО, РЕБ і урбанізованої місцевості;

проведенні розрахунків ефективності нових способів АП з використанням БАРС та порівняння її з класичними способами АП;

обґрунтуванні моделі командно-управляючого центру на борту вертольота для керування роєм БпЛА;

технічній розробці систем контейнерного старту дронів із зовнішніх підвісок вертольотів, в тому числі дронів, побудованих за технологією VTOL;

проведенні практичних випробувань в аеродинамічній трубі та на полігонах і створенні умов для апробації теоретичних рішень.

Запропоновані підходи формують основу для пошуку нових способів АП, в якій вертоліт перетворюється з уразливої вогневої одиниці на безпечну, автономну і високоадаптивну командно-ударну платформу. Це дозволяє інтегрувати АА в сучасну мережево-центричну модель війни та забезпечить значно ефективнішу, гнучку та безпечну авіаційну підтримку військ вертольотами.

Список літератури

1. М. Коваль, О. Мальков та ін. Теоретико-прикладні аспекти російсько-української війни: гібридна агресія та національна стійкість. Монографія. Харків: TECHNOLOGY CENTER PC, 372. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-00-9> (Scopus).

2. В. Шостак, С. Пащенко. Методологічні аспекти технічного оновлення авіації Збройних Сил України. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2023. Вип. 19 (26). DOI: 10.54858/dndia.2023-19-1

3. Дрофф, Дж. Європейська промисловість військових вертольотів: тенденції та перспективи. *Економіка миру та безпеки*, № 12 (1). 2017. <https://doi.org/10.15355/ersp.12.1.20>

4. Рашевський Є., Пантелєєва Н. Розширення бойових можливостей вертольотів типу Мі-8 при польотах вночі в окулярах нічного бачення. *Повітряна міць України*, № 1 (6), 2024. С. 73–80. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-73-80>

5. Рассел Нельсон, Рассел Кінг, Брендон М. Макконнелл, Крістін Тоні-Барлетта. Визначення, використання та маршрутизація повітряних перевезень авіації армії США. *Журнал оборонної аналітики та логістики*, 19 вересня 2023 р.; № 7 (1). С. 2–28. <https://doi.org/10.1108/JDAL-11-2022-0013>

6. П.А. Глушенко, О.В. Самойленко, О.А. Жевтюк, О.В. Радько, В.М. Давиденко. Ретроспективний аналіз і тенденції розвитку безпілотних авіаційних комплексів з урахуванням сучасних програм їх створення. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2023. Вип. № 19/26. DOI: 10.54858/dndia.2023-19-33

7. С. Мосов. Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*. 2024. Вип. № 1 (80), 2024. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86>

8. О.В. Батюк, С.Ю. Тимченко, Л.Й. Данилівський. Моделювання процесів застосування БпЛА FPV задля ведення успішних оборонних операцій підрозділами Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2025. Вип. 1 (45). С. 23-34. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/1/45/339264>

9. С. Таранець, А. Филипенко.. Застосування артилерії силами оборони України під час російсько-української війни: оцінки, тенденції, використання міжнародної військово-технічної допомоги. *Military strategy and technology*. № 1 (1). 2025, С. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.63978/3083-6476.2025.1.1.11>

10. Коршець, О., Горбенко, В. Уроки застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні. *Повітряна міць України*, № 1 (4), 2023. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>

11. Центр оборонних стратегій. Hans Petter Midttun. Why the West cannot let Russia win. 2024. <https://defence.org.ua/wp-content/uploads/doslidzhennya/CDS-Why-the-West-cannot-let-Russia-win.pdf>

12. Петров В.М., Бабенко О.І., Кудрявцев А.Ф., Марченко О.М., Дубовик Г.В., Смик С.І. Погляди на напрями удосконалення форм та способів групового застосування безпілотних авіаційних систем Повітряних Сил Збройних Сил України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2025. № 1 (81). С. 51-58. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.81.07>

13. Степанов Г., Оріховський П., Луцишин А., Гашенко С. Розвиток дроноцентричних операцій за досвідом збройних конфліктів та російсько-української війни. *Повітряна міць України*, № 2 (5), 2023. С. 5–9. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-9>
14. Мартін, Бредлі, Даніель К. Тарраф, Томас К. Вітмор, Джейкоб Де Віз, Седрік Кенні, Джон Шмід та Пол Де Люка. Розвиток автономних систем: аналіз сучасних та майбутніх технологій для безпілотних транспортних засобів. Санта-Моніка, Каліфорнія: RAND Corporation, 2019. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2751.html
15. Shield AI. Hivemind для оперативного роіння, що читає та реагує. 2024. https://shield.ai/hivemind-for-operational-read-and-react-swarmling/?utm_source=chatgpt.com
16. Повітряна війна в Україні: перший рік / за редакцією Дага Генріксена та Джастіна Бронка. Абінгдон, Оксфорд; Нью-Йорк, штат Нью-Йорк: Routledge, 2025. DOI: 10.4324/9781003454120 Запис LC доступний за посиланням <https://lcn.loc.gov/2024007006>
17. Потоцький О. Становлення та розвиток армійської авіації як засобу вогневої підтримки сухопутних військ у воєнних конфліктах другої половини XX – початку XXI століття. Актуальні питання гуманітарних наук: міжвузівський збірник наукових праць молодих вчених Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка / редактори-упорядники М. Пантюк, А. Душний, В. Ільницький, І. Зимомря. Дрогобич: Видавничий дім «Гельветика», 2023. Вип. 62. Том 2, С. 10–16. DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/62-2-2>
18. О. Мальков; Ю. Єльчанинов; О. Лобас. Аналіз використання безпілотної авіації та армійської авіації під час бойової операції. *Соціальний розвиток і безпека*, Т. 11, № 4. 2021. С. 149–157. DOI: 10.33445/sds.2021.11.4.13
19. Маргарита Конаєва. Технології майбутнього в сучасній війні: використання штучного інтелекту та автономних технологій у війні в Україні та наслідки для стратегічної стабільності. IOP-2023-U-036583-Final. 3003 Washington Boulevard, Arlington, VA 22201. www.cna.org/703-824-2000 (Scopus).
20. Джек Вотлінг та Нік Рейнольдс. Спеціальний звіт. Штормбрейк: боротьба крізь російську оборону під час наступу в Україні 2023 року. 2023. Королівський об'єднаний інститут досліджень оборони та безпеки. 28 с. https://static.rusi.org/Stormbreak-Special-Report-web-final_0.pdf?utm_source=chatgpt.com (Scopus).
21. Каплюк О., Кірдей Л., Калетнік С., Манжара О. Підходи до розробки легкого вогневого модуля реактивної системи залпового вогню на колісному (гусеничному) шасі. *Випробування та сертифікація*, № 1 (1), 2023. С. 56–60. <https://doi.org/10.37701/ts.01.2023.07>
22. Чанг Інсю, Чен Юнцян, Умар Манзур, Джон Мюррей. Огляд автономного управління дронами в умовах відсутності GPS, *Робототехніка та автономні системи*, Том 170. 2023. 104533. ISSN 0921-8890. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>
23. Олексенко О., Місюк Г., Ікаєв Д., Коршок В., Палка В. Основні тенденції застосування безпілотних літальних апаратів у російсько-українській війні. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. № 3 (21). 2024. С. 99–105. DOI:10.37701/dndivsovt.21.2024.12
24. Михайло Гема. Надшвидка смерть: як та коли ракети Hydra 70 допоможуть Україні знищувати окупантів. https://24tv.ua/raketi-hydra-70-dalnist-harakteristiki-tsina-yaki-tsili-mozhe_n2307098
25. FPV-дрони в Україні: використання та типи. https://dignitas.fund/blog/fpv-drone-ukraine/?utm_source=chatgpt.com
26. Як дешеві дрони трансформують війну в Україні. https://www.economist.com/interactive/science-and-technology/2024/02/05/cheap-racing-drones-offer-precision-warfare-at-scale?utm_source=chatgpt.com
27. Безпілотні літальні апарати V-BAT VTOL. https://armyrecognition.com/military-products/army/unmanned-systems/unmanned-aerial-vehicles/v-bat-vtol?utm_source=chatgpt.com
28. Керівництво з льотної експлуатації вертольота Мі-8МТВ-1. Повітряний транспорт, М. 1994.
29. Тао К., Лю Б. Розподілене скоординоване керування рухом кількох БПЛА, орієнтоване на оптимізацію мережі ретрансляції “повітря-земля”. *Sci Rep* 14, 31501. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83243-4>
30. Сет Дж. Францман. 2025. Sikorsky інтегруватиме ізраїльські системи на ізраїльські гелікоптери CH-53K. https://breakingdefense.com/2025/03/sikorsky-to-integrate-israeli-systems-on-israels-ch-53k-helicopters/?utm_source=chatgpt.com
31. Ексклюзив: Україна таємно використовує безпілотник V-BAT американського виробництва для визначення місцезнаходження російських об'єктів ППО SA-11 для ударів HIMARS. https://www.armyrecognition.com/archives/archives-land-defense/land-defense-2024/exclusive-ukraine-secretly-uses-us-made-v-bat-drone-to-locate-russian-sa-11-air-defense-for-himars-strikes?utm_source=chatgpt.com

References

1. Koval M. (Ed.). (2023), "Teoretyko-prykladni aspekty rosiisko-ukrainskoi viiny: hibraydna ahresiiia ta natsionalna stiikist : monohrafiia" [Theoretical and applied aspects of the Russian-Ukrainian war: hybrid aggression and national resilience : monograph]. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC, 372. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-00-9> (Scopus). [in Ukrainian].
2. V. Shostak and S. Pashchenko. (2023), "Metodolohichni aspekty tekhnichnoho onovlennia aviatsii Zbroinykh Syl Ukrainy" [Methodological aspects of the technical update of aviation of the Armed Forces of Ukraine]. *Collection of scientific papers of the State Research Institute of Aviation*. Issue 19 (26). DOI: 10.54858/dndia.2023-19-1 [in Ukrainian].
3. Droff J. (2017), "Yevropeiska promyslovist viiskovykh vertolotiv: tendentsii ta perspektyvy" [The European military helicopter industry: Trends and perspectives]. *The Economics of Peace and Security Journal*, No. 12 (1). <https://doi.org/10.15355/epsj.12.1.20> [in Ukrainian].
4. Rashevsky E. and Panteleeva N. (2024), "Rozshyrennia boiovykh mozhlyvostei vertolotiv typu Mi-8 pry polotakh vnochi v okuliarakh nichnoho bachennia" [Expansion of combat capabilities of Mi-8 helicopters when flying at night with night vision goggles]. *Air Power of Ukraine*, 1 (6), 73–80. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-73-80> [in Ukrainian].

5. R. Nelson, R. King; Brandon M. McConnell and K. Thoney-Barletta. (2023), "Vyznachennia, vykorystannia ta marshrutyzatsiia povitrianykh perevezhen aviatzii armii SShA" [US Army Aviation air movement operations assignment, utilization and routing]. *Journal of Defense Analytics and Logistics*. No. 7 (1). pp. 2–28. <https://doi.org/10.1108/JDAL-11-2022-0013> [in Ukrainian].
6. P. Hlushchenko, O. Samoylenko, O. Zhevtiuk, O. Radko and V. Davidenko. (2023), "Retrospektyvnyi analiz i tendentsii rozvytku bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv z urakhuvanniam suchasnykh prohran yikh stvorennia" [Retrospective analysis and development trends of unmanned aviation systemtaking into account modern programs for their creation]. *Collection of scientific papers of the State Research Institute of Aviation*. Issue No. 19 (26). DOI: <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-33> [in Ukrainian].
7. S. Mosov. (2024), "Roinnia droniv viiskovoho pryznachennia: realii ta perspektyvy" [Swarming of military drones: realities and prospects]. *Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defense University of Ukraine*. Issue No. 1 (80). DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-1-80/77-86> [in Ukrainian].
8. O. Batiuk, S. Tymchenko and L. Danylivskyi. 2025, "Modeliuvannia protsesiv zastosuvannia BpLA FPV zadlia vedennia uspishnykh oboronnykh operatsii pidrozdilamy Natsionalnoi hvardii Ukrainy" [Modeling the processes of FPV UAV utilization for conducting successful defensive operations by units of the National Guard of Ukraine]. *Collection of scientific papers of the National Academy of the National Guard of Ukraine*. Issue 1 (45). pp. 23-34. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/1/45/339264> [in Ukrainian].
9. Taranets S. and Fylypenko A. (2025), The artillery application by the defense forces of Ukraine during the Russian-Ukrainian war: assessments, trends, use of international military assistance. *Military strategy and technology*. № 1 (1)/2025. pp. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.63978/3083-6476.2025.1.1.11>
10. Korshets O. and Horbenko V. (2023), "Uroky zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u rosiisko-ukrainskii viini" [Lessons from the application of unmanned aircrafts in the Russian-Ukrainian war]. *Air Power of Ukraine*, 1(4), 9–17. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17> [in Ukrainian].
11. Hans Petter Midttun. (2024), Why the West cannot let Russia win. Center for Defense Strategies. <https://defence.org.ua/wp-content/uploads/doslidzhennya/CDS-Why-the-West-cannot-let-Russia-win.pdf>
12. Petrov V.M., Babenko O.I., Kudryavtsev A.F., Marchenko O.M., Dubovik G.V. and Smyk S.I. (2025), "Pohliady na napriamy udoskonalennia form ta sposobiv hrupovoho zastosuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh system Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy" [Views on directions of improving forms and methods of group application of unmanned aviation systems of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine]. *Weapons Systems and Military Equipment*. No. 1 (81). pp. 51-58. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.81.07>
13. Stepanov G., Orikhovsky P., Lutsyshyn A. and Gashenko S. (2023), "Rozvytok dronotsentrychnykh operatsii za dosvidom zbroinykh konfliktiv ta rosiisko-ukrainskoi viiny" [Development of drone-centric operations based on the experience of armed conflict and the Russian-Ukrainian war]. *Air Power of Ukraine*, No. 2 (5), pp. 5–9. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-2-5-5-9> [in Ukrainian].
14. Martin, Bradley, Danielle C. Tarraf, Thomas C. Whitmore, Jacob DeWeese, Cedric Kenney, Jon Schmid and Paul DeLuca. (2019), *Advancing Autonomous Systems: An Analysis of Current and Future Technology for Unmanned Maritime Vehicles*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR2751.html
15. Shield AI. (2024), *Hivemind for Operational, Read-and-React Swarming*. https://shield.ai/hivemind-for-operational-read-and-react-swarming/?utm_source=chatgpt.com
16. The Air war in Ukraine : the first year / edited by Dag Henriksen, and Justin Bronk. Abingdon, Oxon; New York, NY : Routledge, 2025. DOI: 10.4324/9781003454120. LC record available at <https://lccn.loc.gov/2024007006>
17. O. Pototskyi (2023), "Stanovlennia ta rozvytok armiiskoi aviatzii yak zasobu vohnevoi pidtrymky sukhoputnykh viisk u voiennykh konfliktakh druhoi polovyny XX – pochatku XXI stolittia" [Becoming and development of Army Aviation as army fire support asset in military conflicts of the second half of the XX – early XXI centuries]. *Current issues of the humanities: interuniversity collection of scientific works of young scientists of the Ivan Franko Drohobych State Pedagogical University* : [editors-compilers M. Pantyuk, A. Dushny, V. Ilnytskyi, I. Zymomrya]. Drohobych: Publishing house "Helvetica", Issue 62. Volume 2, pp. 10–16. DOI <https://doi.org/10.24919/2308-4863/62-2-2> [in Ukrainian].
18. Malkov A., Yelchaninov Y., and Lobas A. (2021), "Analiz vykorystannia bezpilotnoi aviatzii ta armiiskoi aviatzii pid chas boiovoi operatsii" [Analysis of the use of unmanned aviation and army aviation during a combat operation. *Social Development and Security*, 11(4), 149-157. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.4.13> [in Ukrainian].
19. Margarita Konaev. Tomorrow's Technology in Today's War: The Use of AI and Autonomous Technologies in the War in Ukraine and Implications for Strategic Stability. IOP-2023-U-036583-Final. 3003 Washington Boulevard, Arlington, VA 22201 www.cna.org 703-824-2000.
20. Jack Watling and Nick Reynolds. Special Report. Stormbreak: Fighting Through Russian Defences in Ukraine's 2023 Offensive, 28 p. Published in 2023 by the Royal United Services Institute for Defence and Security Studies. https://static.rusi.org/Stormbreak-Special-Report-web-final_0.pdf?utm_source=chatgpt.com
21. Kaplyuk O., Kirdey L., Kaletnik S. and Manzharova O. (2023), "Pidkhody do rozrobky lehkoho vohnevoho modulua reaktivnoi systemy zalpovoho vohniu na kolisnomu (husenychnomu) shasi" [Approaches to the development of a lightweight fire module of a multiple launch rocket system on a wheeled (tracked) chassis]. *Testing and Certification*, No. 1 (1). pp. 56-60. <https://doi.org/10.37701/ts.01.2023.07> [in Ukrainian].
22. Yingxiu Chang, (2023), Yongqiang Cheng, Umar Manzoor, John Murray. A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 170. 104533, ISSN 0921-8890. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104533>
23. Oleksenko O., Misiuk H., Ikaiev D., Korshok V. and Palka V. (2024) "Osnovni tendentsii zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u rosiisko-ukrainskii viini" [Main trends in the use of Unmanned Aircraft in the Russian-Ukrainian war], *Scientific works; of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*, No. 3 (21), pp. 99-105. doi: 10.37701/dndivsovt.21.2024.12. [in Ukrainian].
24. Mykhailo Hema (2023). "Nadshvydka smert: yak ta koly rakety Hydra 70 dopomozhut Ukraini znyschuvaty

okupantiv" [Ultra-rapid death: how and when Hydra 70 missiles will help Ukraine destroy the occupiers]. https://24tv.ua/raketi-hydra-70-dalnist-harakteristiki-tsina-yaki-tsili-mozhe_n2307098 [in Ukrainian].

25. "FPV-drony v Ukraini: vykorystannia ta typy" [FPV Drone Ukraine: Use and Types]. https://dignitas.fund/blog/fpv-drone-ukraine/?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].

26. "Yak deshevi drony transformuiut viinu v Ukraini" [How cheap drones are transforming warfare in Ukraine]. https://www.economist.com/interactive/science-and-technology/2024/02/05/cheap-racing-drones-offer-precision-warfare-at-scale?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].

27. "Bezpilotni litalni aparaty V-BAT VTOL" [V-BAT VTOL]. https://armyrecognition.com/military-products/army/unmanned-systems/unmanned-aerial-vehicles/v-bat-vtol?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].

28. (1994), "Kerivnytstvo z lotnoi ekspluatatsii vertolota Mi-8MTV-1" [Flight Operation Manual for the Mi-8MTV-1 Helicopter], *Air Transport*. Moscow. [in Ukrainian].

29. Tao C. and Liu B. (2024), Distributed coordinated motion control of multiple UAVs oriented to optimization of air-ground relay network. *Sci Rep* 14, 31501. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83243-4>

30. Seth J. Frantzman (2025), Sikorsky to integrate Israeli systems on Israel's CH-53K helicopters. https://breakingdefense.com/2025/03/sikorsky-to-integrate-israeli-systems-on-israels-ch-53k-helicopters/?utm_source=chatgpt.com

31. (2024), "Ekskliuzyv: Ukraina taємno vykorystovuie bezpilotnyk V-BAT amerykanskoho vyrobnytstva dlia vyznachennia mistseznakhodzhennia rosiiskykh ob'ektiv PPO SA-11 dlia udariv HIMARS" [Exclusive: Ukraine Secretly Uses US-Made V-BAT Drone to Locate Russian SA-11 Air Defense for HIMARS Strikes]. https://www.armyrecognition.com/archives/archives-land-defense/land-defense-2024/exclusive-ukraine-secretly-uses-us-made-v-bat-drone-to-locate-russian-sa-11-air-defense-for-himars-strikes?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].

PROBLEM ISSUES OF CLOSE AVIATION SUPPORT OF TROOPS BY ARMY AVIATION IN THE CONTEXT OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR AND POSSIBLE WAYS TO SOLUTION THEM

O. Malkov, S. Pokhnatiuk, S. Kudymov, I. Sherykhov

The article examines the current state of implementation of close air support tasks by the Army Aviation of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine in the conditions of the Russian-Ukrainian war. A number of key problems are identified that make it impossible to effectively perform air support tasks, and it is concluded that the classical model of using helicopters with unguided aircraft missiles no longer meets the realities of the modern battlefield. An analysis of the prospects for increasing the effectiveness of close air support by integrating unmanned aviation systems with army aviation helicopters is conducted. Promising types of strike unmanned aerial vehicles, their technical parameters, possibilities of integration with the Mi-8 platform and application scenarios are analyzed. The transformation of the role of the helicopter from a direct attack platform to a command and strike platform, which performs the functions of a carrier, coordinator and target designator for strike swarms, is substantiated. The concept and model of integration of kamikaze drones with a system similar to Hivemind with army helicopters is proposed as an intelligent strike and reconnaissance superstructure to increase the accuracy of destruction and reduce the risk for crews. Recommendations are given for the development of tactics for the group use of helicopters and drones. Priority areas for further research are identified, in particular, the effectiveness of the combat use of kamikaze drones in the "swarm" format from a helicopter, standardization of control interfaces, development of tactics for the group use of helicopters and drones, as well as testing of autonomous solutions based on artificial intelligence. The results of the article form the basis for a new concept of close air support for troops, adapted to the drone-oriented format of modern warfare..

Keywords: Army Aviation, close air support, helicopter, helicopter carrier, unmanned aerial vehicles, kamikaze drones, drone swarm, air defense, electronic warfare, aviation weapons, group use of helicopters and drones, modern warfare.

UDC 358.1, 629.7

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.141-145>

D.A. Novak¹, V.A. Yunda² *

¹ *Research center missile troops and artillery, Sumy*

² *Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv*

VIEWS ON THE POSSIBILITY OF EQUIPPING UNITS AND SUB-UNITS OF THE MISSILE FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE WITH UNMANNED LONG-RANGE

The article presents a classification of military-purpose unmanned aerial vehicles and analyses the main characteristics and combat capabilities of existing long-range loitering munitions. Drawing on combat experience, it outlines their principal advantages and disadvantages relative to cruise and ballistic missiles. Considering the roles and primary tasks of the units and sub-units of the Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine, as well as the specifics of their tactics of employment, the article draws conclusions on the feasibility and advisability of equipping these units with long-range loitering munitions and offers recommendations on their key characteristics.

Keywords: *strike and reconnaissance-strike unmanned aerial vehicles, long-range loitering munitions, units and subunits of the Missile Forces, missile armament, missile delivery systems, cruise and ballistic missiles.*

Problem statement

The latest type of military unmanned aerial vehicles, which are currently undergoing rapid development, are strike UAVs. The most promising direction for the development of this type of UAV is considered to be the creation of long-range loitering munitions capable of striking important enemy targets deep within their territory, moving towards their designated targets at relatively low speeds, along complex routes at different altitudes. [1]. Faced with the prospect of a protracted, exhausting war with a state that is militarily more advanced, many countries – including Ukraine – have begun to consider long-range loitering munitions as an alternative to missile systems. Thus, a perfectly reasonable question arises as to the feasibility and advisability of equipping units and subunits of the Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine with long-range loitering munitions.

Analysis of recent research and publications

The missile forces are part of the missile forces and artillery of the Armed Forces of Ukraine. The missile forces include units and subunits equipped with missile weapons. Missile weapons are understood as a system of firepower assets – including missile complexes and large-calibre multiple launch rocket systems – whose

primary purpose is the high-precision destruction of enemy targets.

Units and subunits of the missile forces perform the task of providing fire support to troops (forces) by delivering missile strikes against the enemy's main and most important targets, using missiles and rockets of various types. A distinctive feature of the units and sub-units of the Missile Forces is their ability to engage the enemy around the clock, in all weather conditions, and at short notice in order to achieve specific operational effects. [2, 3]. Based on the roles and primary tasks of the units and subunits of the Missile Forces, as well as the specifics of their tactics, missile weapons and their components must possess certain key attributes, the most important of which are reliability, mobility, and the speed and concealment of their deployment. The missile weapons currently employed by the Ukrainian Armed Forces generally meet the aforementioned requirements; however, there are a number of issues that still need to be addressed. The following issues may be regarded as problematic:

the dependence of the Armed Forces of Ukraine on the quantity and types of missile weapons supplied under the programme of material and technical assistance from partner countries;

the limited range of missile weapons available to the Armed Forces of Ukraine, with a range of up to 300 km;

Article history: Income 02 May 2025; Revised 20 May 2025; Accepted 03 June 2025; Print 05 December 2025

Новак Д.А. ORCID ID: 0000-0002-4582-595X, Юнда В.А. ORCID ID: 0000-0002-8941-823X

* Corresponding author valera.yunda@ukr.net

© Новак Д.А., Юнда В.А.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

the inability of Ukraine's defence industry to meet the current demands of the Ukrainian Armed Forces in terms of high-precision missile and rocket production.

In order to resolve the issues outlined above, the feasibility of equipping the Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine with long-range loitering munitions is being considered. To answer this question, it is necessary to analyse the key characteristics of this type of unmanned weaponry and assess their main advantages and disadvantages in comparison to 'traditional' missile systems (cruise and ballistic missiles).

Formulation of the article's objective

The purpose of the article is to define the classification of unmanned aerial vehicles for military use, analyse the main characteristics and combat capabilities of existing long-range loitering munitions, evaluate their key advantages and disadvantages in comparison to cruise and ballistic missiles, substantiate conclusions regarding the feasibility of equipping units and sub-units of the Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine with long-range loitering munitions, and provide recommendations on their key properties.

Presentation of the main material

Today, loitering munitions ('kamikaze drones') include strike and reconnaissance-strike UAVs that hit targets with a built-in (integrated) warhead (WH) and self-destruct during the attack. The name of this type of UAV indicates their ability to remain in the air for long periods of time, including in standby (patrol) mode in a designated area, with the aim of immediately striking a detected target upon receiving a command from the operator. [1, 4]. As mentioned above, loitering munitions are considered a relatively new type of unmanned weaponry, although today there is already a wide range of such UAVs in existence and use, from small FPV drones to long-range 'kamikaze drones' capable of striking enemy targets hundreds or even thousands of kilometres deep into enemy territory.

According to the accepted classification shown in Table 1, all military UAVs can be divided into tactical and operational-tactical (Class I and II UAVs) as well as operational and strategic (Class III UAVs) based on their range of application [5 - 7].

Table 1

Classification of unmanned aerial vehicles

Class	Level		Radius of action		NATO category
I	Tactical	Micro	up to 5 km		Micro
		Mini (Battlefield UAV)	from 5 to 25 km		Mini
		Small	from 25 to 50 km		Small
II	Operational-tactical		from 50 to 200 km		Tactical
III	Operational		over 200 km (outside the line-of-sight radio coverage area)	up to 500 km	MALE
	Strategical			over 500 km	HALE

UAVs belonging to Class III (with a range of over 200 km) are also classified as long-range unmanned aerial vehicles.

An analysis of the main characteristics of existing loitering munitions indicates that a typical long-range 'kamikaze drone' usually has an aircraft-like design, is equipped with a piston internal combustion engine (e.g. ICE), has an inertial guidance system (IGS) that is adjusted by signals from satellite navigation systems (SNS) and is launched from a runway (RWY) or a launcher mounted on a self-propelled launcher (SPL) or other chassis (platform) (see Table 2) [8, 9].

The results of the analysis also indicate that for a significant number of long-range 'kamikaze drones,' the ability to conduct aerial reconnaissance and loitering is not provided for or is not used in favour of ensuring long-range target engagement. In addition, in terms of their characteristics and combat capabilities, modern long-range

loitering munitions are rapidly and steadily approaching missile weapons, primarily cruise missiles. According to some military experts, this trend in the development of long-range strike UAVs has led to the creation of a new type of weapon – missile drones, which combine the advantages and main capabilities of both strike UAVs and cruise missiles. [9]. In general, cruise missiles (CM) are defined as a type of missile weapon in which wings are used to generate lift, and a turbojet engine (TJE) is used as a power plant, which allows CMs to fly at subsonic speeds (600–900 km/h) along various trajectories, including complex ones that follow the terrain. [10].

The main advantages of long-range loitering munitions over 'classical' cruise and ballistic missiles include [5, 7, 11]:

low life cycle cost (cost of development, purchase, operation, disposal, etc.) – the main and most significant advantage; extremely high manoeuvrability (ability to fly complex trajectories using different speed modes);

Table 2

Main characteristics of modern long-range loitering munitions

Name	Country of manufacture	Operating range, km	Take-off weight, kg	Weight of WH, kg	Control system type (guidance)	Engine type	Cruising speed, km/h	Ability to conduct reconnaissance	
Shahed-131 (Geran-1)	Iran (rf)	~900	135	15	IGS with correction from SNS	ICE	180	Not provided	
Shahed-136 (Geran-2)		~1500	200	~50			185		
Shahed-238 (Geran-3)		~1200	380	~50	IGS with correction from SNS with IR or radar homing head	TJE	480		
UJ-26 Bober	Ukraine	~1000	~150	20	IGS with correction from SNS	ICE	80		Not provided
E-300 Enterprise		575- 3100	540	до 300			~150		
Liutyi		~1500	~300	до 75	IGS with correction from SNS and with optical homing head		~150		
AQ-400 Scythe		750	100	32			144		
Palyanytsya		~650	~300	до 100	IGS with correction from SNS	TJE	~450		
Bars		~700	~140	22			~350		
IAI Harpy	Israel	~1000	125	32	Combined (optical-electronic with radar)	ICE	185	up to 3 hours	
IAI Harop		~1000	135	16-23	Combined (optical-electronic with IR camera)		185	up to 6 hours	
Harpy NG		~1000	160	15	Combined (optical-electronic with radar)		185	up to 9 hours	
ALS-50	India	~1000	no data available	до 30	IGS with correction from SNS		no data available	no data available	
Gremlin	the United States	~1200	680	~66	Combined (optical-electronic with IR camera)	TJE	650	Provided (products are under development)	
Vila 1	Serbia	~300	300	~70	IGS with correction from SNS		no data available		
RCM2	Germany	~500	~340	~50	IGS with correction from SNS and with IR homing head		no data available		

ability to fly at low and ultra-low altitudes (up to 50 m);

relatively small size (together with the ability to fly complex trajectories at extremely low altitudes, making them difficult to detect and destroy by most existing air defence systems);

the ability to establish large-scale production in a relatively short period of time;

the possibility of use by large groups ('flocks'), which significantly increases the probability of overcoming

the enemy's air defence and the probability of hitting targets deep within the combat formations of its troops (forces).

The main disadvantages of long-range loitering munitions compared to conventional ('classical') missile weapons are generally considered to be:

lower accuracy and radio-electronic security class of navigation devices (reduces strike accuracy);

relatively insignificant weight of the warhead (affects the list of targets and requires the allocation of more resources to hit targets with a specific level of effect);

low flight speed (affects the speed of target engagement and limits the use of this type of weapon in reconnaissance and strike complexes);

engine noise (a demasking feature which, together with the relatively low speed of strike UAVs with conventional piston engines, increases the likelihood of their detection and destruction by both anti-aircraft weapons and enemy small arms).

In addition, the disadvantages of this type of strike UAV include the fact that some long-range 'kamikaze drones' require a runway for launch and are characterised by lengthy pre-launch preparation times, including the need to refuel the UAVs, which in turn significantly reduces the level of operational readiness and stealth of their use, as well as the survivability of units.

Conclusions

The results of the analysis allow us to draw the following conclusions:

1. Long-range loitering munitions (strike and reconnaissance-strike UAVs) are a new and relatively inexpensive type of long-range weapon that has a number of significant advantages over 'classical' missile weapons (cruise and ballistic missiles).

2. Taking into account the purpose, the main tasks and tactical features of missile units, as well as the significant limitations of the Armed Forces of Ukraine in terms of the number and types of missiles supplied under the material and technical assistance programme from partner countries, it is possible and advisable to consider equipping the missile forces of the Armed Forces of Ukraine with long-range loitering munitions of domestic and foreign production. This type of unmanned weapon should be considered not as an alternative, but as a supplement to the existing and prospective missile weapons of the Armed Forces of Ukraine.

3. When selecting the type of promising long-range loitering munitions to equip the units and subunits of the Ukrainian Armed Forces' missile troops, priority should be given to domestically produced drone missiles with turbojet engines and a range of over 200 km.

4. Long-range loitering munitions, which will be considered for equipping and use by the missile forces of the Armed Forces of Ukraine, must have the following combat and operational characteristics:

combat power that will ensure the destruction of the entire list of typical targets identified for the missile forces of the Armed Forces of Ukraine. To this end, monoblock (high-explosive and high-explosive fragmentation) and cassette-type warheads should be included in the nomenclature of combat equipment for long-range loitering munitions;

operational efficiency and concealment of use, for which long-range loitering munitions should not require launch pads or artificial surfaces for launch, be launched into the air from a launcher or TLC (Transport and Launch Container), and have fuel tanks in their design that do not require refuelling and maintenance during pre-launch preparation;

mobility due to the installation of a starting device or TLC on the SPL, made on the chassis of high-clearance vehicles;

reliability of operation, etc.

Further research should focus on training qualified personnel in the combat use of long-range loitering munitions to the benefit of the units and subunits of the Ukrainian Armed Forces' missile forces.

References

1. "Barazhuyuchi boieprypas" [Barrage ammunition. Wiktionary]. [Internet resource] Access mode: https://ru.wiktionary.org/wiki/баражующий_боеприпас [in Ukrainian].
2. (2022), "Тимчасова доктрина "Рaketni viiska i artyleriya Zbroinykh Syl Ukrainy", SDP 3-06.07(03).01., zatverdzhena Holovnokomanduvachem ZS Ukrainy 03.11.2022" [Temporary doctrine "Missile troops and artillery of the Armed Forces of Ukraine", SDP 3-06.07(03).01., approved by the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine on 03.11.2022]. [in Ukrainian].
3. (2020), "Boiovyi statut "Raketnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy (bryhada, dyvizion, batareia)", BP 3- (06)03.01., zatverdzhenyi ta vvedenyi v diu nakazom komanduvacha SV ZS Ukrainy vid 17.06.2020 № 1t" [Combat regulations of the "Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine (brigade, division, battery)", BP 3-(06)03.01., approved and put into effect by order of the Commander of the Missile Forces of the Armed Forces of Ukraine dated 17.06.2020 Vol. 1]. [in Ukrainian].
4. "Barazhuvannia. Elektronna versia "Velykoi ukrainskoi entsyklopedii" [Barazhuvannia. Electronic version of the "Great Ukrainian Encyclopedia". [Internet resource] access mode: <https://vue.gov.ua/Баражування>. [in Ukrainian].
5. Mosov S.P. and Pogoretsky M.V. (2019), "Pohoretskyi. Bezpilotna aviatsiia u viiskovii spravi : Monohrafiia" [Unmanned aviation in military affairs : Monograph]. Kyiv.: Interservice. 324 p. [in Ukrainian].
6. (2024), "Zastosuvannia bezpilotnykh system u sylakh oborony Ukrainy". Zatverdzhena Holovnokomanduvachem ZS Ukrainy vid 01.01.2024 OP 3-0(46)" [Doctrine "Application of unmanned systems in the defense forces of Ukraine". Approved by the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine dated 01.01.2024 OP 3-0(46)]. 61 p. [in Ukrainian].
7. Makarenko S.I. (2020), "Protivodeistviye bespilotnykh letatelnykh apparatam : Monohrafiia" [Counteraction to unmanned aerial vehicles : Monograph. St. Petersburg: Science-intensive technologies]. 204 p. [in Ukrainian].
8. Zhugan O. and Degtyarev M. (2024), Version of loitering munitions classification based on the state-of-the-art and trends analysis. *Space Science and Technology*. Vol. 30, No. 3 (148). pp. 31–39.

9. (2024), "BBC News Ukraina. Ukraina vykorystala zbroiu "novoho klasu". Shcho vidomo pro raketu-dron "Palyanytsia" [BBC News Ukraine. Ukraine used a "new class" weapon. What is known about the "Palyanytsia" drone missile]. [Internet resource] Access mode: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c4gzwjxjgdklo> [in Ukrainian].

10. (1984), "Voennyi entsyklopedycheskyi slovar. Pred. Hl. red. Akhromeev S.F." [Military Encyclopedic Dictionary. Pred. Ch. Ed. Akhromeev S.F]. M.: Voenizdat. 863 p. [in Ukrainian].

11. O. Molloy. (2024), "Yak drony zminiuiut suchasnu viinu." [How drones change modern warfare]. *Militarnyi*. [Internet resource] access mode: <https://mil.in.ua/uk/articles/yak-drony-zminyuyut-suchasnu-vijnu/> [in Ukrainian].

ПОГЛЯДИ НА МОЖЛИВІСТЬ ОСНАЩЕННЯ ЧАСТИН І ПІДРОЗДІЛІВ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ БЕЗПІЛОТНИМИ ЗАСОБАМИ УРАЖЕННЯ ВЕЛИКОЇ ДАЛЬНОСТІ

Д.А. Новак, В.А. Юнда

У статті надано класифікацію безпілотних авіаційних засобів військового призначення, проведено аналіз основних характеристик та бойових можливостей існуючих баражуючих боєприпасів великої дальності. З урахуванням досвіду ведення бойових дій наведено їх основні переваги та недоліки порівняно із крилатими та балістичними ракетами. З огляду на їх призначення та основні завдання частин і підрозділів ракетних військ Збройних Сил України, а також особливості тактики їх застосування зроблено висновки стосовно можливості та доцільності їх оснащення баражуючими боєприпасами великої дальності та надано рекомендації щодо їх основних властивостей.

Ключові слова: ударні та розвідувально-ударні безпілотні літальні апарати, баражуючі боєприпаси великої дальності, частини та підрозділи ракетних військ, ракетне озброєння, ракетні засоби ураження, крилаті та балістичні ракети.

УДК 358.1

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.146-153>Р.С. Шостак¹, О.О. Ріман²¹ Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії, м. Суми² Національний університет оборони України, м. Київ

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ВОГНЕВОЇ ПІДТРИМКИ РАКЕТНИМИ ВІЙСЬКАМИ І АРТИЛЕРІЄЮ

Наразі виникла необхідність перегляду існуючих підходів до оцінювання результативності вогневої підтримки ракетними військами і артилерією у зв'язку із впровадженням процесів і процедур планування та виконання об'єднаної вогневої підтримки в операції (бою) на основі таргетування (визначення цілей).

Одним із можливих шляхів вирішення цього питання є розроблення методичного підходу, що дозволить здійснювати оцінювання результативності вогневої підтримки, зокрема ракетними військами і артилерією.

У статті запропоновано методичний підхід до оцінювання результативності вогневої підтримки ракетними військами і артилерією на етапах таргетування (визначення цілей).

У статті проаналізовано сучасний методичний підхід до оцінювання ефективності об'єднаної вогневої підтримки у провідних у військовому відношенні країнах світу, зокрема у країнах НАТО. Обґрунтовано можливість адаптації методики “Methodology for combat assessment” до національної системи оцінювання бойових дій, а саме вогневої підтримки ракетними військами і артилерією з урахуванням умов війни росії проти України.

Ключові слова: таргетування, визначення цілей; оцінювання результативності; вогневий вплив; об'єднана вогнева підтримка; вогнева підтримка; ракетні війська і артилерія; ураження цілей; фізичний збиток, функціональний збиток.

Постановка проблеми

Досвід відсічі і стримування збройної агресії російської федерації [1-6] свідчить про те, що у сучасних умовах ведення бойових дій ракетні війська і артилерія залишаються одним із головних засобів вогневої протидії противнику. Їх ефективне бойове застосування безпосередньо впливає на досягнення визначених ефектів та визначеної мети операції (бою) у цілому. Водночас актуальною залишається проблема об'єктивного оцінювання результативності вогневої підтримки ракетними військами і артилерією (далі – РВіА), зокрема визначення результатів ураження (досягнення ефекту ураження) цілей, прийняття рішення щодо повторного ураження, а також встановлення змін у спроможностях противника внаслідок ураження.

В умовах високої інтенсивності, маневреного характеру бойових дій і обмеженості ресурсів службові особи підрозділів об'єднаної вогневої підтримки органу управління угруповання військ

потребують швидкого, достовірного і системного зворотного зв'язку для встановлення результатів вогневого впливу, зокрема вогневими засобами РВіА. На практиці, наприклад, в умовах ведення бойових дій в підрозділах ОВгП, оцінювання результативності вогневого впливу здійснюється за різнорідними, локальними критеріями, без належної уніфікації, що ускладнює прийняття своєчасних рішень на тактичному та оперативному рівнях.

Натомість у провідних у військовому відношенні країнах світу, зокрема збройних силах країн НАТО, сформовано та введено у дію “Комплексну методiku оцінювання вогневого впливу” (Methodology for combat assessment) [7]. Адаптація цієї комплексної методики до умов оцінювання бойових дій – вогневої підтримки РВіА – становить важливе науково-прикладне завдання, вирішення якого дозволить підвищити ефективність виконання завдань з ураження цілей у сучасних умовах.

Article history: Income 17 August 2025; Revised 27 August 2025; Accepted 02 September 2025; Print 05 December 2025

Шостак Р.С. ORCID ID: 0000-0002-8177-5945, Ріман О.О. ORCID ID: 0000-0002-3015-142X

* Corresponding author romario8888.rs@gmail.com

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика оцінювання ефективності (результативності) вогневої підтримки (вогневого ураження) та застосування підрозділів РВіА висвітлюється у наукових працях як вітчизняних, так і зарубіжних науковців.

У вітчизняному науковому середовищі особливу увагу цьому питанню приділено науковцями Національного університету оборони України, зокрема обґрунтовано ряд рекомендацій щодо: підвищення результативності ведення воєнних дій РВіА в операціях (діях) за рахунок забезпечення живучості артилерійських підрозділів [8-11], розподілу артилерійських підрозділів під час виконання завдань ВгП [13-16]; визначення доцільного порядку вогневого впливу на артилерію противника [17]; застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах виконання вогневих завдань артилерією в різних формах ведення воєнних дій [17-20] та використання матриці CARVER під час визначення пріоритетності об'єктів противника в ході ВгП артилерією [21].

У статті [22] науково-дослідна група дійшла до висновку, що підвищення результативності ВгП РВіА в операціях (діях) під час стримування широкомасштабної збройної агресії РФ проти України можна досягнути за рахунок впровадження циклу таргетування у процес оперативного планування.

Доктринальні документи Збройних Сил України, зокрема [23, 27], визначають порядок оцінювання об'єднаної вогневої підтримки, проте не описують зміст безпосереднього оцінювання результативності вогневої підтримки, зокрема і РВіА.

На міжнародному рівні впроваджено низку доктринальних документів, які регламентують оцінювання вогневого впливу. Наприклад, методикою [7], а також доктринальними документами [24-26] встановлюють єдиний підхід до оцінювання результатів бойових дій у збройних силах США та НАТО. У цих документах "бойове оцінювання" представлено як системний процес під час оперативного планування.

Водночас, попри теоретичну повноту, на практиці в умовах війни росії проти України адаптація зазначених вище підходів залишається обмеженою. Відсутність ґрунтовних прикладних наукових досліджень щодо впровадження методичних підходів до оцінювання результативності вогневої підтримки РВіА ЗС України зумовлює актуальність подальших наукових розробок у цій сфері.

Формулювання мети статті

Метою статті є розроблення методичного підходу до оцінювання результативності вогневої підтримки ракетними військами і артилерією у зв'язку із впровадженням процесів і процедур планування та виконання об'єднаної вогневої підтримки в операції (бою) на основі визначення цілей (таргетування).

Виклад основного матеріалу

Результати аналізу доктринальних документів країн – членів НАТО [24-26] та Збройних Сил України [23] дають змогу стверджувати, що сукупність подібних та взаємопов'язаних між собою спроможностей військ (сил), згрупованих у систему за функціональною ознакою, є спільною функцією, зокрема це стосується і вогневої підтримки. Доктринально визначено, що вогнева підтримка – скоординоване застосування вогневих засобів одного із компонентів (наземного, морського, повітряного) з метою вогневого впливу непрямым вогнем на угруповання військ (сил) і об'єкти противника [23].

Водночас у сучасних операціях (боях) вогнева підтримка розглядається не лише як фізичне ураження цілей противника, а як цілеспрямований процес впливу на його спроможності, тобто здатності до ведення бойових дій. В умовах інтенсивного маневреного бою та стрімкої зміни обстановки надзвичайно важливою є здатність командування оперативно оцінювати результативність застосованих вогневих засобів, а саме РВіА. Саме тому методичне підґрунтя оцінювання результативності вогневої підтримки повинно мати системний, стандартизований і багатоетапний характер.

Методичний підхід до оцінювання вогневої підтримки РВіА може базуватися на Methodology for combat assessment [7] – цілісний процес аналізу результатів вогневого впливу, що є складовою загального циклу об'єднаного визначення цілей (Joint Targeting Cycle). Згідно із зазначеним вище методичним підходом оцінювання вогневої підтримки включатиме три взаємопов'язані часткові методики:

методику оцінювання бойових пошкоджень (battle damage assessment);

методику оцінювання супутніх збитків (collateral damage assessment);

методику оцінювання ефективності боєприпасів (munitions effectiveness assessment).

За результатами оцінювання приймається рішення щодо завершення виконання завдань ураження цілей або повторного їх ураження. Загальний структурно-логічний вигляд методичного підходу наведено на рис. 1.

Кожна із цих методик має власну логіку, мету, вихідні дані та методи аналізу. Однак усі разом вони формують єдину систему зворотного зв'язку для прийняття подальших рішень. Оцінювання вогневого впливу є невід'ємною частиною фази оцінювання результативності бойових дій, яка замикає цикл оперативного планування й водночас формує вихідні дані для нових рішень щодо повторного вогневого впливу, зміни тактики застосування або перерозподілу ресурсів.

Використання вищезазначеного методичного підходу зумовлюватиме дотримання таких принципів:

комплексність – передбачає оцінювання не лише фізичного ураження цілей, але й функціонального, а також впливу на систему управління, логістики, морально-психологічний стан противника тощо;

інформаційна обізнаність – використання розвідвальної інформації від всіх доступних видів розвідки;

оперативність – оцінка має бути максимально наближеною до часу виконання завдань ураження цілей для того, щоб впливати на прийняття рішень у реальному часі;

системність і повторюваність – проведення оцінювання за єдиною структурою і методикою, що дозволяє порівнювати результати та відстежувати динаміку.



Рис. 1. Структурно-логічна схема "Методичного підходу до оцінювання вогневої підтримки РВіА"

Основна перевага зазначеного вище методичного підходу полягає в тому, що він універсальний і може бути адаптований для оцінювання вогневої підтримки як угрупованнями ракетних військ і артилерії, так і окремими ракетними і артилерійськими підрозділами (батарея, взвод, обслуга). Його застосування дозволяє значно підвищити точність прогнозування бойових дій, зменшити кількість "зайвих" вогневих завдань чи завдань щодо завдання ракетних ударів, оптимізувати витрати ракет і боєприпасів, а також підвищити об'єктивність оцінки ефективності вогневої підтримки для досягнення визначеної мети операції (бою) у цілому.

Отже, методичний підхід до оцінювання результативності вогневої підтримки передбачає поетапний, глибокий аналіз ефективності вогневого впливу на противника. Кожна часткова методика (BDA, CDA, MEA) виконує конкретну функцію у процесі планування та виконання вогневої підтримки та формуванні рішень щодо подальших дій.

Основною метою часткової методики оцінювання бойових пошкоджень (BDA) є встановлення рівня пошкодження або виведення з ладу цілі в результаті вогневого впливу. Оцінювання проводиться за трьома фазами.

Фаза 1 – **оцінювання фізичних збитків** (physical damage assessment (PDA)). Впродовж цієї фази

встановлюється ступінь фізичного пошкодження цілі (повне знищення, часткове пошкодження або відсутність пошкоджень). Для цього використовуються візуальні, аерофото або супутникові дані, а також результати спостереження з БпЛА або розвідувальних підрозділів. Наприклад, зафіксоване за допомогою БпЛА влучання артилерійського снаряда у споруду, в якій розташований командний пункт підрозділу противника, не є автоматичним підтвердженням його знищення чи подавлення – потрібна обов'язкова верифікація фактичного ступеня пошкодження цієї споруди.

Фаза 2 – **оцінювання функціональних збитків** (functional damage assessment (FDA)). Впродовж цієї фази оцінюється функціональність цілі після ураження. Важливо не лише те, чи об'єкт пошкоджено, а й чи може він продовжувати своє функціонування. Наприклад, після ураження радіолокаційної станції контрбатареїної боротьби касетним снарядом типу M864 остання може зберігати свою конструкційну цілісність, проте пошкодження її антени призведе до втрати здатності випромінювати або приймати сигнали. У випадку ураження командного пункту встановлюється, чи зберігся в об'єкта доступ до електроживлення, чи здатний він організовувати зв'язок, чи є ознаки роботи особового складу тощо.

Фаза 3 – **оцінювання збитків системи цілей** (target system damage assessment (TSDA)). Впродовж цієї фази оцінюється ураження системи цілей, яка забезпечує спроможність (здатність) противника виконувати завдання за призначенням. Наприклад, знищення однієї БМ ЗРК системи ППО угруповання військ противника може не вплинути на її ефективність функціонування. Проте одночасне ураження декількох критичних об'єктів цієї системи цілей, таких як командні пункти, радіолокаційні станції, бойові машини ЗРК змінить її стан та забезпечить досягнення визначеного ефекту.

Часткова методика **оцінювання супутніх збитків** (collateral damage assessment (CDA)) дає можливість оцінити внаслідок застосування вогневих засобів супутні збитки, завданні об'єктам, що були поза межами цілі. До таких збитків, як правило, відносять:

- втрати серед цивільного населення;
- пошкодження цивільної інфраструктури (житлові будинки, електростанції, медичні заклади, заклади освіти тощо);
- вплив на природне середовище (отруєння повітря чи водойми тощо);
- ураження союзних військ (сил) або об'єктів у їх складі.

Військово-політичне значення процесу оцінювання супутніх збитків в умовах сучасної війни постійно зростає. Наявність супутніх збитків може призвести до міжнародного осуду, юридичних наслідків та втрати моральної переваги.

Оцінювання супутніх збитків у військовій практиці виконується не лише після завдання удару чи вогню, а й під час планування – у вигляді попередньої оцінки потенційних супутніх втрат. Це дозволяє зменшити ризики та ухвалити обґрунтоване рішення щодо доцільності завдання удару або вибору альтернативної дії.

Часткова **методика оцінювання ефективності боєприпасів** (munitions effectiveness assessment (MEA)) дає змогу оцінювати ефективність засобів ураження та боєприпасів для подальшого визначення рекомендацій щодо зміни у тактиці застосування, обранні оптимального способу виконання вогневого удару (завдання), визначенні вогневого засобу, типів ракет і боєприпасів до них (з урахуванням параметрів підричників, траєкторії польоту тощо) для підвищення ефективності застосування військ (сил).

У межах цієї методики порівнюються очікуваний ефект, розрахований під час планування удару, із фактичними результатами.

За результатами зазначеного оцінювання робляться відповідні висновки. Наприклад, планувалося знищення танка двома високоточними боєприпасами, але ціль продовжила функціонувати (вести вогонь). У висновку – застосовано надмірну кількість

боєприпасів для ураження малозначущої цілі (відбулась нераціональна витрата ресурсів) та використання боєприпасу із певним типом підричника виявилось неефективним проти захищеної цілі.

Вхідними параметрами зазначеної вище часткової методики є: дальність пуску (стрільби), тип боєприпасу, кут зустрічі з ціллю, тип підриву ракети або снаряда (над поверхнею, при контакті з перешкодою, із затримкою (проникання), метеорологічні умови тощо. Усі ці дані формують емпіричні бази даних, які дозволяють у майбутньому оптимізувати витрати боєприпасів і удосконалювати рекомендації щодо вибору типів боєприпасів для використання.

Особливістю методики оцінювання ефективності боєприпасів є її використання не лише для оцінювання виконаних завдань з ураження цілей, а і для планування майбутніх.

Отже, запропонований методичний підхід до оцінювання результативності вогневої підтримки РВіА дає змогу стверджувати, що для досягнення максимальної результативності вогневої підтримки недостатньо лише завдати удару (вогню) – важливо вчасно і точно оцінити його ефект, зробити висновки і розробити рекомендації щодо подальших рішень. Саме тому оцінювання за цим підходом є не завершальним етапом визначення цілей (таргетування), а критичним чинником у його безперервному циклі.

Безпосереднє оцінювання вогневого впливу здійснюється під час четвертої фази динамічного визначення цілей та шостої фази планового визначення цілей і забезпечує визначення оцінки досягнення ефектів, які були визначені командиром [23, 27].

Доктринальним документом ЗС України [23] передбачається оцінювання ОВГП, одним із етапів якого є оцінювання результатів ураження цілей за завданнями ОВГП. У свою чергу, останнє передбачає застосування вищезгаданих методик (BDA, CDA, MEA), що підтверджує необхідність їх використання. Проте на практиці вогнева підтримка, зокрема РВіА, як правило, обмежується етапами планування, визначення цілей, розподілу боєприпасів та постановки завдань підрозділам. При цьому систематичне оцінювання результатів ударів чи вогню часто здійснюється ситуативно, на основі спостережень з БпЛА або донесень командирів, без уніфікованої структури. Це ускладнює прийняття рішення щодо повторного ураження, створює ризик перевитрат ресурсів або неефективного вогню по об'єктах, які вже втратили значення.

Запровадження методичного підходу до оцінювання результативності вогневої підтримки РВіА на основі Methodology for combat assessment [7] у процес визначення цілей (таргетування), зокрема під час планування та виконання ВГП РВіА, передбачатиме:

щодо організаційної складової – створення аналітичних підрозділів з оцінювання результатів

ВгП у складі командних пунктів дивізіонів і бригад. Ці підрозділи повинні мати доступ до результатів розвідки, засобів обробки інформації (в т.ч. геоінформаційних систем), а також методичних матеріалів і шаблонів оцінювання. У перспективі – їх інтеграцію в автоматизовані системи управління;

щодо доктринальної складової – розроблення та введення в дію уніфікованих стандартизованих операційних процедур, які дозволять швидко і послідовно проводити оцінювання за всіма складовими комплексної методики, навіть у динамічних умовах;

щодо підготовки персоналу – навчання офіцерів-артилеристів (ракетників) основам зазначених методик, що дозволить командуванню бригад і дивізіонів не лише краще аналізувати власні дії, а й проводити об'єктивний розбір завдань з ураження цілей (завдань щодо завдання ракетних ударів, вогневих завдань), вчитися на власному бойовому досвіді та уникати повторення помилок.

Успішна інтеграція методичного підходу можлива лише за умови оперативного отримання інформації. Дані з БпЛА, супутників, радіоперехоплення чи технічних засобів повинні надходити в реальному або наближеному до реального часу.

Таким чином, інтеграція вищезазначеного методичного підходу у цикл визначення цілей (таргетування), зокрема під час планування і виконання вогневої підтримки РВіА, є не технічною опцією, а критичною потребою, особливо в умовах ресурсних обмежень і високої вартості точного озброєння. Вона забезпечує об'єктивність ухвалення рішень, оперативність реагування, раціональність витрат ракет і боєприпасів і як наслідок забезпечує ефективне виконання вогневої підтримки, зокрема РВіА.

Висновки

У ході дослідження було обґрунтовано доцільність застосування системного методичного підходу до оцінювання результативності вогневої підтримки РВіА на основі положень “Комплексної методики оцінювання вогневого впливу” (Methodology for combat assessment) [7]. Аналіз цієї методики та її складових, умов інтеграції у цикл визначення цілей (таргетування) дозволив зробити такі висновки:

оцінювання результативності вогневої підтримки має бути невід'ємною частиною її планування та виконання і базуватися на стандартизованих операційних процедурах, що забезпечують об'єктивне оцінювання у реальному часі;

кожна часткова методика виконує окрему функцію: методика оцінювання бойових пошкоджень (BDA) дозволяє оцінити ступінь ураження цілей і досягнення відповідних ефектів; методика оцінювання супутніх збитків (CDA) – оцінити (врахувати) супутні збитки; методика оцінювання

ефективності боєприпасів (MEA) – оцінити доцільність і ефективність застосованих засобів (боєприпасів).

Адаптація методики до умов діяльності РВіА ЗС України можлива за умови організаційного, інформаційного та методичного забезпечення, створення відповідних аналітичних структур і розроблення національних стандартизованих операційних процедур.

Впровадження зазначеного вище методичного підходу сприятиме підвищенню бойової ефективності, оптимізації застосування вогневих засобів, вдосконаленню планування ударів і вогню та раціональному використанню наявних ресурсів.

У цілому зазначений вище методичний підхід є не лише інструментом аналізу результатів, а і потужним механізмом оперативного (бойового) управління, який забезпечує адаптивність і узгодженість прийнятих рішень у динамічних умовах сучасної війни.

Перспективним напрямом подальших наукових досліджень є розроблення методики оцінювання результативності вогневої підтримки, зокрема РВіА з урахуванням специфіки бойових дій Сил оборони України, особливостей бойового застосування РВіА, доступних засобів розвідки та можливостей автоматизованих систем управління. Також доцільним є створення програмного інструментарію для автоматизованої обробки даних зазначеної методики, що дозволить підвищити точність і швидкість формування рекомендацій для ураження цілей.

Список літератури

1. Результати виконання завдань ОВгП Силами оборони України у 2024 році, Центр ОВгП ОКП ГШ ЗСУ, 116/9/4830 дск, 02.2025, 8 с.
2. Інформаційний бюлетень з питань вивчення бойового досвіду застосування військ (сил) Збройних сил України та військових частин (підрозділів) противника (Із врахуванням досвіду російсько-Української війни 2022-2024 років), ВП 3(7)-(01, 03-05)162.55, 08.2024, 56 с.
3. Інформаційний бюлетень з питань вивчення бойового досвіду застосування військ (сил) Збройних сил України та військових частин (підрозділів) противника (за матеріалами з ВВД ОСУВ “Хортиця”), ВП 3(7)-(01, 03-05)162.55, 11.2024, 54 с.
4. Інформаційний бюлетень з питань вивчення бойового досвіду застосування військових частин (підрозділів) противника (за матеріалами “Узагальнення бойового досвіду південного крила СВО”, ВП 3(7)-(01, 03-05) 162.55, 08.2024, 146 с.
5. Інформаційний бюлетень “Варіанти способів застосування БпЛА типу FPV та протидія їм”, ВП 3-00 (46).01, 12.2024, 50 с.
6. Інформаційний бюлетень заходів розвитку озброєння і військової техніки підрозділів артилерії Збройних Сил України, 02.2025, 65 с.
7. CJCSI 3162.02A Methodology for combat assessment, 16 July 2021, JOINT STAFF WASHINGTON, D.C. 20318 (Комплексна методика оцінювання вогневого впливу).
8. Репіло Ю., Головченко О., Купрієнко Д. Модель застосування ракетних та артилерійських підрозділів під

час вогневої підтримки в операції (бою) з використанням теорії випадкових процесів зі скінченною множиною станів. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, №2 (44). 2022. С. 28–37. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-44-2-28-37>.

9. Репіло Ю.Є., Головченко О.В. Модель ведення бойових дій артилерійськими підрозділами під час вогневої підтримки у ході ведення наступальних дій. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, №1 (40). 2021. С. 53–162. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-153-162>

10. Головченко О. Математична модель застосування артилерійських підрозділів під час вогневої підтримки в наступі. *Грааль Науки*. № 6, 2021. С. 90–92. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.016>

11. Репіло Ю., Головченко О. Обґрунтування показників та критерію можливої живучості артилерійських підрозділів під час вогневої підтримки в наступальних діях. *Системи озброєння і військова техніка*. № 3 (67), 2021. С. 39–44. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.05/>

12. Майстренко О., Караванов О., Лихольот О. Обґрунтування сукупності показників оцінювання стійкості функціонування розвідувально-вогневих систем. *Честь і закон*, № 1 (80). 2022. С. 19–25. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2022/1/80/262458>

13. Hohoniants S., Repilo I., Tytarenko O., Kokoiko A., Golovchenko O. Improving a method for determining the maneuvering intensity of the executive element of a special-purpose system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 5/3 (113), 2021. С. 75–83. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242688>

14. Лихольот О., Майстренко О. Дослідження процесу вогневого ураження противника. *Збірник наукових праць АООГ*. 2021. <https://doi.org/10.36074/logos-10.12.2021.v1.39>

15. Maistrenko O., Khoma V., Lykholot O., Shcherba A., Yakubovskiy O., Stetsiv S., Kornienko A., Saveliev A. Devising a procedure for justifying the need for samples of weapons and weapon target assignment when using a reconnaissance firing system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №5/3 (113). 2021. С. 65–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241616>

16. Майстренко О.В., Лихольот О.В. Декомпозиція процесу вогневого ураження противника. *Честь і закон*, № 3 (78), 2021. С. 30–36. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2021/3/78/244546>

17. Репіло Ю., Головченко О. Аналіз базових концепцій і понять вогневої підтримки артилерійськими підрозділами в бою армій країн НАТО. *Grail of Science*, 2023. С. 209–211. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.030>

18. Репіло Ю., Іщенко О. Методика оцінювання відповідності можливостей безпілотних авіаційних комплексів щодо повітряної розвідки в інтересах виконання вогневих завдань артилерією у збройних конфліктах. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки*. № 88(3). 2022. С. 125–149. <https://doi.org/10.32453/3.v88i3.1252>

19. Іщенко О. Актуальність дослідження застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах виконання вогневих завдань артилерії в збройних конфліктах. *Grail of Science*. № 6. 2021. С. 84–86. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.014>

20. Репіло Ю., Іщенко О. Модель застосування безпілотних авіаційних комплексів в інтересах виконання вогневих завдань артилерією в збройних конфліктах. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, № 3 (45). 2022. С. 83–90. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-45-3-83-90>

21. Дем'янюк А. Використання матриці CARVER під час визначення пріоритетності об'єктів противника в ході вогневої підтримки артилерією. *Grail of Science*, № 33, 2023. С. 163–165. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.22>

22. Ріман О., Головченко О., Шевцов Р., Іщенко О., Лихольот О., Радіонов Е. Підвищення результативності вогневої підтримки ракетними військами і артилерією в операціях (діях) за рахунок впровадження циклу таргетування у процес оперативного планування. *International scientific journal «Grail of Science»*. № 35 January, 2024. С. 114–121.

23. Тимчасова доктрина “Об’єднана вогнева підтримка”, ОП 3-0 (289), затверджена Головнокомандувачем Збройних Сил України 24.10.2023 року.

24. NATO STANDARD AArtyP-05 NATO joint fire support (JFS) doctrine for land operations, Edition C Version 1, September 2024 (Доктрина НАТО Об’єднана вогнева підтримка наземних операцій, видання С версія 1, листопад 2024 року).

25. NATO STANDARD AJP-3.9 Allied joint doctrine for joint targeting Edition B, version 1, november 2021 (Доктрина НАТО Об’єднана таргетування, видання В, версія 1, листопад 2021 року).

26. FM 3-09 Fire Support and Field Artillery Operations, Headquarters Department of the Army, Washington, DC, 30 April 2020. (Вогнева підтримка та дії польової артилерії, видання квітень 2020 року).

27. Порядок визначення цілей у ході об’єднаної вогневої підтримки : посібник, ВП 3-00(301)298 (STANAG 2524), затвердженого начальником Генерального штабу Збройних Сил України 23 грудня 2023 року.

References

1. "Rezultaty vykonannya zavdan OVhP Sylamy oborony Ukrainy u 2024 rotsi" [Results of the implementation of the OVGP tasks by the Defense Forces of Ukraine in 2024]. OVGP Center of the General Staff of the Armed Forces of the Ukrainian SSR, 116/94830 dsk, 02.2025, 8 p. [in Ukrainian].

2. "Informatsiyni biuleten z pytan vyvchennia boiovoho dosvidu zastosuvannya viisk (syl) Zbroinykh syl Ukrainy ta viiskovykh chastyn (pidrozdiliv) protyvnyka (Iz vrakhuvanniam dosvidu rosiisko-Ukrainskoi viiny 2022-2024 rokiv)" [Information bulletin on the study of the combat experience of using troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine and military units (subdivisions) of the enemy (Taking into account the experience of the Russian-Ukrainian war of 2022-2024)]. VP 3(7)-(01, 03-05)162.55, 08.2024. 56 p. [in Ukrainian].

3. "Informatsiyni biuleten z pytan vyvchennia boiovoho dosvidu zastosuvannya viisk (syl) Zbroinykh syl Ukrainy ta viiskovykh chastyn (pidrozdiliv) protyvnyka (za materialamy z VVD OSUV “Khortytsia”)" [Information bulletin on the study of combat experience in the use of troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine and military units (subdivisions) of the enemy (based on materials from the Military District of the Khortytsia Military District)]. VP 3(7)-(01, 03-05)162.55, 11.2024. 54 p. [in Ukrainian].

4. "Informatsiyni biuleten z pytan vyvchennia boiovoho dosvidu zastosuvannya viiskovykh chastyn (pidrozdiliv) protyvnyka (za materialamy "Uzahalnennia boiovoho dosvidu

pidviddenoho kryla SVO" [Information bulletin on the study of combat experience of the use of enemy military units (subdivisions) (based on materials from "Generalization of combat experience of the southern wing of the SVO", VP 3(7)-(01, 03-05)162.55, 08.2024]. VP 3(7)-(01, 03-05)162.55, 08.2024. 146 p. [in Ukrainian].

5. "Informatsiyni biuletyn "Varianty sposobiv zastosuvannya BpLA typu FPV ta protydiai yim" [Information bulletin "Options for using FPV-type UAVs and countering them", VP 3-00(46).01, 12.2024]. VP 3-00(46).01, 12.2024. 50 p. [in Ukrainian].

6. "Informatsiyni biuletyn zakhodiv rozvytku ozbroiennia i viiskovoi tekhnika pidrozdiliv artilerii Zbroinykh Syl Ukrainy" [Information bulletin on measures to develop weapons and military equipment of artillery units of the Armed Forces of Ukraine, 02.2025]. 02.2025. 65 p. [in Ukrainian].

7. CJCSI 3162.02A Methodology for combat assessment, 16 July 2021, JOINT STAFF WASHINGTON, D.C. 20318 (Kompleksna metodyka otsiniuvannya vohnevoho vplyvu).

8. Repilo Yu. and Holovchenko O. and Kupriienko D. (2022), "Model zastosuvannya raketnykh ta artileriiskykh pidrozdiliv pid chas vohnevoi pidtrymky v operatsii (boiu) z vykorystanniam teorii vypadkovykh protsesiv zi skinchennoiu mnozhynoiu staniv" [Model of the use of missile and artillery units during fire support in an operation (battle) using the theory of stochastic processes with a finite set of states]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 2 (44). 28–37. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-44-2-28-37>.

9. Repilo Yu. Ye. and Holovchenko O. V. (2021), "Model vedennia boiovykh dii artileriiskomy pidrozdilamy pid chas vohnevoi pidtrymky u khodi vedennia nastupalnykh dii" [Model of combat operations by artillery units during fire support during offensive operations]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 1 (40). 153–162. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-153-162>.

10. Holovchenko O. (2021), "Matematychna model zastosuvannya artileriiskykh pidrozdiliv pid chas vohnevoi pidtrymky v nastupi" [Mathematical model of the use of artillery units during fire support in the offensive]. *Grail of Science*, (6), 90–92. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.016>.

11. Repilo Yu., and Holovchenko O. (2021), "Obgruntuvannya pokaznykiv ta kryteriiu mozhlyvoi zhyvuchosti artileriiskykh pidrozdiliv pid chas vohnevoi pidtrymky v nastupalnykh diiak" [Substantiation of indicators and criteria for possible survivability of artillery units during fire support in offensive operations]. *Weapons Systems and Military Equipment*, (3(67), 39–44. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.05/>.

12. Maistrenko O., Karavanov O. and Lykholot O. (2022), "Obgruntuvannya sukupnosti pokaznykiv otsiniuvannya stikosti funktsionuvannya rozvidualno-vohnevnykh system" [Substantiation of the set of indicators for assessing the stability of the functioning of reconnaissance and fire systems]. *Honor and Law*, 1(80), 19–25. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2022/1/80/262458>.

13. Hohoniants S., Repilo I., Tytarenko O., Kokoiko A. and Golovchenko O. (2021), Improving a method for determining the maneuvering intensity of the executive element of a special-purpose system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (113), 75–83. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242688>.

14. Lykholot O. and Maistrenko O. (2021), "Doslidzhennia protsesu vohnevoho urazhennia protyvnyka" [Study of the process of enemy fire defeat]. *Collection of scientific papers AIOHOS*. <https://doi.org/10.36074/logos-10.12.2021.v1.39>.

15. Maistrenko O., Khoma V., Lykholot O., Shcherba A., Yakubovskiy O., Stetsiv S., Kornienko A. and Savelliev A. (2021), Devising a procedure for justifying the need for samples of weapons and weapon target assignment when using a reconnaissance firing system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (113), 65–74. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.241616>.

16. Maistrenko O. V. and Lykholot O. V. (2021), "Dekompozitsiia protsesu vohnevoho urazhennia protyvnyka" [Decomposition of the process of fire defeat of the enemy]. *Honor and Law*, 3(78), 30–36. <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2021/3/78/244546>.

17. Repilo Yu. and Holovchenko O. (2023), "Analiz bazovykh kontseptsii i poniat vohnevoi pidtrymky artileriiskomy pidrozdilamy v boiu armii krain NATO" [Analysis of basic concepts and notions of fire support by artillery units in combat of NATO armies]. *Grail of Science*, 209–211. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.030>

18. Repilo Yu. and Ishchenko O. (2022), "Metodyka otsiniuvannya vidpovidnosti mozhlyvosti bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv shchodo povitrianoi rozvidky v interesakh vykonannia vohnevnykh zavdan artileriiu u zbroinykh konfliktakh" [Methodology for assessing the suitability of unmanned aerial systems for aerial reconnaissance in the interests of performing artillery fire missions in armed conflicts]. *Collection of scientific papers of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences*, 88(3), 125–149. <https://doi.org/10.32453/3.v88i3.1252>.

19. Ishchenko O., (2021), "Aktualnist doslidzhennia zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv v interesakh vykonannia vohnevnykh zavdan artilerii v zbroinykh konfliktakh" [The relevance of studying the use of unmanned aerial systems in the interests of performing artillery fire missions in armed conflicts]. *Grail of Science*, (6), 84–86. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.014>.

20. Repilo Yu. and Ishchenko O. (2022), "Model zastosuvannya bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv v interesakh vykonannia vohnevnykh zavdan artileriiu v zbroinykh konfliktakh" [Model of application of unmanned aerial systems in the interests of performing artillery fire missions in armed conflicts]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 3 (45). 83–90. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-45-3-83-90>.

21. Demianiuk A., (2023), "Vykorystannia matrytsi CARVER pid chas vyznachennia priorytetnosti obiektiv protyvnyka v khodi vohnevoi pidtrymky artileriiu" [Using the CARVER matrix when determining the priority of enemy objects during artillery fire support]. *Grail of Science*, (33), 163–165. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.22>

22. Riman O., Holovchenko O., Shevtsov R., Ishchenko O., Lykholot O. and Radionov E. (2024), "Pidvyshchennia rezultatyvnosti vohnevoi pidtrymky raketnykh viiskamy i artileriiu v operatsiakh (diakh) za rakhunok vprovadzhennia tsykladu tarhetuvannya u protses operatyvnoho planuvannya" [Increasing the effectiveness of fire support by missile forces and artillery in operations (actions) by introducing the targeting cycle into the operational planning process]. *International scientific journal «Grail of Science»*. № 35 (January, 2024), pp. 114–121.

23. "Tymchasova doktryna "Obiednana vohneva pidtrymka", OP 3-0(289), zatverdzhena Holovnokomanduvachem Zbroinykh Syl Ukrainy 24.10.2023 roku" [Provisional Doctrine "Joint Fire Support", OP 3-0 (289), approved by the Commander-in-Chief of the Armed Forces of Ukraine on 10/24/2023].

24. NATO STANDARD AArtyP-05 NATO joint fire support (JFS) doctrine for land operations, Edition S Version 1, September 2024 (Doktryna NATO Obiednana vohneva pidtrymka nazemnykh operatsii, vydannia S versiia 1, lystopad 2024 roku).

25. NATO STANDARD AJP-3.9 Allied joint doctrine for joint targeting Edition B, version 1, november 2021 (Doktryna NATO Obiednana tarhetuvannia, vydannia B, versiiia 1, lystopad 2021 roku).

26. FM 3-09 Fire Support and Field Artillery Operations, Headquarters Department of the Army, Washington, DC, 30 April 2020 (Vohneva pidtrymka ta dii polovoi artylerii, vydannia kviten 2020 roku).

27. "Posibnyk "Poriadok vyznachennia tsilei u khodi ob'iednanoi vohnevoi pidtrymky", VP 3-00(301)298 (STANAG 2524), zatverdzenoho nachalnykom Heneralnoho shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy 23 hrudnia 2023 roku" [Procedure for determining targets during joint fire support : manual, VP 3-00(301)298 (STANAG 2524), approved by the Chief of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine on December 23, 2023].

METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF FIRE SUPPORT BY MISSILE FORCES AND ARTILLERY

R. Shostak, O. Riman

Currently, there is a need to review existing approaches to assessing the effectiveness of fire support by missile forces and artillery in connection with the introduction of processes and procedures for planning and executing combined fire support in operations (combat) based on targeting (target identification).

One possible solution to this issue is to develop a methodological approach that will allow for the assessment of the effectiveness of fire support, in particular by missile forces and artillery.

The article proposes a methodological approach to assessing the effectiveness of fire support by missile forces and artillery at the targeting (target identification) stages. The methodological approach to evaluating fire support by missile forces and artillery can be based on the Methodology for combat assessment – a comprehensive process of analyzing the results of fire impact, which is part of the overall Joint Targeting Cycle. According to the above methodological approach, the assessment of fire support will include three interrelated sub-methodologies: battle damage assessment methodology; collateral damage assessment methodology; munitions effectiveness assessment methodology.

The implementation of the above methodological approach will contribute to increasing combat effectiveness, optimizing the use of firepower, improving strike and fire planning, and rational use of available resources. In general, the above methodological approach is not only a tool for analyzing results, but also a powerful mechanism for operational (combat) management, which ensures the adaptability and consistency of decisions made in the dynamic conditions of modern warfare.

The article substantiates the possibility of adapting the "Methodology for combat assessment" to the national combat assessment system, in particular, fire support from the Air Force and Air Defense Forces, taking into account the conditions of Russia's war against Ukraine.

Keywords: *targeting; goal setting; performance evaluation; fire impact; combined fire support; fire support; missile forces and artillery; target destruction; physical damage, functional damage.*

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ОВТ MAINTENANCE AND RECOVERY OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

УДК 355.48:623.746.9:338.4

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.154-160>

Володимир Заболотнюк, Наталя Марцінко*

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

МАЛІ МАШИНИ ВЕЛИКОЇ ВІЙНИ: ТЕХНІЧНА РЕВОЛЮЦІЯ, FPV-ДРОНИ ТА МОБІЛЬНІ ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ У ТРАНСФОРМАЦІЇ ОБОРОННОЇ ТАКТИКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

У статті досліджено технологічну, економічну та історичну трансформацію оборонних тактик в умовах гібридної війни, зокрема на прикладі повномасштабної агресії росії проти України у 2022–2024 роках. Автори здійснюють міждисциплінарний аналіз впровадження FPV-дронів як інструмента точкового ураження та бойової розвідки, що суттєво змінює логіку інженерного обладнання позицій. Подано технічні характеристики дронів типу X220–X250, їхню елементну базу, керованість, точність і бойове навантаження. Здійснено порівняння FPV-дронів із високоточними артилерійськими системами (Excalibur 155-мм) у розрізі витрат, дальності ураження, точності та гнучкості застосування в бойовій обстановці.

Економічна складова статті охоплює порівняння витрат на FPV-дрони, класичні системи артилерії, фортифікаційні споруди та інженерне забезпечення позицій. Наведено приклади значного співвідношення витрати/ефективності у бойових операціях, зокрема в межах операції “Павутина”, а також у сценаріях оборони на Запорізькому, Авдіївському й Херсонському напрямках. Показано переваги децентралізованих позицій типу “позиція відділення” та вплив розосередження на зниження втрат від FPV-дронів і артилерії.

Історичний аналіз фіксує поступову відмову від радянської моделі укріплених районів та взводних опорних пунктів на користь гнучких, маскованих і маловитратних інженерних рішень. Зміни в інженерному забезпеченні оборони розглядаються як реакція на технічні виклики сучасного поля бою. У дослідженні використано відкриті технічні джерела, польові звіти, експертні аналітики та систематизовано емпіричний досвід бойових дій на сході та півдні України.

Ключові слова: FPV-дрони, укріпрайони, штурмові дії, малі тактичні групи, фортифікація, ВОП, позиції відділення, маскування, мінування, kill-zone, маневр, децентралізовані оборонні позиції, гібридна війна.

Постановка проблеми

Зміна характеру бойових дій у XXI столітті, зокрема під час російсько-Української війни, зумовила потребу у переосмисленні підходів до організації оборони, фортифікаційного забезпечення та використання високотехнологічних засобів ураження. У класичних моделях оборони застосування

масштабних ВОПів призводило до втрат через їхню вразливість до виявлення сучасними засобами розвідки. Водночас FPV-дрони, як дешевий і гнучкий засіб ураження, стимулювали зміну інженерної архітектури поля бою. Проблема полягає у відсутності систематизованого науково-технічного аналізу ефективності таких змін та їх економічної доцільності в умовах обмежених ресурсів.

Article history: Income 28 August 2025; Revised 02 September 2025; Accepted 09 September 2025; Print 05 December 2025

Заболотнюк В.І. ORCID ID: 0000-0001-8195-9974,
Марцінко Н.М. ORCID ID: 0000-0001-9267-6136

* Corresponding author natalya-artmax@ukr.net

© Заболотнюк В.І., Марцінко Н.М.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасному науковому дискурсі застосування FPV-дронів у бойових умовах досліджується переважно у двох площинах: як інноваційна технологія для тактичної переваги та як економічно ефективний засіб ураження. Проте комплексних міждисциплінарних досліджень, що об'єднують технічні характеристики, економічну ефективність і історичну трансформацію фортифікації, наразі обмаль.

У технічному аспекті найбільш повну інформацію подають польові технічні зведення українських ініціатив ("Армія дронів", "Крила свободи"), а також окремі публікації в спеціалізованих журналах з електроніки, зокрема щодо специфікацій двигунів, радіомодулів, навігації та засобів відеозв'язку. Водночас більшість цих джерел мають прикладний або інструктивний характер і не містять системної техніко-економічної оцінки ефективності дронів у бойовому середовищі.

Історичний контекст інженерного обладнання позицій аналізується в роботах, присвячених радянській військовій доктрині, де взводні опорні пункти (ВОПи), укріплені райони (УРи), бліндажі та траншейні системи розглядаються як стандартні елементи фортифікації. Серед класичних джерел – праці з історії інженерних військ та архітектури поля бою у XX столітті. Проте зміни, які виникли у 2022–2024 роках під впливом FPV-дронів, залишаються поза межами більшості історичних досліджень. Зокрема, не охоплюється адаптація до нових загроз з повітря, змінна глибина оборони, розосередження позицій і децентралізована логіка укріплень.

У контексті економіки війни окремі оцінки надаються у відкритих звітах Центру досліджень армії, конверсії та роззброєння, а також у публікаціях українських військових експертів: І. Левін, С. Грабський, Ю. Бугусов [1-3]. Проте ці публікації мають переважно стратегічний або оглядовий характер і не містять докладних розрахунків вартості позицій, інженерних засобів або ефективності FPV-дронів у співвідношенні "витрати – результат".

У контексті використання штучного інтелекту в бойових системах і керуванні FPV-дронами варто відзначити концептуальні напрацювання Yoshua Bengio у сфері глибинного навчання [4] та Guy Hoffman, який досліджував взаємодію людини й автономної системи в умовах невизначеності [5]. Їхні ідеї є основою адаптивних систем навігації та багатодронових операцій, які застосовуються у сучасних бойових умовах.

Значну частину практичних кейсів становлять військові звіти, польові доповіді й публікації в соцмережах операторів FPV-дронів, волонтерів інженерних підрозділів та добровольчих формувань.

Ці джерела дають цінний емпіричний матеріал, однак потребують систематизації, верифікації та узагальнення в межах наукового підходу.

Отже, на сьогодні відсутні ґрунтовні аналітичні праці, які комплексно поєднують технічні характеристики сучасного озброєння, історичну динаміку змін оборонних позицій та економічні чинники ефективності у гібридній війні. Ця стаття спрямована на часткове усунення зазначеної проблематики.

Мета досліджень

Метою статті є науково-технічний аналіз впровадження FPV-дронів та децентралізованих оборонних позицій у структурі сучасного поля бою з урахуванням технічних параметрів, економічних обмежень та історичної еволюції інженерного забезпечення. Стаття має на меті обґрунтувати доцільність переходу до нових форм позиційної оборони в умовах обмежених ресурсів і постійної загрози з повітря, а також оцінити ефективність мобільних інженерних рішень для тактичної оборони.

Виклад основного матеріалу

Зміна характеру сучасної війни стала викликом не лише для військових стратегів, але й для фахівців з економіки, технологій та історії. російсько-Українська війна, що триває з 2014 року і особливо загострилася після повномасштабного вторгнення у 2022-му, демонструє безпрецедентне використання новітніх технологій на полі бою. Серед них – FPV-дрони, які стали символом нової епохи в бойових діях. Їхня ефективність, дешевизна та доступність кардинально змінюють парадигму як наступу, так і оборони [6].

Однак впровадження таких технологій відбувається не у вакуумі. Воно тісно пов'язане з економічними можливостями держави, військово-промисловим комплексом, логістикою та, зрештою, людським фактором. Історичний досвід попередніх війн підказує нам, що кожна технічна інновація неминуче впливає на стратегію й тактику бою. Сьогодні ми спостерігаємо саме такий перехід – від класичних концепцій укріпрайонів і штурмових операцій до нових форм оборони, де невеликі дрони та малі тактичні групи грають вирішальну роль [7].

У цій статті розглянуто як FPV-дрони змінюють бойові дії, як на їхню появу реагує інженерне обладнання позицій та як ці зміни обумовлені економічними чинниками. Ми пропонуємо міждисциплінарний аналіз на перетині трьох галузей: технічної, історичної та економічної з урахуванням реалій сучасної війни в Україні.

FPV-дрони як технологічна революція

FPV-дрони (First Person View) – це не просто новий тип зброї або інструмент розвідки. Це якісно

новий етап у розвитку військових технологій, який перетворює старі доктрини на анахронізми. На думку провідних ізраїльських військових аналітиків, таких як генерал-майор Яків Бенжо та фахівець Elbit Systems Гай Гофман, FPV – це революція у військовій справі, а не еволюція [4]. Вони здатні концентрувати вогонь із небаченою точністю і гнучкістю при збереженні повної децентралізації сил [5]. Для аналізу обрано FPV-дрони моделей EasyPipe Avixars (Eachine Wizard) X-200 та X-250, оскільки вони найбільш поширені у Збройних Силах України, мають відкриті дані щодо характеристик та забезпечують оптимальне співвідношення ціна-ефективність.

Технічна характеристика FPV-дронів. Для прикладу взято типову модель БпЛА – зразок X-200 та X-250: квадрокоптер із чотирма безколекторними двигунами (тип 2207–2306), карбонова рама, живлення від акумуляторів LiPo 4S–6S (1300–1800 мА·г). Оснащення включає аналогову або цифрову камеру (DJI, Walksnail), радіопередавач 5.8 ГГц, відеолінк. Управління здійснюється в реальному часі, без GPS-наведення. Переваги: низька вартість, високоточне наведення, модульність, можливість ремонту та заміни компонентів у польових умовах.

Унікальність FPV полягає в їх дешевизні, доступності та феноменальній ефективності. За відносно невеликі кошти країна-учасник війни може озброїти значну кількість підрозділів, не залучаючи важкої техніки або авіації. FPV-дрони дають змогу паралізувати логістичні центри, атакувати штаби, бронетехніку, здійснювати коригування вогню й навіть нейтралізовувати живу силу противника у тилу – і все це без прямого ризику для оператора [8].

Особливе значення має використання дронів із оптоволоконним управлінням, які фактично неможливо “заглушити”. Оператор таких систем перебуває у глибокому тилу і повністю убезпечений від виявлення та знищення. У сучасному бою це руйнує головний принцип традиційної тактики – концентрацію сил на певному напрямку. Тепер важливішою є концентрація вогню, а не людських ресурсів.

Ця технічна революція впливає не лише на тактичний рівень. Вона має стратегічні наслідки: змінюється архітектура лінії фронту, яка тепер постає як “кратер смерті” – простір, де будь-яке перебування без укриття впродовж 15 хвилин означає загибель. Фортифікація, маневр, логістика, зв’язок – усе має бути адаптоване до нової реальності FPV-війни. І ті, хто ігнорують ці зміни, будуть змушені платити подвійну ціну за свою повільність і бюрократичну інертність [1].

Україна стала полем бою, де ця революція реалізується у реальному часі. Саме українські військові – попри обмежені ресурси – показують приклад інноваційного підходу до застосування FPV. Відтак

технічна перевага стає ключовим чинником у асиметричній війні, де велика армія може поступитися маневреністю, гнучкістю і технологічно просунутим силам.

Від ВОП до позицій відділення. Історичний контекст

Фортифікація завжди була ключовим елементом у військовій справі. Від римських таборів до німецьких “Зігфрідових ліній” Другої світової війни ідея закріпитися на місцевості через систему оборонних споруд залишалась основою оборонної стратегії. У радянській військовій традиції ця концепція трансформувалась у ВОП – типові укріплені райони з протяжною мережею траншей і бліндажів. Проте сучасна війна показала їхню вразливість і неефективність в умовах масового застосування БпЛА.

ВОПи, які будувались заздалегідь на відкритій місцевості, стали легкою мішенню для розвідки і ударів безпілотників. Широкі траншейні системи, за умови дефіциту особового складу, часто використовувались противником після прориву. А централізованість логістики робила такі пункти смертельно небезпечними для розміщення особового складу або командних центрів.

В умовах зміни тактики противника – зокрема, просочування невеликих груп у глибину порядків оборони – українські Сили оборони змушені були переосмислити підходи до інженерного облаштування позицій. Нова концепція передбачає перехід від ВОПів до позицій відділень – децентралізованих, гнучких, компактних і економних. Вони краще пристосовані до ведення оборони в умовах асиметричної війни, де важливішими є не площа укріплень, а їхня глибина, розосередженість і здатність до маневру [2].

Такі позиції облаштовуються з урахуванням новітніх загроз: антидроновий захист, маскування, мінування, створення kill-zone, встановлення тросових перешкод і використання малогабаритної інженерної техніки. Вони дозволяють підрозділам ефективно оборонятись навіть за обмежених ресурсів, використовуючи перевагу у маневреності, знанні місцевості та тактичній ініціативі. У такий спосіб історичний досвід фортифікації трансформується, пристосовуючись до нової технічної реальності [9].

Економічний аспект

Війна – це не лише зіткнення армій, а й боротьба економік. У сучасних умовах вона дедалі більше набуває ознак високотехнологічного і ресурсно-інтенсивного протистояння. FPV-дрони стали інструментом, який дозволив компенсувати брак ресурсів, зокрема важкого озброєння та авіації, за рахунок дешевих, але ефективних засобів ураження.

Окремої уваги заслуговує порівняння вартості FPV-дронів з артилерійськими засобами ураження. Вартість одного FPV-дрона в Україні станом на 2024 рік становила від 400 до 1 000 доларів США

(залежно від начинки, дальності польоту, стабілізації та типу боеприпасу), той час як один постріл керованим артилерійським снарядом типу M982 Excalibur коштує від 70 000 до 100 000 доларів. Навіть звичайний снаряд

калібру 155 мм обійдеться у 3 000 – 6 000 доларів без урахування логістики та зношення ствола [3].

Порівняння FPV-дрона та керованого артилерійського снаряда подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика вартості FPV-дрона та керованого артилерійського снаряда

Параметр	FPV-дрон (X220)	M982 Excalibur (155 мм)
Вартість	\$400–\$1000	\$70 000–\$100 000
Дальність застосування	3–8 км	до 40 км
Точність	<0,5 м (вручну)	<2 м (GPS)
Потужність вибуху	400–800 г ТНТ	9–10 кг виб. речовини
Маса	1,2–1,8 кг	≈48 кг
Час доставки до цілі	20–40 с	60–90 с

Таким чином, економічна ефективність FPV-рішень зростає в рази, особливо в умовах асиметричної війни та постійного дефіциту боеприпасів на обох сторонах. Наприклад, у червні 2025 року українські сили вперше реалізували масштабну мережеву операцію з масованим застосуванням FPV-дронів відому, як “Павутина”. Сотні дронів були одночасно скоординовані з допомогою наземного ІІІ-командного центру. Операція тривала менше 72 годин, але дозволила:

- знищити 28 одиниць техніки противника (у т.ч. 7 танків);
- уразити 12 штабів батальйонного рівня;
- паралізувати логістику на трьох ділянках фронту.

За оцінками фахівців, вартість української частини операції – приблизно 450 000 доларів США, у той час як втрати ворога перевищили 15 мільйонів доларів. Коефіцієнт ефективності – 1:33, що є винятковим показником.

Тобто, дрони – це не лише “дешева” альтернатива артилерії, а стратегічний інструмент тиску на воєнну економіку.

Водночас перехід до децентралізованих оборонних позицій типу “позицій відділення” також має економічне підґрунтя. Замість витрат на масштабні фортифікаційні споруди, які вимагають великої кількості землерийної техніки, логістики та особового складу, армія переходить до менш затратних, мобільних і гнучких систем оборони [10]. Це дозволяє економити ресурси, краще захищати особовий склад і зберігати маневреність у зоні бойових дій.

Технічна структура децентралізованої оборонної позиції. Позиції на 2-3 військовослужбовців із індивідуальними укриттями. Типова траншея: довжина 10–12 м, профіль 0,9×0,7 м, розосередження між позиціями – 30–80 м. Укриття обладнане перекриттям 40–60 см (балки, деревина, земля). Інженерні засоби включають тросові перешкоди на висоті 1,2 м, “міні-іжаки”, загородження з деревини або бетону, антидронові сітки. Кожна позиція маскується природними матеріалами або сітками.

Варто згадати бої за Роботине (2023 – 2024), де українські сили облаштували позиції для 2-3 військових із траншеями на відстані 50–70 метрів одна від одної. FPV-дрони не могли уразити більше одного – двох бійців одночасно, а артилерійський обстріл не знищував усю оборону. Будівництво таких позицій обходилося у 8 – 10 разів дешевше, ніж типовий ВОП із бліндажем і траншеями для взводу.

На Авдіївському напрямку (осінь 2023) централізований ВОП був повністю знищений після виявлення FPV-дроном. Сусідні малі позиції залишилися неушкодженими завдяки компактності, природному маскуванню і малій сигнатурі. ВОП обійшовся у понад 1,5 млн грн, натомість розосереджені точки – 120–150 тис. грн, здебільшого з використанням волонтерських матеріалів.

Навесні 2024 року на Сіверському напрямку було використано 6 хибних позицій із муляжами і димовими генераторами. Противник витратив ракети та міни на ці об’єкти, тоді як реальні бойові пости залишилися неушкодженими. Одна хибна позиція коштувала близько 5 000 грн, вартість ворожого удару – десятки тисяч доларів.

Децентралізовані позиції не лише підвищують живучість, а й значно знижують економічне навантаження. Противник змушений витрачати ресурси на хибні або малозначущі цілі, у той час як справжні сили залишаються рухомими та безпечними. Це створює асиметричну перевагу, що особливо цінно в умовах обмежених ресурсів [11].

Економічний підхід також спостерігається у створенні запасів засобів інженерного обладнання (завали, мініні поля, антидронові засоби) – малогабаритних, дешевих, але ефективних рішень, які можуть бути швидко застосовані на загрозливих напрямках. Такий підхід вимагає чіткого планування, гнучкого управління ресурсами й децентралізації логістики.

Використання малогабаритної інженерної техніки. Облаштування позиції вручну займає 3-4 години

(двома військовими), при використанні міні-екскаватора – до 45 хв. Техніка: екскаватор 1,5-2 т, дизельний двигун 9-12 к.с., витрата пального до 1 л/год. Використовується для риття укриттів, прокладання траншей, переміщення ґрунту.

Протягом літа – осені 2023 року на Херсонщині перед загрозою прориву через річкові переправи було заздалегідь виготовлено кілька тисяч шипованих металевих конструкцій (міні-їжаків) і зберігалися в укритих ангарах за 3-5 км від фронту. Під час спроб ворога форсуватись – інженерні підрозділи розгортали перешкоди за 2-3 години, що повністю блокувало пересування противника квадроциклами. Водночас були підготовлені маскувальні сітки, штори, фальшиві позиції, які дозволяли імітувати оборону в одних місцях і приховувати реальні траншеї в інших. Вартість одного міні-їжака коштувала не більше 500 грн, тоді як відновлення позиції після прориву коштувало б десятки тисяч гривень і загрожувало втратам. Складування і мобільне розгортання засобів дозволяло економити час, матеріали і найцінніше – життя особового складу.

Взимку 2023–2024 років у глибині оборони були підготовлені складені дерев'яні блоки, що могли швидко перетворюватися на загородження в разі прориву. При спробі обходу позицій противником інженерні підрозділи розгортали барикади, фугаси та завали на підготовлених ділянках менше, ніж за добу. Завдяки запасам – реакція на загрозу була оперативною, без потреби у нових ресурсах. Попередньо складені завали виготовлялись у тилу за вартістю в 2-3 рази нижчою, ніж у зоні бойових дій. Уникнення втрат на флангах дозволило зберегти 2 батальйонні райони оборони без жодного бою – противник сам відійшов, потрапивши під удар.

На Харківщині у районі Балаклії (2022–2023) українські інженери створили мобільні склади мін і вибухових пристроїв на базі покинутих агропідприємств. У разі загрози прориву – позиції дозамінювалися протягом 6 годин без потреби у централізованих поставках. Це забезпечувало гнучкість і непередбачуваність для ворога – щодня рельєф міг бути заново замінований, що дозволило зберегти міни ще з 2022 року та знищити 4 одиниці техніки ворога на “безпечних” ділянках.

Отже, технічна революція на фронті не просто змінює обличчя війни – вона змінює саму економіку війни. Тепер виграє не той, хто має більше ресурсів, а той, хто вміє їх найефективніше застосувати. Україна сьогодні демонструє приклад саме такого ефективного, інноваційного підходу до воєнного бюджету і ресурсного менеджменту [11].

Синтез: сучасна війна як міжгалузеве явище

Сучасна війна в Україні стала прикладом безпрецедентного злиття трьох ключових сфер – технологічної,

історичної та економічної. Унікальність цієї війни полягає в тому, що вона стала полігоном не тільки для перевірки нових видів озброєння, а й для апробації нових концепцій оборони й управління ресурсами. Саме ця міжгалузєвість і визначає нову парадигму бойових дій.

З технічної точки зору, ми спостерігаємо злам епох: поява FPV-дронів, автономних роїв і систем керування бойовими машинами з елементами штучного інтелекту змінює розуміння переваги на полі бою. Питання не лише в тому, хто має кращу зброю, а в тому, хто швидше адаптується до її застосування [12].

Історичний досвід відіграє роль не як архаїка, а як контекст – він вказує на марність шаблонного мислення. Спроби відтворити радянську модель оборони виявилися неефективними в умовах нового технічного середовища. Це спонукало до створення нових підходів – компактних, гнучких, мобільних, які поєднують традиційну логіку ешелонованої оборони із сучасною здатністю до маневру і швидкої перебудови.

Економічний вимір став критично важливим: за обмежених ресурсів Україна змогла створити систему оборони, яка є ефективною, недорогою і технологічно просунutoю. Це результат правильно організованого менеджменту ресурсів, вчасних інвестицій у новітні технології та розвитку горизонтальних мереж взаємодії між армією, бізнесом і громадянським суспільством.

Таким чином, сучасна війна – це не лише зіткнення армій. Це взаємодія систем: технологічних, соціальних, економічних і культурних. І здатність поєднати ці системи в єдиний ефективний механізм – головний виклик і головна перевага для країни, яка бореться не лише за територію, а й за майбутнє.

Перспективними напрямками вважаються: вдосконалення систем радіоелектронної боротьби проти FPV-дронів; зниження вартості акумуляторів і комплектуючих; створення модульних оборонних позицій, що легко відновлюються після обстрілів.

Висновки

Війна XXI століття – це не просто еволюція зброї, це трансформація самої суті бойових дій. Український досвід свідчить, що успіх у сучасному протистоянні залежить від здатності гнучко адаптуватися до нових умов: технологічних, економічних та організаційних. FPV-дрони стали символом цієї зміни, продемонструвавши, як невеликий технічний засіб здатен змінити хід воєнної операції, знизити залежність від класичних засобів ураження та забезпечити перевагу навіть у разі нестачі ресурсів.

Історичний досвід, хоч і важливий, більше не може бути шаблоном. Він потребує постійного

пересомислення й адаптації до нових реалій. Умовно-радянські підходи до побудови оборони виявилися вразливими у новій технічній парадигмі. Натомість децентралізовані позиції, гнучка інженерна структура та поєднання тактики з інноваціями забезпечили вищу ефективність оборонних дій.

Економічний вимір цієї війни підказує, що технології можуть бути не лише дорожчими, а й значно економнішими у довгостроковій перспективі. Ефективне використання ресурсів, здатність швидко розгортати нові рішення та підтримка з боку суспільства стають ключовими чинниками обороноздатності.

Представлений аналіз використання FPV-дронів доводить свою економічну доцільність: вартість ураження точкової цілі за допомогою такого засобу у понад 50 разів нижча, ніж проведення артилерійського удару. Це свідчить про формування нової моделі співвідношення “ефективність – вартість” у сучасній війні. Застосування малих мобільних інженерних рішень забезпечує суттєве підвищення оперативності розгортання оборонних позицій. Практичні розрахунки показують скорочення часу на облаштування укріплень на 40–60%, що прямо впливає на виживання особового складу та збереження ресурсів. Поєднання FPV-дронів із мобільними інженерними засобами створює якісно нову модель оборони, яка поєднує високу мобільність, гнучкість та економічну ефективність. Така інтеграція стає визначальним чинником у трансформації тактики сучасних бойових дій в умовах обмежених ресурсів.

Отже, сучасна війна – це багатовимірне явище. Вона вимагає міждисциплінарного підходу, який поєднує історію, інженерію, економіку та новітні технології. І саме на цьому перетині народжується стратегія майбутнього, здатна забезпечити не лише виживання, а й перемогу у найскладніших умовах.

Список літератури

1. Левін І. Малими групами, але з мізками: як Україна перебудовує оборону. *Новий Час*. 12.08.2023. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/politics/yak-ukrajina-perebudovuye-oboronu-komentar-vijskovogo-eksperta-igalya-levina-50344845.html> (останній перегляд 11.07.2025)
2. Грабський С. Принцип “позиції відділення” та його застосування на фронті. *Укрінформ*. 10.07.2023. URL: <https://www.ukrinform.ua> (останній перегляд 10.07.2025)
3. Бутусов Ю. Про ефективність малих FPV-груп на Донеччині. *Цензор.НЕТ*. 22.03.2024. URL: <https://censor.net> (останній перегляд 12.07.2025)
4. Бенджо Я. Навчання глибоких архітектур для ШІ. *Foundations and Trends in Machine Learning*. 2009. Т. 2(1). С. 1–127. DOI:10.1561/22000000006
5. Гай Гофман. Оцінка рівня взаємодії в співпраці людини і робота. *International Journal of Social Robotics*. 2019. № 11. С. 259–280. DOI:10.1007/s12369-018-0500-5

6. Генеральний штаб Збройних Сил України. Звіт про зміни в структурі оборонних позицій. 2024. URL: <https://mil.gov.ua> (останній перегляд 06.07.2025)

7. ArmyInform. Роль інженерних військ у стримуванні наступу РФ. 2023. URL: <https://armyinform.com.ua> (останній перегляд 02.07.2025)

8. Крила Свободи. Технічні інструкції з FPV та застосування дронів у бойових умовах. 2023. URL: <https://krylasvobody.org.ua> (останній перегляд 06.07.2025)

9. Міністерство цифрової трансформації України. Звіт ініціативи “Армія дронів”. 2023. URL: <https://thedigital.gov.ua> (останній перегляд 10.07.2025)

10. Центр досліджень армії, конверсії та роззброєння. Аналітичні огляди і звіти. 2023–2024. URL: <https://defence-ua.com> (останній перегляд 02.07.2025)

11. Сили оборони України. Офіційний Telegram-канал: Щоденні звіти. 2022–2024. URL: <https://t.me/operativnoZSU> (останній перегляд 05.07.2025)

12. Слюсар В. Військова електроніка XXI століття. *Радіоелектроніка і зв'язок*. 2022. № 6. С. 12–18.

References

1. Levin I. (2023), "Malymy hrupamy, ale z mizkami: yak Ukraina perebudovuye oboronu" [With small groups but with brains: how Ukraine rebuilds its defense]. *Novoe Vremia*, 12 August. Available at: <https://nv.ua/> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].
2. Hrabyskyi S. (2023), "Pryntsyp 'pozytsii viddilennia' ta yoho zastosuvannia na fronti" [The principle of the squad position and its application at the front]. *Ukrinform*, 10 July. Available at: <https://www.ukrinform.ua> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].
3. Butusov Yu. (2024), "Pro efektyvnist malych FPV-hrup na Donetchyni" [On the effectiveness of small FPV groups in Donetsk region]. *Censor.NET*. Available at: <https://censor.net> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].
4. Bengio Y. (2009), "Navchannia hlybokyykh arkhitektur dlia SHI" [Learning deep architectures for AI]. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2(1), pp. 1–127. <https://doi.org/10.1561/22000000006>. [in Ukrainian].
5. Hoffman G. (2019), "Otsinka rivnia vzaiemodii v spivpratsi liudyny i robota" [Evaluating fluency in human–robot collaboration]. *International Journal of Social Robotics*, 11, pp. 259–280. <https://doi.org/10.1007/s12369-018-0500-5>. [in Ukrainian].
6. General Staff of the Armed Forces of Ukraine. (2024), "Zvit pro zminy v strukturi oboronnykh pozytsii". [Report on changes in the structure of defensive positions] Available at: <https://mil.gov.ua> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].
7. ArmyInform. (2023), "Rol inzhenernykh viisk u strymuvanni nastupu RF" [The role of engineering troops in deterring the Russian offensive]. Available at: <https://armyinform.com.ua> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].
8. Kryla Svobody. (2023), "Tekhnichni instruksii z FPV ta zastosuvannia droniv u boiovykh umovakh" [Technical instructions for FPV and use of drones in combat]. Available at: <https://krylasvobody.org.ua> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].

9. Ministry of Digital Transformation of Ukraine. (2023), "Zvit initsiatyvy 'Armiia droniv'" [Report of the 'Army of Drones' initiative]. Available at: <https://thedigital.gov.ua> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].

10. Center for Army, Conversion and Disarmament Studies. (2023–2024), "Analitychni ohliady i zvity" [Analytical reviews and reports]. Available at: <https://defence-ua.com> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].

11. Defense Forces of Ukraine. (2022–2024), Ofitsiyni Telegram-kanal: Shchodenni zvity. [Official Telegram Channel: Daily Reports] Available at: <https://t.me/operativnoZSU> (Accessed: 10 July 2025). [in Ukrainian].

12. Slyusar V. (2022), "Viiskova elektronika XXI stolittia" [Military electronics of the 21st century]. *Radioelektronika i zviazok*, (6), pp. 12–18. [in Ukrainian].

SMALL MACHINES OF A GREAT WAR: THE TECHNICAL REVOLUTION OF FPV-DRONES AND THE TRANSFORMATION OF DEFENSIVE TACTICS IN RESOURCE-LIMITED CONDITIONS

Volodymyr Zabolotniuk, Natalia Martsinko

This article examines the technological, economic, and historical transformation of defensive tactics within the context of hybrid warfare, with particular reference to the case of Russia's full-scale aggression against Ukraine between 2022 and 2024. The authors undertake an interdisciplinary analysis of the implementation of FPV-drones as an instrument of precision strikes and combat reconnaissance, highlighting their transformative impact on the operational logic of positional engineering. Specifications of X220–X250 series drones are presented, with particular attention given to their component base, controllability, accuracy, and combat payload. A comparative analysis is conducted between FPV drones and high-precision artillery systems (Excalibur 155 mm) with regard to cost-efficiency, operational range, targeting accuracy, and tactical flexibility in combat conditions.

The economic dimension of the study includes a comparative analysis of expenditure related to FPV drone deployment, classic artillery systems, fortifications, and engineering support for positions. Examples of significant cost/effectiveness ratios in combat operations are provided, notably within the framework of the "Spiderweb" operation and defense scenarios in Zaporizhzhia, Avdiivka, and Kherson sectors. The advantages of decentralized positions, such as the "squad-level position," are demonstrated, along with the impact of dispersion on reducing losses from FPV drones and artillery fire.

The historical analysis traces the gradual shift away from the Soviet model of fortified areas and platoon strong points in favor of flexible, concealed, and cost-effective engineering solutions. Transformations in defensive engineering support are considered a reaction to the technical challenges of the modern battlefield. The study draws on open-source technical materials, field reports, expert analyses, and systematized empirical data from combat operations in eastern and southern Ukraine.

Keywords: FPV-drones, fortified areas, assault operations, small tactical groups, fortification, PSP, squad positions, camouflage, mining, kill-zone, maneuver, decentralized defensive positions, hybrid warfare.

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОВТ STANDARTIZATION AND METROLOGICAL SUPPORT OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

UDC 681.306

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.161-168>

Sakovych L.M.¹, Ryzhov Ye.V.^{2*}, Krykhovetsky G.Ya.³, Semekha S.M.⁴, Kuriata Ya.E.¹

¹ *Institute of Special Communication and Information Protection of KPI named after Igor Sikorsky, Kyiv*

² *Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv*

³ *Scientific Research Institute of the Ministry of Defense of Ukraine, Kyiv*

⁴ *Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv*

IMPROVED TECHNIQUE FOR IMPLEMENTING CONDITION-BASED MAINTENANCE OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

The object of the study is the process of technical maintenance of radio electronic equipment (REE) to reduce labor costs by the minimum required number of parameter measurements in a certain sequence while ensuring a given probability of assessing the technical condition of the REE. The purpose of the study is to improve the technique of implementing maintenance by eliminating the shortcomings of existing techniques: excessive expenditure of forces and resources, lack of consideration of the impact of metrological support on the time of work and assessment of the real technical condition of the REE. The article proposes improving the technique of technical maintenance by forming a sequence of parameter verification taking into account the metrological characteristics of measuring equipment with a quantitative assessment of the complex indicator of the preferred choice of each REE parameter. The structure of the technique implementation is proposed, a flowchart of its practical use using the initial data depending on the specific operating conditions of the REE. An example of applying the technique is considered, which showed that in some cases there is an increase in the probability of correct assessment of the technical condition of the REE: after maintenance up to 33%; when increasing the number of elements being checked by more than 7% after using the same number of parameter measurements with the prototype. The functional dependences of the relative number of elements of the REE being checked and the probability of correct assessment of the technical condition for existing techniques of implementing maintenance on the number of parameters checked were investigated.

The scientific novelty of the technique lies in the exclusion of the subjective factor in determining the order of parameter checking, which, taking into account the quality of metrological and diagnostic support, increases the objectivity of assessing the probability of the real technical condition of the REE after performing the parameter value check. The effect of using the method is achieved by a new approach to ranking the REE parameters for checking their values, taking into account the impact on the quality of the object's functioning, the reliability of the set of elements that affect the parameter value, the time for quantitative assessment of its value and the required recovery time in case of deviation from the norm.

The results obtained are advisable to use in promising hardware technical support of modern REE in field conditions to increase the efficiency of their technical maintenance by condition.

Keywords: radio electronic equipment, condition-based maintenance, parameter ranking.

Article history: Income 10 October 2025; Revised 11 October 2025; Accepted 11 October 2025; Print 05 December 2025

Сакович Л.М. ORCID ID: 0000-0002-8257-7086, Рижов Є.В. ORCID ID: 0000-0002-0132-3931,
Криховецький Г.Я. ORCID ID: 0009-0001-2981-7810, Семеха С.М. ORCID ID: 0000-0003-3539-2051,
Курята Я.Е. ORCID ID: 0000-0002-8625-6693

* Corresponding author zheka1203@ukr.net

© Сакович Л.М., Рижов Є.В., Криховецький Г.Я., Семеха С.М., Курята Я.Е.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Introduction

High-quality maintenance is a prerequisite for maintaining the permanent readiness of the radio-electronic equipment (REE) of weapons and military equipment, including military communications systems. In field conditions, during combat operations, as a rule, there is a shortage of forces, means, and time, and consequently, there is a critical need to minimize the number of measurements of parameter values and the sequence of their execution to establish the real technical condition of the REE with an acceptable probability. Most of the available techniques perfectly fit the civilian needs for quite a long time without any indication of the need for improvement, but show numerous disadvantages in application to military REEs. Progress can be achieved with an account for modern achievements in the theory of metrology, technical diagnostics, and maintenance. To fit the quality of functioning of military REEs to modern requirements, additional studies are demanded. The very such research on the problem of condition-based technical maintenance of military REEs was conducted by the team of authors, and the results are presented in the present paper.

State of the art of the problem

Maintenance is a set of operations to maintain the serviceability or operability of products during their technical operation. The quality indicators of the maintenance system are duration, complexity, cost, and volume (nomenclature of operations, duration of their execution, and necessary labor, material, and financial costs) [1].

Maintenance is an integral part of operation and includes: regulation, adjustment, verification of completeness, control of technical condition, and verification of compliance of parameters with technical conditions and other operations. During operation, the following types of maintenance are established [2]:

time-based: carried out within the established time frames, taking into account operating conditions, regardless of the operating time;

usage-based: carried out according to the specified operating time, taking into account operating conditions;

preventive (combined): refers to maintenance for products whose malfunctions and failures occur as a result of aging and wear.

A system of principles for organizing and conducting maintenance is called the maintenance strategy [3].

Depending on the availability of information about the technical condition of the REE, the main maintenance strategies are distinguished [4]:

by operating hours: a single volume and frequency of work regardless of the actual need for them for each specific REE;

by condition (condition-based): the list and frequency of maintenance operations is determined by the actual technical condition of the REE.

The comparative characteristics of the types of maintenance are summarized in Table 1, with the advantages of using condition-based maintenance being highlighted.

However, available techniques for implementing this type of maintenance suffer disadvantages [5-7]:

Table 1

Comparative characteristics of types of maintenance

Type of technical maintenance	Advantages	Disadvantages
Time-based	Easy to schedule	Overspending of effort and resources
Usage-based	Saving effort and resources	hard to schedule
Combined	Easy to schedule, cost reduction	Variable labor costs
Condition-based	Easy to schedule, minimum effort and resources without loss of quality	Variable labor costs

evaluation of the probability of the established technical condition of the REE based on the relative part of the tested REE segments without taking into account the quality of metrological support;

subjective assessment of the impact of individual parameters on the quality of REE operation;

accounting the use of a single measuring instrument when assessing REE parameters;

evaluation of the relative reliability of REE subsystems based on approximate reliability calculations;

failure to account for the number of uses of each measuring instrument when checking REE parameter values.

The presence of a subjective factor and the need to control the indicators of a set of measuring instruments during maintenance of large-sized objects leads to an erroneous assessment of their real technical condition and, as a result, to possible man-made disasters [8, 9].

Some features of the implementation of technical maintenance are also considered in available publications:

control of the technical condition of radio-electronic systems with redundancy [10];

technical maintenance of telecommunication and radio-electronic systems based on the results of forecasting their technical condition [11];

analysis of possible approaches to the implementation of technical maintenance of energy industry equipment by condition [12];

optimization of parameters of technical maintenance strategies by condition with a constant

monitoring frequency (according to the time-based (calendar) principle) [13];

analysis of the effectiveness of current procedures for assessing the technical condition of aviation radio equipment [14].

The purpose of the paper is to improve the technique of implementing technical maintenance by eliminating the identified defects.

Results and discussion

The essence of technical condition-based maintenance is periodic monitoring of the values of the REF parameters, with the performance of work depending on the results of instrumental testing: if necessary, bringing the parameter values to the norm.

When using technical maintenance of products in field conditions, it is necessary to first check the REE subsystems that form the most important indicators of the quality of its functioning, are the least reliable, require minimal time to check the parameters and bring them to the norm, since the time for performing the work is limited and, depending on the maintenance conditions, can end at any time.

The scheme of implementation of the improved technique is shown in Fig. 1, where its purpose and the essence of the improvement are defined together with limitations and assumptions that correspond to real conditions of technical maintenance.

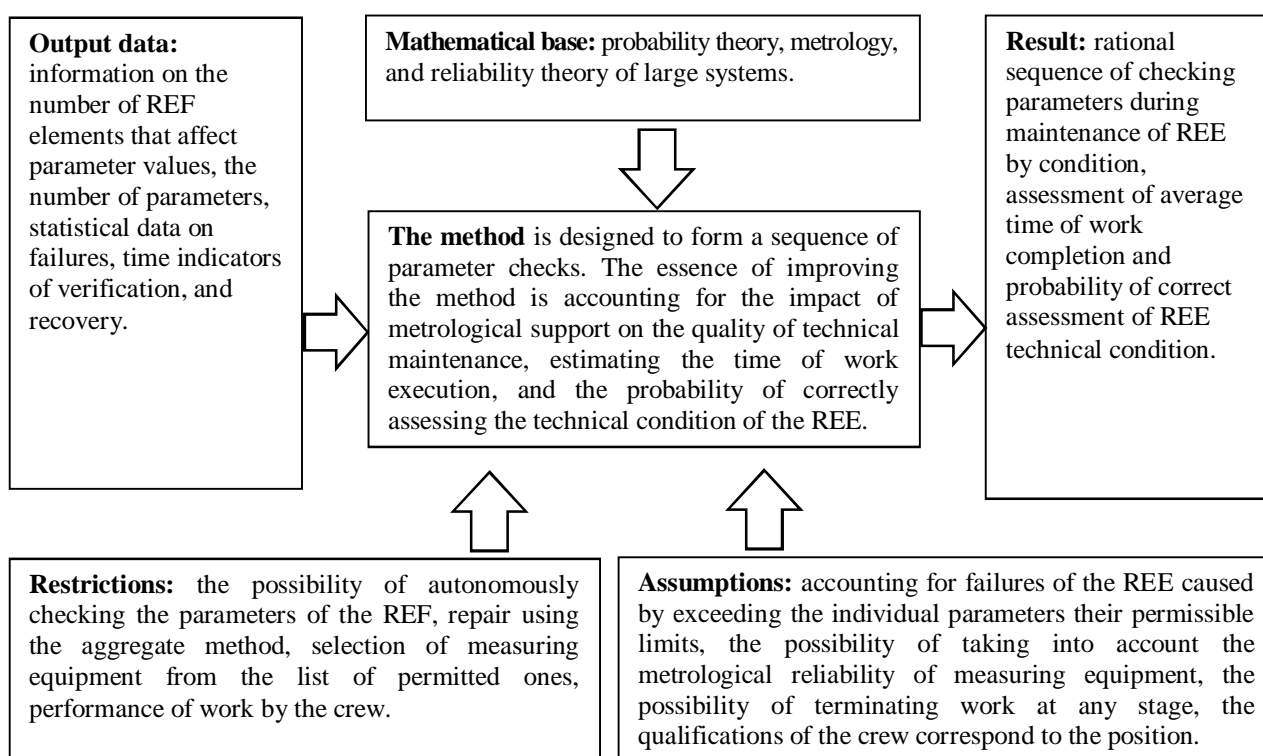


Fig. 1. Scheme of implementation of an improved technique of implementing condition-based technical maintenance of radio electronic equipment in field and stationary conditions

The technique presented in [5-7] is considered as a prototype.

Mathematical base of the technique.

The probability of failure of the REF due to the parameter value exceeding the permissible limits in the prototype is determined from an approximate calculation of the reliability of the sets of elements that affect the formation of the parameter. However in reality, depending on the operating conditions, this value varies within quite wide limits and is not an objective assessment. Therefore, it is proposed to determine this characteristic based on the results of experimental or controlled operation of REE samples as the ratio of the number of REE failures due

to the parameter $i = \overline{1, K}$ exceeding the permissible limits Q_i to the total number of failures for this period of operation Q :

$$g_i = \frac{Q_i}{Q}; Q = \sum_{i=1}^K Q_i;$$

where K is the number of REF parameters that affect its operation.

This indicator is more objective and fully corresponds to real operating conditions.

The significance of the parameter's influence on the quality indicators of the REE's work γ_i in the prototype is determined by an expert survey of specialists, which is subjective in nature and depends on the qualifications of the experts. Therefore, when

improving the technique, it is proposed to define this indicator as the relative part of the REE that affects the formation of the parameter $i = \overline{1, K}$:

$$\gamma_i = L_i / L; \quad L = \sum_{i=1}^K L_i;$$

where L_i is the number of elements influencing the i -th parameter; L is the total number of elements in the REE elements.

The relative time cost (consumption) for performing the checking of parameter $i = \overline{1, K}$ in the prototype does not account for the metrological reliability of measuring equipment (P_{3i}) and the probability of correct assessment of the verification results (p_i), thus, to take into account the quality of metrological support, it is proposed to apply the indicator:

$$\tau_i = \frac{t_i}{\prod_{i=1}^{m_i} p_i P_{3i}} \sqrt{\sum_{j=1}^K \frac{t_j}{\prod_{j=1}^{m_j} p_j P_{3j}}},$$

where t_i is the time for checking without taking into account the quality of metrological support; m_i is the number of measuring instruments for estimating the value of the parameter $i = \overline{1, K}$.

The relative labor costs for bringing the value of the parameter $i = \overline{1, K}$ to the norm are determined as in the prototype:

$$f_i = \frac{t_{ri}}{\sum_{j=1}^K t_{rj}};$$

where t_{ri} time of restoration of REF performance after failure of parameter $i = \overline{1, K}$, depends on the quality of diagnostic support. Since the required number of checks according to the diagnostic program is unknown in advance, the value of this indicator should be specified for each specific case.

The metrological reliability of measuring instruments in the prototype was calculated separately, and thus it is proposed to calculate its value for all measuring instruments, since its value is taken into account when calculating τ_i . In this case, the complex indicator of the choice of parameter $i = \overline{1, K}$ takes the form:

$$u_i = \frac{\gamma_i g_i}{f_i \tau_i}.$$

Obtained analytical expressions are summarized in Table 2.

Table 2

Comparison of the prototype and technique

Parameter	Prototype	Technique
Probability of REE failure due to the parameter exceeding the permissible limits	$P_i = \frac{Z_i}{\sum_{j=1}^K Z_j}$	$g_i = \frac{Q_i}{Q}; \quad Q = \sum_{i=1}^{\pi K} Q_i$
The significance of the impact on the quality indicators of REE	Expert survey of specialists $\sum_{i=1}^K \gamma_i$	$\gamma_i = \frac{L_i}{L}$ <i>Relative part of the REE affecting the parameter i</i>
Relative time cost to perform the check of the i parameter	$\tau_i = \frac{t_i}{\sum_{j=1}^K t_j}$	$\tau_i = \frac{t_i}{\prod_{i=1}^{m_i} p_i P_{3i}} \sqrt{\sum_{j=1}^K \frac{t_j}{\prod_{j=1}^{m_j} p_j P_{3j}}}$
Relative labor costs for bringing parameter i to the norm	$f_i = \frac{t_{ri}}{\sum_{j=1}^K t_{rj}}$	$f_i = \frac{t_{ri}}{\sum_{j=1}^K t_{rj}}$
Metrological reliability of measuring instruments	$P_{3i} = \prod_{j=1}^{m_i} P_{3j}$	$P_{ME} = \prod_{i=1}^K P_{3i}$
Complex indicator of the selection of the i parameter	$u_i = \frac{P_{3i} \gamma_i P_i}{\tau_i f_i}$	$u_i = \frac{\gamma_i g_i}{f_i \tau_i}$

The value of u_i is dimensionless and varies greatly for various REE parameters. For this reason, to rank parameters, it is advisable to use, as above, the probability of the preferred choice:

$$U_i = \frac{u_i}{\sum_{j=1}^{\pi} u_j}; \quad \sum_{i=1}^K U_i = 1.$$

In addition, in contrast to the prototype, it is proposed to quantitatively assess the time for performing condition-based maintenance, taking into account the possibility of individual parameter values exceeding the permissible limits:

$$T_M = \sum_{i=1}^K \left[\frac{t_i}{\prod_{j=1}^{m_i} p_j P_{3j}} + t_{ri} g_i \right].$$

It is also proposed to assess the probability of the technical condition of the REE after maintenance not by the relative part of the tested REE, but actually taking into account the quality of metrological support, that is, the probability of a correct assessment of the result of measuring the value of the parameter by means of measuring equipment:

$$P_M = \prod_{i=1}^K P_i; \quad P_i = \prod_{j=1}^{m_i} p_j.$$

Thus, the improved technique allows for a more objective assessment of the quality of condition-based maintenance and to perform ranking of the order of parameter checking.

The formalization of the implementation of the improved technique for implementing condition-based maintenance of modern REE in the form of a flowchart of the algorithm is shown in Fig. 2, where T_n is the allowable time for technical maintenance, P_n is the allowable probability of a correct assessment of the technical condition of RES.

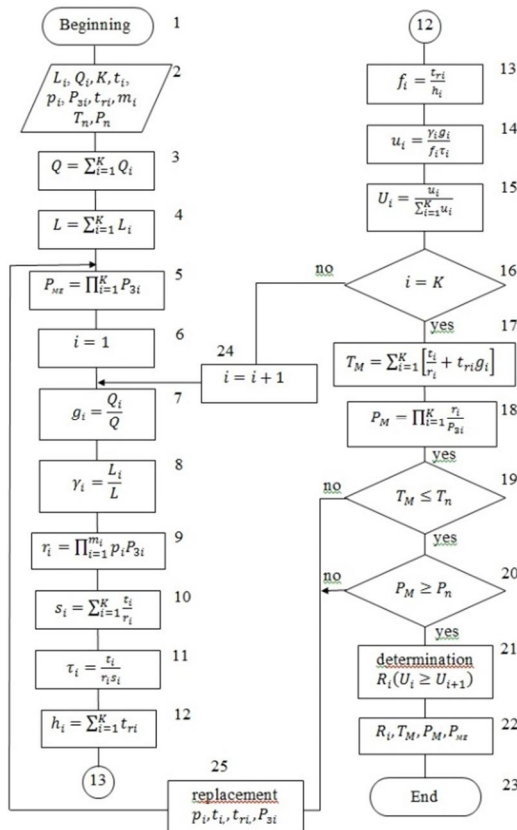


Fig. 2. Flow-chart of the algorithm for implementing an improved technique for implementing condition-based maintenance of radio-electronic equipment

Initial data are obtained from the analysis of the REE schemes, the results of its experimental or controlled

operation, metrological and diagnostic support for technical maintenance, and the qualifications of specialists.

If the estimated time of maintenance T_M exceeds the permissible value T_n or the estimated probability of assessing the technical condition of the RES P_M is lower than the permissible value P_n , then it is necessary to replace the measuring equipment (increasing p_i and P_{3i}) or improve the qualifications of the performers (decreasing t_i and t_{ri}).

Let us consider an example of using the proposed technique in comparison with the prototype [7], the results of which are summarized in Table 3. With the same initial data, the results of ranking the REE parameters according to the proposed technique are summarized in Table 4, which significantly differ from the prototype.

Fig. 3 shows the dependence of the relative part of the tested elements of the REE on the rank of the parameter with 1 corresponding to the prototype and 2 to the proposed technique.

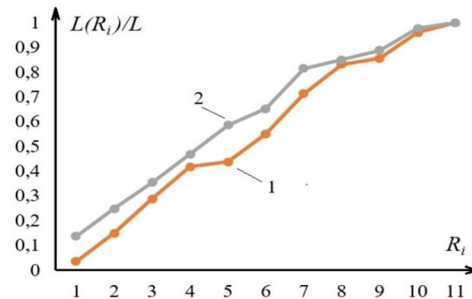


Fig. 3. Dependences of the relative part of the tested elements of the REE on the rank of the parameters (1 – prototype, 2 – proposed technique)

Analysis of data shown in Fig. 3 indicates that with the proposed technique the relative number of checked elements increases on average on 7.4% at the same number of measurements of the REE parameters.

With an increase in the number of parameter measurements, the probability of an error in evaluating the results also increases, which leads to a decrease in the probability of a correct assessment of the technical condition of the REE as a whole (Fig. 4), while compared to the prototype (dependence 1), with the proposed technique the value of P_M increases by 33% when analog measuring instruments (dependence 2).

Table 3

Results of parameter ranking according to the prototype technique

i	L_i	p_i	P_{3i}	t_i	t_{Bi}	$Z_i \cdot 10^{-6},$ $hour^{-1}$	τ_i	f_i	u_i	$U_i \cdot 10^2, \%$	R_i
1	80	0,942	0,85	15	10	4	0,0811	0,0221	1229	0,765	9
2	120	0,931	0,88	15	12	4	0,0811	0,02652	2492	1,551	8
3	370	0,910	0,81	20	15	10	0,0108	0,03315	68907	42,899	1
4	410	0,988	0,79	20	20	10	0,0108	0,0442	41993	26,144	2
5	350	0,945	0,91	10	11	6	0,0054	0,0243	7039	4,401	6
6	430	0,956	0,88	10	8	7	0,0054	0,0177	9336	5,812	4
7	330	0,912	0,93	10	16	6	0,0054	0,0353	7411	4,614	5
8	110	0,980	0,95	30	25	25	0,01621	0,05525	5386	3,350	7
9	70	0,982	0,89	15	22	4	0,0081	0,04862	786	0,490	11
10	510	0,901	0,87	15	18	4	0,0081	0,03978	1095	0,682	10
11	360	0,985	0,88	25	24	20	0,01351	0,05304	14955	9,311	3

Table 4

Results of parameter ranking according to the proposed technique

i	g_i	$\gamma_i \cdot 10^2$	$\tau_i \cdot 10^2$	u_i	$U_i \cdot 10^2, \%$	R_i	$L(R_i)/L$	P_M
1	0,04	2,55	8,42	0,220	1,70	10	0,978	0,565
2	0,04	3,82	8,23	0,281	2,20	9	0,888	0,600
3	0,10	11,78	12,19	1,164	9,10	5	0,586	0,740
4	0,10	13,06	11,52	1,031	8,00	6	0,653	0,730
5	0,06	11,15	5,23	2,097	16,30	2	0,248	0,903
6	0,07	13,69	5,34	4,078	31,80	1	0,137	0,956
7	0,06	10,50	5,30	1,351	10,50	3	0,353	0,824
8	0,25	3,50	14,48	0,438	3,40	8	0,850	0,644
9	0,04	2,23	7,71	0,096	0,75	11	1,000	0,555
10	0,04	16,24	8,60	0,763	5,90	7	0,815	0,657
11	0,20	11,48	12,98	1,310	10,30	4	0,468	0,811

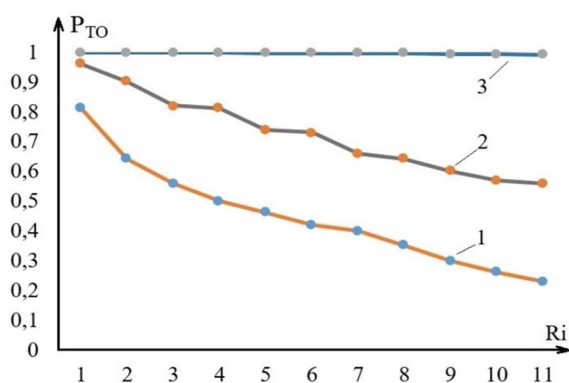


Fig. 4. Dependences of the probability of correct assessment of the technical condition of the REE on the number of checked parameters for the prototype (1) and proposed technique with analog (2) and digital (3) measuring instruments

However, when employing modern digital measuring instruments with $p_i \geq 0.9993$ [15] of a mobile measuring instrument laboratory of 2017 release according to TU 34.1 – 01354485 – 018:2016, which is fully equipped with digital measuring instruments produced in both Ukraine and the USA, at the same conditions the corresponding value increases to $P_M = 0.9923$ (dependence 3, Fig. 4).

In the considered example, the estimated time for measuring the values of $K = 11$ parameters is 3.7 hours, and the predicted time for bringing the parameter values to the norm is 0.25 hours, i.e., the total time for performing technical maintenance according to the condition $T_M \approx 4$ hours. At the same time, the metrological reliability of measuring equipment (ME) $P_{ME} = 0.748$. The latter is the probability of all measuring equipment for technical maintenance of the facility will be operational within a year (inter-verification period).

Therefore, the proposed technique increases the checked part of the inspected object, when the parameter values are checked in the certain established sequence. The latter is important for field conditions, when the inspection process can be interrupted at any time. In addition, the technique enhances the probability of correct assessment of the technical condition of the REE (at least by 33% in the example under consideration).

Conclusions

The scientific novelty of the technique lies in assessing the probability of the preferred choice of the REE parameter, taking into account the quality of metrological and diagnostic support while excluding the subjective factor that influences this process. This allows for using the obtained results in perspective hardware technical support of modern REE applying information technologies to increase the efficiency of maintenance by condition.

The effect of using the developed technique is achieved by a new approach to ranking REE parameters to check their values in extreme field conditions, namely: with limited time for performing work, when the first-checked parameters that reflect the most important indicators of the quality of the object's functioning are the least reliable, require minimal time for checking and restoring if necessary. As a result, the technique allows for increasing the probability of correct assessment of the technical condition of REE

Compared to checking subsets of REE elements in order of decreasing their power, the proposed technique increases the average probability of a correct technical condition assessment by 33%.

The research results are depicted in the form of a flow-chart of an algorithm that can be implemented based on electronic computers with promising hardware technical support.

We believe that further research directed towards the introduction of information technology techniques into the process of technical diagnostics of modern digital information processing REE will be in great demand.

References

1. State Standart of Ukraine (1998), "B 3576-97. "Ekspluatatsiya ta remont vijskovoyi tehniki. Termini ta viznachennya" [B 3576-97. Operation and repair of military equipment. Terms and definitions]. *Derzhstandart Ukrainy*, Kyiv, 59 p. [in Ukrainian].
2. State Standart of Ukraine (1998), "B 3577-97. Vidi tehničnogo obslugovuvannya. Zamina komplektuvanih virobiv. Zagalni polozhennya" [B 3577-97. Types of maintenance. Replacement of components. General provisions]. *Derzhstandart Ukrainy*, Kyiv, 9 p. [in Ukrainian].

3. State Standart of Ukraine (1995), "2860-94. Nadiinist tekhniki. Terminy ta vyznachennia" [2860-94. Reliability of equipment. Terms and definitions]. *Derzhstandart Ukrainy*, Kyiv, 90 p. [in Ukrainian].
4. Vasylyshyn V.I., Zhenzhera S.V., Chechui O.V. and Hlushko A.P. (2018), "Osnovy teorii nadiinosti ta ekspluatatsii radioelektronnykh system" [Fundamentals of the theory of reliability and operation of radio electronic systems]: Tutorial, KhNUPS, Kharkov, 268 p. [in Ukrainian].
5. Sakovich L.M., Krykhovetsky G.Ya. and Nebesna Y.E. (2017), "Ocinka vplyvu metrologichnoyi nadiynosti zasobiv vimiryuvan na chas vikonannya tehnicnogo obslugovuvannya zasobiv specialnogo zv'yazku" [Evaluation of the influence of metrological reliability of measuring devices on the time of maintenance of special communication devices]. *Control, navigation and communication systems*. № 2(48). pp. 164-166. [in Ukrainian]
6. Sakovich L.M., Ryzhov Ye.V., Nastishin Yu.A., Myroshnychenko Yu.V. and Korotchenko L.A. (2020), *Metodika vyznachennya poslidovnosti perevirki radioelektronnih kompleksiv pri tehnicnomu obslugovuvanni za stanom* [The method of determining the sequence of checking radio-electronic complexes during maintenance according to condition]. *Military Technical Collection*. № 22. P. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.66-73>. [in Ukrainian]
7. Sakovich L.M., Romanenko V.P., Girenko I.M., Kuryata Ya.E. and Myroshnychenko Yu.V. (2021), *Tekhnichna ekspluatatsiia zasobiv ta system zviazku*. [Technical operation of communication facilities and systems]. ISZZI KPI named after I. Sikorsky. K.: KPI. 176 p. [in Ukrainian]
8. Yin Yonghua, GuoJianbo, Zhao Jianjun et al. Preliminary analysis of Large Scale Blackout in Interconnected North America Power Grid on August 14 and Lessons to Be Drawn. *Power system Technology*, 2003, 27 (10): 8-11, 16.
9. Abraham S., Dhaliwal H., Efford R.J., Keen L.J., McLellan A., and Wood P. (2004), Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United State and Canada: Causes and Recommendations. Retrieved from <https://www.energy.gov/oe/articles/blackout-2003-final-report-august-14-2003-blackout-united-states-and-canada-causes-and>
10. Zaliskyi, Maksym, et al (2022), "Technical Condition Monitoring for Telecommunication and Radioelectronic Systems with Redundancy" *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 18, no. 1, Riga Technical University, pp. 57-65. DOI:<https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0008>
11. O. Solomentsev, M. Zaliskyi, O. Zuev, O. Shcherbyna, R. Odarchenko and I. Yashanov (2022), "Predictive Maintenance Approach for Telecommunication and Radioelectronic Systems", *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 58-63. DOI:<https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9767048>
12. Mołęda M., Małysiak-Mrozek B., Ding W., Sunderam V. and Mrozek D. (2023), From Corrective to Predictive Maintenance – A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. *Sensors*, 23 (13), 5970.
13. Banzak H., Banzak O., Leshchenko O. and Zherebtsova L. (2023), Methodology for optimizing strategy parameters "on-condition" maintenance with constant monitoring frequency. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (September 29, 2023; Bologna, Italy), 88-91. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023.23>
14. Solomentsev O. etc. (2024), Efficiency Analysis of Current Repair Procedures for Aviation Radio Equipment. In: Ostroumov, I., Zaliskyi, M. (eds) Proceedings of the 2nd International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 992. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-60196-5_21
15. Kononov V.B., Vodolazhko S.V., Koval S.V., Naumenko A.M. and Kondrashova I.I. (2017), "Osnovy teorii nadiinosti ta ekspluatatsii radioelektronnykh system v umovakh ATO" [Fundamentals of operation of military measuring equipment in ATO conditions]: KhNUPS, Kharkov, 288 p. [in Ukrainian]

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Л.М. Сакович, Є.В. Рижов, Г.Я. Криховецький, С.М. Семеха, Я.Е. Курята

Об'єктом дослідження є процес технічного обслуговування за станом радіоелектронних засобів (РЕЗ) для скорочення працевитрат за рахунок мінімально необхідної кількості вимірювань параметрів у визначеній послідовності при забезпеченні заданої ймовірності оцінювання технічного стану РЕЗ. Метою дослідження є удосконалення методу впровадження технічного обслуговування за станом усуненням недоліків існуючих методів: перевитрати сил і засобів, відсутність врахування впливу метрологічного забезпечення на час виконання робіт і оцінювання реального технічного стану РЕЗ.

В статті пропонується удосконалення методу технічного обслуговування за станом формуванням послідовності перевірки параметрів з врахуванням метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки із кількісною оцінкою комплексного показника переважного вибору кожного параметра РЕЗ. Запропоновано структуру реалізації методу, блок-схема його практичного використання із застосуванням вихідних даних залежно від конкретних умов експлуатації РЕЗ. Розглянуто приклад використання методу, який показав, що в окремих випадках має місце підвищення ймовірності правильної оцінки технічного стану РЕЗ: після обслуговування до 33%; при збільшенні кількості елементів, що перевіряються, більше 7% після використання однакової кількості вимірювань параметрів із прототипом.

Досліджено функціональні залежності відносної кількості елементів РЕЗ, що перевіряються та ймовірності правильного оцінювання технічного стану для існуючих методів реалізації технічного обслуговування від кількості перевірених параметрів.

Наукова новизна методу полягає у виключенні суб'єктивного фактора при визначенні порядку перевірки параметрів, що із врахуванням якості метрологічного і діагностичного забезпечення підвищує об'єктивність оцінювання ймовірності реального технічного стану РЕЗ після виконання перевірки значень параметрів. Ефект від застосування методу досягається новим підходом до ранжування параметрів РЕЗ для перевірки їх значень із врахуванням впливу на якість функціонування об'єкта, надійності сукупності елементів, які впливають на значення параметра, часу кількісної оцінки його значення і необхідного часу відновлення при відхиленні від норми.

Отримані результати доцільно використовувати в перспективних апаратних технічного забезпечення сучасних РЕЗ в польових умовах для підвищення ефективності їх технічного обслуговування за станом.

Ключові слова: *радіоелектронні засоби, технічне обслуговування за станом, ранжування параметрів.*

ЗАХИСТ ОВТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ PROTECTION OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT FROM DETECTION MEANS AND ENGAGEMENT

UDC 624.9

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.169-175>

L. Velychko, N. Huzyk*, N. Sokulska, O. Bilash

Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv

ENGINEERING SOLUTIONS FOR PROTECTING STRUCTURES FROM AERIAL THREATS

The article discusses an innovative approach to protecting objects from unmanned aerial vehicles (UAVs) – the use of anti-drone nets with elastic fastening of the upper part to fixed supports. The physical and operational disadvantages of traditional rigidly fixed nets are described and the advantages of elastic fastening are justified. A mathematical model of the moment of collision of a drone with a horizontally placed spring-loaded strip has been constructed. A functional dependence has been established that allows determining the influence of the nonlinearity coefficient and spring stiffness on the maximum downward displacement of the central point of the spring-loaded strip, which makes it possible to optimise the fastening parameters to ensure a balance between strength and elasticity. The results obtained can be used in the design of new types of protective structures adapted to field conditions and modern threats.

Keywords: protection against UAVs, protective structures, anti-drone nets, elastic fastening.

The statement of the problem

The full-scale war on the territory of Ukraine has vividly demonstrated the unprecedented rise in the significance of aerial threats in modern warfare. Massive missile strikes, the deployment of unmanned aerial vehicles (UAVs), and the use of precision-guided weapons have introduced new challenges for defence systems, particularly in the engineering protection of military and civilian infrastructure.

During the russo-Ukrainian war, the Defense Forces demonstrated that UAVs have ceased to be merely auxiliary elements of the armed forces and have become a key component of modern military strategy. The main advantages of drones include high manoeuvrability, the ability to operate in hard-to-reach areas, and a significant reduction in risk to personnel. Modern UAVs are capable of striking not only military positions but also energy, industrial, logistical, and residential targets, necessitating the development of new approaches to engineering

protection – such as lightweight modular shelters, anti-perforation meshes, camouflage systems, anti-drone domes, and rapidly deployable protective structures. Ukrainian experience demonstrates that the effective integration of active countermeasures (electronic warfare, firepower) with passive engineering methods (fortifications, shelters, dispersion, multi-level camouflage) significantly reduces the effectiveness of enemy UAV attacks. Today, the issue of countering drone assaults is particularly relevant, as their rapid development outpaces traditional defense systems.

Therefore, engineering solutions must be flexible, adaptive, and rapidly deployable. Their effectiveness is critical not only for preserving material assets but also for safeguarding the lives of military personnel and civilians. The evolving of airborne threats necessitates the developing of innovative, technically validated, and operationally proven engineering systems for infrastructure protection.

Article history: Income 23 October 2025; Revised 24 October 2025; Accepted 31 October 2025; Print 05 December 2025

Величко Л.Д. ORCID ID: 0000-0003-0191-4843, Гузик Н.М. ORCID ID: 0000-0002-5609-4830,
Сокульська Н.Б. ORCID ID: 0000-0002-3425-5517, Білаш О.В. ORCID ID: 0000-0001-7515-7641

* Corresponding author hryntsiv@ukr.net

Analysis of basic research and publications

The ongoing efforts to combat UAV threats in Ukraine encompass several strategic directions, including electronic warfare (EW), whose principal objective is the neutralization of control links, navigational signals, and data exchange pathways. An example of electronic warfare (EW) application in the russo-Ukrainian war is the deployment of relatively new EW systems such as “Bukovel-AD” [2], “Nota” [3], and others [4]. EW represents an effective, rapid, and relatively low-cost method for neutralizing large numbers of inexpensive, remotely controlled UAVs, providing time to organize additional countermeasures. However, its effectiveness diminishes with the increasing sophistication and protection of drones. Moreover, the deployment of such measures entails potential harm to civilian infrastructure and is subject to logistical and regulatory limitations.

Another strategic direction entails the application of air defense assets, notably surface-to-air missile systems like “Avenger” [5], “Strela-10”, Vampire, Mistral [6], Stinger, and “Igla”, which are employed to intercept and destroy larger UAVs or coordinated drone formations. The main challenge of this approach lies in the use of expensive missiles against low-cost drones, which is not always economically justified.

Ukrainian Defense Forces deploy mobile firing groups for UAV mitigation, enabling rapid target acquisition, threat alerting, and destruction of airborne objects using infantry weapons and immediate protective means. These units are characterized by high speed and manoeuvrability: unlike stationary air defense systems, mobile groups can be rapidly redeployed to any terrain sector currently facing the greatest threat. Mobile fire teams accounted for the largest proportion of neutralized combat drones. By July 2025, their effectiveness rate had reached 40%. A key limitation in the use of mobile fire teams lies in the elevated threat level near the front line, where enemy drones increase their susceptibility to attack. Shahed strikes are often coordinated with incursions by FPV drones that infiltrate deep into Ukrainian-controlled areas. Consequently, these teams must reposition to more distant locations to reduce exposure to hostile engagements.

These countermeasures allow for the successful destruction of numerous UAVs, yet the escalation in simultaneous strikes leads to more drones breaching defenses and achieving their goals. The primary factors contributing to this issue include the mass scale of simultaneous raids, the high velocity of aerial platforms, and the frequent occurrence of attacks during nighttime hours. A potential solution lies in the deployment of interceptor drones, which gained widespread attention in spring 2024 following Bravel’s announcement of a competition to develop systems capable of countering russian reconnaissance UAVs. By July 2024, a new

FPV interceptor with an X-shaped wing was showcased, capable of destroying drones flying at 100–160 km/h. These interceptors have proven to be an affordable and effective alternative to missiles and heavy weaponry. Each unit costs far less than a Shahed drone and is vastly more accessible than a missile. Ukrainian versions are available for under \$10,000, positioning them as a cost-efficient tool for neutralizing both strike and reconnaissance UAVs. Currently, multiple teams are engaged in the development of anti-aircraft drones. Their efforts have resulted in systems that have not only successfully passed field trials but are already being deployed in active combat scenarios. Since late 2024, Ukraine has been conducting successful tests of the Tytan Interceptor, a drone developed through German-Ukrainian collaboration. It reaches altitudes of up to 2,000 meters, has an operational range of 15–20 km, and achieves speeds of up to 300 km/h. The system is powered by artificial intelligence, enhancing target detection, tracking, and classification, with full AI-based navigation automation planned. Control is executed via a standard gamepad. With a cost below €20,000, the platform offers an affordable and effective solution for neutralizing enemy reconnaissance UAVs, including the Orlan-10 and Zala. The “General Chereshnya AIR” drone represents another noteworthy case of an affordable and effective interceptor. With a unit cost of 39,900 UAH, it operates at altitudes up to 6 km, achieves speeds of 160 km/h, and maintains flight endurance of up to 35 minutes. Having already eliminated more than 300 targets, the platform is being mass-produced in the thousands, with plans to expand output to tens of thousands monthly. Each unit is equipped with 1.5 kg of explosives. Development is in progress to deploy next-generation software for automatic target acquisition and monitoring [7].

Another direction in combating enemy drones is the deployment of integrated systems that combine radar, imaging, thermal, and acoustic components to detect and classify threats in real time. Octava Defence has presented SFERA [1], the first unified system for protecting critical infrastructure. It uniquely integrates radar, acoustic sensors, opto-thermal platforms, and software that transmits targeting data to strike units for active fire response. The system’s uniqueness lies in its ability to rapidly detect hostile targets and ensure their prompt elimination. By integrating radar data, acoustic sensing, and intelligent video surveillance, it enables reliable target identification. The system tracks the object and predicts its trajectory, providing both current and projected coordinates for engagement. Unlike certain conventional air defense assets, the complex is particularly effective against low-altitude threats. The probability of target detection approaches 100%. All data – including coordinates and trajectory – is

automatically transmitted to strike units. Mathematical models forecast target movement and maintain tracking until neutralization. Automation enables decision-making within minutes and minimizes human error. Thus, SFERA represents a cutting-edge technological solution for protecting the nation's critical infrastructure.

Engineering solutions represent another strategic avenue for countering UAV threats. These include:

- concealment and decentralization – relocating and hiding assets to lower vulnerability to coordinated attacks;
- protective structures – including mesh coverings, overhead shields, and domes that reduce detectability and blast damage, occasionally reinforced with Armor or anti-fragmentation layers;
- hardened facilities – such as reinforced shelters, subterranean bunkers, and steel or concrete hangars for safeguarding vehicles and infrastructure.

Evidently, such measures do not eliminate the source of the threat but serve to mitigate its consequences. They are preventive in nature, reducing the probability of impact and damage even before the threat is detected. Moreover, they are less susceptible to cyber or electronic warfare attacks: physical shelters remain functional even when the adversary disrupts the spectrum or communication channels. Engineering solutions are effective regardless of drone type and play a critical role in protecting civilian infrastructure. Their cost-effectiveness compared to other UAV countermeasures is also noteworthy.

Ukrainian troops have employed a practical engineering method to defend rear positions and supply routes in areas prone to fiber-linked drone ambushes: spreading barbed wire that slices through the UAV's optical cable and interrupts its connection to the operator. In contrast to standard FPV drones, fiber-linked UAVs route their optical cable along the ground rather than through the air. This characteristic makes low-level barriers near transport routes, storage facilities, bridges, or logistics hubs highly effective in

intercepting and severing the tether. Undoubtedly, this engineering solution has certain limitations: such barriers require manual installation, power supply, and concealment, as well as the provision of access routes for friendly forces. However, in the long term, the system can be modularly scaled and deployed in the most vulnerable areas, supplemented with radar sensors, cameras, or infrared projectors to enable timely threat detection.

Another engineering method for countering UAV threats involves the use of anti-drone nets. These structures create a protective barrier that impedes or entirely blocks drone attacks, particularly those carried out by FPV systems and loitering munitions. The primary rationale for this defense lies in the limited visibility caused by degraded video transmission, which prevents the operator from recognizing the net, leading to the drone's propellers becoming ensnared. The use of anti-drone netting extends beyond logistical corridors to include coverage over trenches and access points to dugouts. These barriers protect troops from direct impacts and fragmentation, while also defending artillery emplacements – common targets for hostile FPV drones. In addition to physical protection, such measures enhance camouflage and reduce the likelihood of accurate enemy strikes.

Low-cost FPV drones have fundamentally transformed the nature of modern warfare in recent years. Their latest generation, equipped with fiber-optic control systems, has compelled military strategists to reassess conventional defense paradigms. The widespread deployment of such platforms in frontline areas has rendered the location of the next strike unpredictable – posing a threat not only to military targets but also to civilian vehicles on the road. Consequently, large protective nets have been installed along major transportation routes near the front line to shield vehicles from direct drone strikes. Figure 1 illustrates the appearance of these “anti-drone” barriers in the vicinity of Kostiantynivka and Kramatorsk.



Fig. 1. Anti-Drone Netting Along Ukrainian Roadways

Materials for anti-drone structures are selected based on the formula “availability + rapid deployment + effectiveness against FPV drones.” Synthetic polymer meshes – such as nylon, polyester, and polypropylene – are widely used above trenches, dugouts, vehicles, and

at the entrances to depots and field positions, serving both as camouflage and protective elements. These materials are favored for their light weight, flexibility, low cost, and immediate availability in field conditions, often being repurposed from construction or sports

netting. These structures are easy to install and replace, do not obstruct visibility or airflow, produce minimal radar signature, and are effective against lightweight FPV drones – whose operators often fail to detect the barrier due to poor video feed quality. However, their use has certain drawbacks: deformation under wind, rain, or icing; melting or destruction upon strong impact; and the need for regular maintenance.

Steel-based protective elements – including galvanized or stainless wire meshes, tensioned cables, and rebar frameworks – are widely utilized to safeguard armoured vehicles and to reinforce permanent defensive structures around vital installations, such as energy infrastructure, logistical depots, and administrative compounds. These materials are employed due to their ability to withstand impacts from FPV drones equipped with explosives or fragmentation payloads. Such meshes exhibit high mechanical strength, durability, reusability after minor damage, and proven effectiveness against heavier classes of unmanned aerial vehicles and loitering munitions. However, these systems also present certain limitations – namely, considerable weight requiring robust supports or frames, installation complexity (often involving machinery), and the risk of improper setup that may cause hazardous inward deflection of fragments. Such meshes are widely used to construct “anti-drone domes” over vehicles and to reinforce the protection of energy infrastructure facilities. Composite anti-drone nets, combining metallic and synthetic components, reinforced tapes, or plastic frames, are also employed by engineering units of the Armed Forces of Ukraine for rapid fortification of positions – primarily above dugouts, observation posts, and field shelters – as well as during the construction of quickly deployable protective structures in rear areas.

Aramid fibers (Kevlar, Twaron, Nomex) are used in the production of specialized industrial anti-drone nets designed to protect strategic assets such as power plants, ammunition depots, and government buildings. These materials are strong, heat-resistant, and cut-resistant. As a result, they can intercept fragments and partially absorb explosive energy, while being non-melting and electrically non-conductive. However, they are expensive, require professional installation, and demand regular inspection of fiber integrity. Due to their high cost, aramid fibers are used infrequently – primarily in state-funded protection systems for critical infrastructure.

Improvised materials – such as fishing nets, construction-grade reinforcement meshes, and football or volleyball netting – are widely used in frontline villages, by mobile units, and during the rapid setup of new shelters due to their high availability and low cost. These solutions can be installed within hours and often prove effective by disrupting the orientation of FPV drone operators. However, they are not always

capable of withstanding direct munition impacts and require frequent replacement. Industrial fishing nets are considered among the most effective anti-drone solutions due to their high tensile strength, non-reflective surface under sunlight, and ability to withstand drone impacts. A Danish volunteer recently donated a batch of such nets to Ukraine. Demand for these protective materials is rapidly increasing along the entire front line, with Scandinavian countries – where the fishing industry is well developed – emerging as key suppliers [9]–[15].

Among the most pressing issues in anti-drone infrastructure is the challenge of securing netting systems. Effective mounting requires a balance between mechanical robustness, tactical mobility, and rapid deployment. Enhancing system efficiency calls for standardized fastening mechanisms, lightweight metallic or composite frames, and engineering solutions optimized for combat environments. This article is devoted to exploring and resolving this challenge.

Net tunnels are commonly installed using rigid fixation methods. However, such rigidly anchored anti-drone systems face notable mechanical and operational constraints that compromise their durability and reliability. During drone impact, the force is directly transmitted to the support structure, resulting in dynamic stress, deformation, and possible failure of attachment points. These systems also demonstrate limited adaptability to environmental fluctuations – including wind pressure, rainfall, and directional changes in UAV attacks – thereby diminishing their interception performance. Moreover, rigid mounting complicates installation and dismantling in field conditions, requires heavy-duty supports, and demands precise geometric alignment – making such systems poorly suited for rapid deployment at temporary positions.

This work proposes the use of elastic mounting. By incorporating flexible elements, such as springs, the system can partially absorb and dissipate the impact energy of a drone strike, thereby reducing peak loads on the supports and extending the overall service life of the structure. Such a mechanism minimizes the probability of net damage or collapse, thereby improving the chances of drone interception without compromising key structural elements. The use of elastic fixation further improves resilience to wind stress and climatic variability, enabling the system to accommodate air surges, thermal changes, and snow loads while maintaining structural tension. As a result, the net maintains structural integrity and operational functionality even during prolonged field use. Additionally, the system is lighter, easier to install, and does not require reinforced supports, which facilitates rapid deployment at temporary positions and makes it suitable for protecting various types of assets.

Presentation of the main results

Consider the motion of a mechanical system consisting of a rigid body H modelling the fall of a UAV onto a spring-loaded strip AB . It is assumed that this strip is the upper part of an anti-drone tunnel (pic. 2). The rigid body H falls from a height h_1 onto a spring-loaded

horizontally placed strip AB . It is attached to the hinged supports D and C by means of springs DA and BC . The aim of the work is to determine the maximum value h_2 to which the central point G of the strip will drop as a result of the contact of the body H with AB .

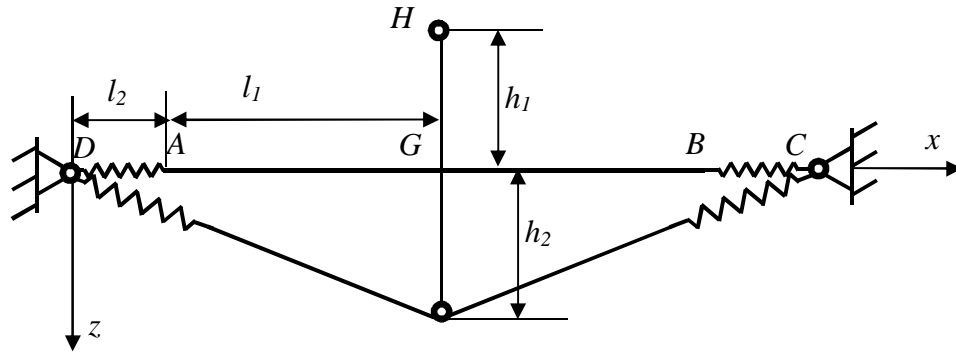


Fig. 2. Schematic representation of the moment of collision between a body and a horizontally oriented elastic strip

To determine the value h_2 we will use the theorem on the change in kinetic energy of a mechanical system

$$T_k - T_0 = \sum A_i^e + \sum A_i^i. \quad (1)$$

In formula (1) T_k denotes the kinetic energy of the mechanical system at the final moment of time, T_0 is the kinetic energy of the mechanical system at the initial moment of time, $\sum A_i^e$ is the sum of the work performed by the external forces of the mechanical system, $\sum A_i^i$ is the sum of the work performed by the internal forces of the mechanical system.

If air resistance is neglected, then the body H falling from a height h_1 , at the moment of touching a horizontally placed strip AB , will have a speed,

$$V_{H0} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}, \quad (2)$$

where $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$ is the acceleration of free fall of the body.

At the initial moment of time, the spring-loaded strip AB is stationary, so the initial kinetic energy of the mechanical system is equal to

$$T_0 = m_1 \cdot g \cdot h_1, \quad (3)$$

where m_1 is the mass of the solid body H .

At the final moment of time, when the maximum downward displacement of point G is reached, the entire mechanical system will be at rest. Therefore, the kinetic energy of the mechanical system at the final moment of time is zero, i.e.

$$T_k = 0. \quad (4)$$

The work is performed by the weight of the body H and the weight of the strip AB , therefore

$$\sum A_i^e = m_1 \cdot g \cdot h_2 + 0,5m_2 \cdot g \cdot h_2, \quad (5)$$

where m_2 is the mass of the strip AB , h_2 is the maximum downward displacement of point G .

Since the strip is spring-loaded, the springs DA and BC will stretch by an amount Δl during the downward movement of the strip and perform work. We assume that the elastic force of the springs is described by the relationship

$$F_{sp} = c \cdot \Delta l^v, \quad (6)$$

where c is the spring stiffness, v is the nonlinearity coefficient.

Taking into account (6), we obtain

$$\sum A_i^i = -2 \cdot \frac{c \cdot \Delta l^{v+1}}{v+1}. \quad (7)$$

Substituting the determined dependencies into (1), we find

$$-m_1 \cdot g \cdot h_1 = m_1 \cdot g \cdot h_2 + 0,5m_2 \cdot g \cdot h_2 - 2 \cdot \frac{c \cdot \Delta l^{v+1}}{v+1}. \quad (8)$$

Taking into account the geometry of the mechanical system, we obtain that

$$(l_1 + l_2)^2 + h_2^2 = (l_1 + l_2 + \Delta l)^2. \quad (9)$$

From this equation, we will determine the amount of spring deformation

$$\Delta l = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + h_2^2} - l_1 - l_2. \quad (10)$$

Substituting (10) into (8), we obtain a functional dependence that allows us to determine the influence of system parameters on the maximum downward displacement of the point G .

$$m_1 \cdot g \cdot (h_1 + h_2) + 0,5m_2 \cdot g \cdot h_2 - \frac{2c}{v+1} \left(\sqrt{(l_1 + l_2)^2 + h_2^2} - l_1 - l_2 \right)^{v+1} = 0. \quad (11)$$

We will use equation (11) to evaluate the relationship between spring stiffness and the coefficient of nonlinearity of elastic force. Suppose that in (11) $m_1 = 5 \text{ kg}$, $m_2 = 100 \text{ kg}$, $l_1 = 3 \text{ m}$, $l_2 = 0,5 \text{ m}$,

$h_1 = 50 \text{ m}$. The spring stiffness values for different values of the nonlinearity coefficient and the deviation of the center point of the strip AB are given in Table 1.

Table 1

Dependence of spring stiffness on nonlinearity coefficient for different values of strip deformation AB

v	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
c, Nm^{-1} at $h_2 = 0,5 \text{ m}$	453935	673376	995445	1467013	2155987	3160611	4622854
c, Nm^{-1} at $h_2 = 1,0 \text{ m}$	55588	71892	92656	119049	152563	194954	248602

Analysing the results presented in Table 1, we can conclude that:

- for a given displacement of point G , a smaller value of the nonlinearity coefficient corresponds to a smaller value of its stiffness;
- as the displacement of point G increases, the elasticity of the spring decreases significantly for the same values of the nonlinearity coefficient.

Let us investigate the effect of the strip mass on the spring stiffness. Assume that in (11) $m_1 = 5 \text{ kg}$, $l_1 = 3 \text{ m}$, $l_2 = 0,5 \text{ m}$, $h_1 = 50 \text{ m}$, $h_2 = 0,5 \text{ m}$. Let us evaluate the effect of the strip mass on the relationship between the nonlinearity coefficient and the spring stiffness.

Table 2

Dependence of spring stiffness on nonlinearity coefficient for different strip mass values

v	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
c, Nm^{-1} при $m_2 = 25 \text{ kg}$	423263	627878	928185	1367891	2010312	2947057	4310499
c, Nm^{-1} при $m_2 = 50 \text{ kg}$	433487	643044	950605	1400931	2058870	3018242	4414617

Analysing the results presented in Table 2, it deduce that

- reducing the mass of the strip allows the spring stiffness to be reduced for the same values of the nonlinearity coefficient;
- as the nonlinearity coefficient increases, the spring stiffness increases for the same values of the strip mass.

Therefore, to reduce the maximum deformation of the strip onto which the body falls, it is necessary to use springs with a regressive dependence (v less than one) of the elastic force and, accordingly, a lower value of its stiffness.

Conclusions, practical recommendations and further generalization of results

A method of studying the dynamics of a spring-loaded strip under the influence of an action on it at the central point of an object with a given mass has been developed. The functional dependence between the maximum deflection and the values of the nonlinearity coefficient and spring stiffness for given values of the masses of the object and the strip was obtained.

It is established that:

- with a constant displacement of point G , lower values of the nonlinearity coefficient correspond to lower spring stiffness;

- with an increase in the displacement of point G , the spring stiffness decreases significantly at the same values of the nonlinearity coefficient;

- a decrease in the mass of the strip leads to a decrease in spring stiffness at the same values of the nonlinearity coefficient;

- with an increase in the nonlinearity coefficient, the spring stiffness increases at a constant strip mass.

The results of this work can be used in the creation of new protective structures and the modernisation of existing ones in order to reduce the dynamic load on their elements. It should be noted that elastic reinforcements can be used not only for horizontal but also for vertical parts of anti-drone tunnels.

In the case of an impact not in the central part of the strip, the amplitude of the deflection of the protective element will change and depend on the distance to the elastic fastening. Such tasks will be the subject of further research.

References

1. "Ukrayina zaprovadzhuye pershu yedynu systemu zakhystu ob'ektiv krytychnoyi infrastruktury" [Ukraine introduces its first unified system for protecting critical infrastructure facilities]. URL: <https://octava.ua/v-ukrayini->

zyavylasya-persha-unifikovana-systema-zahystu-obyektiv-krytychnoyi-infrastruktury/ [in Ukrainian]

2. "Ukrayins'kyi kompleks radioelektronnoyi borot'by «Bukovel'-PD» zdiysnyv posadku rosiys'koho BPLA ZALA 421-16E2" [Ukrainian Bukovel-AD EW system landed Russian ZALA 421-16E2 UAV]. URL: <https://military.com/en/news/ukrainian-bukovel-ad-ew-system-landed-russian-zala-421-16e2-uav/> [in Ukrainian]

3. Upgraded Nota complex by Tritel becomes an antidote to Russian EW systems. URL: https://defence-ua.com/people_and_company/onovlenij_kompleks_nota_vid_kompaniji_tritel_stav_antidotom_vid_rosijskih_sistem_reb-5736.html

4. Lavrenchenko M. V., Vakulenko I. V. and Mazur V. V. (2024), "Analiz vykorystannya peredovykh system radioelektronnoyi borot'by pid chas rosiys'ko-ukrayins'koyi viyny" [Analysis of the use of advanced electronic warfare systems during the Russian-Ukrainian war]. *International Scientific and Practical Conference "Application of Information Technologies in the Training and Activity of Law Enforcement Forces": Collection of Abstracts (Kharkiv, March 14, 2024)*. Kharkiv, pp. 212–213. [in Ukrainian]

5. "Zbroyni syly Ukrayiny vykorystovuyut' zastarili systemy proty bezpilotnykiv" [Ukrainian Armed Forces use legacy systems against UAVs]. URL: <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/723096-zrk-avenger-zsu-vikorisovuye-stari-sistemi-proti-bpla-video/> [in Ukrainian]

6. "Ukrayins'ki viys'ka demonstruyut', yak frantsuz'kyi ZRK "Mistral'" zbyvaye rosiys'kykh shakhidiv" [Ukrainian forces demonstrate how French Mistral SAM shoots down Russian Shaheds]. URL: <https://expres.online/podrobisi/zsu-pokazali-yak-frantsuzkiy-zrk-mistral-zbivae-rosiyski-shakhedi-video/> [in Ukrainian]

7. "Chy mozhut' bezpilotnyky-perekhoplyuvachi zakhystyty nebo Ukrayiny?" [Can drone interceptors protect Ukraine's skies?]. URL: <https://vgi.com.ua/chy-zmozhut-drony-perehoplyuvachi-zahystyty-nebo-ukrayiny/> [in Ukrainian]

8. "Tylova oborona vid optovolokonnykh BPLA: ukrayins'ki viys'kovi rozroblyly prostyy, ale efektyvnyy metod"

[Rear defense against fiber-optic UAVs: Ukrainian forces develop a simple but effective method]. URL: <https://dev.ua/news/zakhyst-tylu-vid-optovolonnykh-bpla-zsu-rozroblyly-prosty-ale-diievyi-sposib-1759233546/> [in Ukrainian]

9. "Zakhyst vid droniv: rybal's'ki sitky z Daniyi dopomahayut' ukrayins'kym soldatam vyzhyty (foto)" [Drone protection: fishing nets from Denmark help Ukrainian soldiers survive (photo)]. URL: <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/695983-zakhyst-vid-droniv-ribalski-sitki-z-daniyi-dopomagayut-biycyam-zsu-vizhiti-detali-foto/> [in Ukrainian]

10. "Shvetsiya postachaye na peredovu sitky dlya borot'by z droniv" [Sweden delivers anti-drone nets to the front line]. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/shvetsiya-siti-drony-front/33552254.html/> [in Ukrainian]

11. Solomatin D., Sedliar A. and Pasichnyk V. (2024), Substantiation of technical characteristics for active protection systems of armored vehicles against FPV-drones and drones with "drops". *Military Science*, No. 2 (4), p. 9. DOI: 10.62524/msj.2024.2.4.9 URL: <https://themilitaryscience.com/index.php/journal/article/view/103>

12.. Kovalchuk V.I. and Honcharenko O.M. Analysis of the effectiveness of countermeasures against unmanned aerial vehicles at the tactical level. *Collection of Scientific Works of KhNUPS*, 4(70), pp. 112–118. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-journals/>

13. Melnyk, S.P. and Kravets, I.O. Technical aspects of using mesh barriers for protection against FPV-drones. *Bulletin of KhNUPS*, 2(68), pp. 89–94. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-journals/>

14. Bondarenko, A.V. and Sydorenko, T.M. Study of mechanical properties of polymer materials for the manufacture of protective nets. *Scientific Bulletin of the NADPSU*, 3(101), pp. 56–62. Available at: <https://academy.gov.ua/naukovi-vidannya/>

15. Grytsenko, Yu.M. and Lytvynenko, O.V. Prospects for the use of mesh structures in state border protection systems. *Collection of Scientific Works of NADPSU*, 2(98), pp. 73–78.

ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ УБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ВІД ПОВІТРЯНИХ ЗАГРОЗ

Л.Д. Величко, Н.М. Гузик, Н.Б. Сокульська, О.В. Білаш

У статті розглядається інноваційний підхід до захисту об'єктів від безпілотних літальних апаратів (БпЛА) – застосування антидронових сіток із пружним кріпленням верхньої частини до нерухомих опор. Описано фізичні та експлуатаційні недоліки традиційних жорстко закріплених сіток та обґрунтовано переваги пружного кріплення. Побудовано математичну модель моменту зіткнення дрона з горизонтально розміщеною підпружиненою смугою. Встановлено функціональну залежність, яка дозволяє визначати вплив коефіцієнта нелінійності та жорсткості пружини на величину максимального переміщення вниз центральної точки підпружиненої смуги, що дає змогу оптимізувати параметри кріплення для забезпечення балансу між міцністю й еластичністю. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових типів захисних споруд, адаптованих до польових умов і сучасних загроз.

Ключові слова: захист від БпЛА, захисні конструкції, антидронові сітки, пружне кріплення.

УДК 624.012; 62.505.5

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.176-184>С.В. Королько^{1*}, О.О. Левковський², М.А. Саницький², Т.П. Кропивницька²¹ Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного² Національний університет «Львівська політехніка»

ЗАХИСНІ УКРИТТЯ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ МІЦНІСТЮ НА ОСНОВІ ФІБРОБЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

У статті розглядаються проблеми традиційних бетонних укриттів, які застосовуються у сучасних умовах воєнних дій і терористичних загроз. Визначено ключові питання обмеженого застосування залізобетону унаслідок його низької ударної міцності та схильності до спалінгу (spalling). Проаналізовано сучасний стан захисних укриттів та фортифікаційних споруд для захисту особового складу, цивільних та військових об'єктів. Запропоновано використання фібробетонів нового покоління з тривимірним мікроармуванням як перспективного матеріалу для створення споруд з підвищеною ударною міцністю та стійкістю до вибухових навантажень. Окрема увага приділяється модульним захисним укриттям типу «Хоббіт-Хаус», що є інноваційним напрямом у створенні сучасних технічних рішень як для захисту цивільного населення, так і для різноманітних бліндажів, опорних пунктів та фортифікаційних споруд.

Ключові слова: крихке руйнування, спалінг, вибухостійкість, фібробетон, ударна міцність, модульні укриття, Хоббіт-Хаус.

Постановка проблеми

Системи цивільного захисту в Україні та світі стикаються з безпрецедентними викликами. Масовані ракетні обстріли, вибухові навантаження, авіаудари вимагають нових підходів до інженерного захисту людей. Традиційний залізобетон, що десятиліттями був основою захисних споруд, показав низьку ефективність у протистоянні до високошвидкісних ударів [1, 2, 3]. Найбільшою проблемою є крихке руйнування матеріалу. Розвиток сучасних композиційних захисних матеріалів, зокрема фібробетонів нового покоління, відкриває нові можливості для підвищення надійності укриттів.

Бетонні укриття в Україні є одним із ключових елементів захисту цивільного населення та об'єктів критичної інфраструктури. З початком активних бойових дій, особливо у 2023–2025 роках, через постійні атаки ракетами, дронами-камікадзе (БПЛА типу Shahed) та артилерією актуальність будівництва укриттів значно зросла [4, 5]. Такі укриття переважно будують з армованого бетону, що має товсті стіни та перекриття і дозволяє витримувати вибухову хвилю, уламки та навіть часткове завалення [3, 5]. Часто для цивільного захисту активно використовуються старі

радянські захисні споруди (сховища ПРУ), проте їх стан та особливо умови перебування цивільного населення в укритті не завжди відповідають вимогам.

У деяких випадках використовуються модульні конструкції, які можна швидко встановити у районах з підвищеною небезпекою, проте їх кількість є недостатньою, особливо в зонах бойових дій.

Традиційні бетони класу С20/25 і вище характеризуються низькими показниками міцності та крихким характером руйнування. Часто при виготовленні звичайних залізобетонних укриттів не враховуються такі характеристики, як ударна міцність, тріщиностійкість та спалінг. Ці показники відіграють першочергову роль стійкості бетонних укриттів під час високошвидкісного удару. Внаслідок дії удару чи вибухової хвилі основна частина енергії поглинається матеріалом, що призводить до швидкого поширення тріщин. В умовах вибуху з внутрішньої поверхні конструкції відшаровуються та викидаються уламки бетону. Цей ефект створює додатковий фактор ураження, небезпечний для людей. Після серії ударів чи вибухів несуча здатність конструкцій різко знижується, а відновлення укриттів у польових умовах є практично недоцільним та складним завданням [8].

Article history: Income 25 September 2025; Revised 30 September 2025; Accepted 30 October 2025; Print 05 December 2025

Королько С.В. ORCID ID: 0000-0002-3683-1506, Левковський О.О. ORCID ID: 0000-0001-5941-0477,
Саницький М.А. ORCID ID: 0000-0002-8609-6079, Кропивницька Т.П. ORCID ID: 0000-0003-0396-852X

* Corresponding author korolkos@ukr.net

© Королько С.В., Левковський О.О., Саницький М.А., Кропивницька Т.П.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

Узагальнюючи вищенаведене, виникає потреба у розробленні сучасних гібридних захисних укріплень та споруд підвищеної ударної міцності на основі фібробетонів нового покоління, які б забезпечували підвищені показники міцності до ударних навантажень та стійкості до тріщиноутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних захисних споруд свідчить, що більшою мірою вони монтуються на основі складальних модулів, які створені з урахуванням сучасних вимог щодо стійкості до ударної хвилі. Серед них – мобільні укриття із залізобетону, спеціальні контейнери, труби великого діаметра або бетонні кільця з перепрофільованих елементів [5, 8, 12]. У багатьох місцях з'явилися «модульні укриття» з товстостінного бетону або металу, які розраховані на короткочасне перебування під час обстрілу. Разом з тим, їх кількість в Україні, враховуючи постійні атаки ворога та умови перебування в цих укриттях, є недостатньо ефективними.

Особливістю укриттів в Україні є їх адаптація до різних типів **загроз** від артобстрілів, ракет, а також до атак БПЛА. Значну роль відіграє доступність та швидкість спорудження укриттів, тому багато бетонних конструкцій є розбірними з можливістю швидкого демонтажу для переміщення в інше місце. У цивільному секторі спостерігається використання напівзаглиблених конструкцій із додатковими захисними екранами.

Значна увага покладається на відновлення та модернізацію існуючих споруд для цивільного захисту, які б відповідали сучасним вимогам щодо міцності та стійкості до ударних навантажень [8, 9].

В цьому плані активно почали працювати школи та заклади освіти. Зведення укрить та захисних споруд для шкіл і навчальних закладів достатньо ефективно запрацювало в більшості регіонів країни. За інформацією представників ДСНС, майже 80% шкіл уже обладнано діючими бомбосховищами та укриттями [16]. При цьому саме діти та освітяни залишаються вразливою категорією, яка потребує особливого захисту в умовах повітряних атак та надзвичайних ситуацій.

У військовій сфері актуальними є використання зміцнених бліндажів, опорних пунктів, командних та спостережних засобів [17, 18]. У цих випадках активно застосовуються традиційні збірні бетонні блоки, плити, залізобетонні конструкції, колоди з дерева, габіони, земляні насипи, а також модульні броньовані елементи, здатні витримати артилерійські обстріли та удари дронів-камікадзе, на рис. 1 подано типові укриття бліндажів та захисних бетонних споруд.



Рис. 1. Загальний вигляд діючих захисних споруд:
а – типові бліндажі в заглибленнях;
б – залізобетонне укриття

Міцність таких захисних споруд, а тим паче деревних колод та габіонних елементів не завжди відповідає необхідним вимогам за показниками та вимогам європейських стандартів [6, 7]. Так, міцність залізобетонного звичайного укриття досягає класу бетону не вище С20/25. Така конструкція не може забезпечити довготривалий захист після багаторазових ударів. Згідно із стандартами на вогневі споруди ВС1, ВС3 передбачено тільки вимоги щодо міцності бетону на стиск з використанням базових компонентів: цементу, піску, залізних армованих конструкцій та щебеню.

У зв'язку з цим, одним із завдань, які стоять перед військово-промисловим комплексом України, є створення сучасних монолітних укрить з підвищеною ударною міцністю на основі фібробетонів нового покоління, які здатні витримувати прямі удари артснарядів та атак БПЛА, забезпечуючи при цьому максимальний захист особового складу, техніки та цивільного населення.

Сучасні українські бліндажі часто мають багатоповову структуру – поєднання дерева, бетону, геотекстилю, піску та арматури. Вони забезпечуються вентиляцією, електроживленням та мають окремі виходи. В умовах позиційної війни особливо актуальні капітальні підземні укриття, які витримують навіть кілька прямих попадань.

На відміну від типових захисних укрить, в Україні пропонуються високো захищені конструкції, такі як: укриття «ТРО-модулів», спеціальні конструкції для захисту особового складу, залізобетонні капоніри для техніки, бліндажі з бетонних «блоків Лего» та швидкозбірні елементи, які легко перевозити та монтувати. Порівнюючи українські укриття із закордонними аналогами, слід зазначити, що в багатьох арміях НАТО також застосовуються модульні, швидкокомтовані конструкції, наприклад, з HESCO-блоків, «ARPA shelter systems», кам'яно-земляних укріплень [12]. Однак у країнах Заходу більший акцент робиться на логістичну мобільність, стандартизованість та інтеграцію укриття в інженерні системи (електрика, вентиляція, фільтрація повітря тощо... В Ізраїлі для захисту цивільного населення широко використовуються так звані залізобетонні мамоди – укриття у багатоквартирних будинках [12, 14, 15]. Разом з тим,

в ізраїльській армії для захисту особового складу застосовують пересувні захисні модулі, здатні витримувати удари ракет класу «Град». У країнах Балтії, які готуються до можливих конфліктів, укриття облаштовуються заздалегідь у рамках стратегічного планування території.

Натомість в Україні розвиток сучасних укриттів здебільшого спрямований як оперативна відповідь на наявні загрози. Варто зазначити, що використання сучасних композитних матеріалів (базальтовий фібробетон, полімерні елементи, геосинтетика) в українських умовах стає дедалі поширенішим, що у поєднанні з традиційними матеріалами забезпечує оптимальний баланс захисту укриття, швидкості будівництва та вартості.

Традиційний залізобетон, що десятиліттями був основою захисних укриттів та споруд, показав низьку ефективність у протистоянні з високомодульними захисними конструкціями. Найбільшою проблемою в бетонних захисних спорудах є крихке руйнування матеріалу, зумовлене низькою ударною міцністю та явищем спалінгу [13].

Ударна міцність – це здатність матеріалу чинити опір раптовому короточасному навантаженню або удару. Вона показує, скільки енергії може поглинути матеріал при ударі перед тим як зруйнуватись. Вимірюється ударна міцність за допомогою спеціальних тестових випробувань (наприклад, випробування за методом «Шарпі»). Чим більша ударна міцність, тим краща стійкість матеріалу до утворення тріщин. Внаслідок ударного навантаження в бетоні проявляється також явище спалінгу (spalling).

Спалінг – це відшарування або відколювання окремих частинок матеріалу з його поверхні внаслідок сильного механічного або теплового впливу. Спалінг може виникати при ударі або вибуху (броня, бетон, метал, армування, кераміка), раптовому нагріванні або охолодженні окремих шарів конструкції, виникненню внутрішнього тиску та напружень. Найчастіше це трапляється з бетоном, коли волога проникає всередину, викликаючи корозію арматури. При цьому розширення сталі внаслідок іржавіння призводить до утворення мікротріщин на поверхні, які згодом розкриваються, посилюючи подальше руйнування [11, 12, 13].

Явище спалінгу особливо небезпечне для захисних споруд і проявляється, коли уламки внутрішньої поверхні захисного укриття можуть відколюватися з внутрішнього боку. Під час потрапляння снаряда у таку конструкцію зовнішня поверхня перешкоди частково гасить частину кінетичної енергії, руйнуючи поверхневу зону бетону. Після цього іде зона спалінгу, яка під високими стискаючими зусиллями може спричинити розриви на внутрішньому боці захисного матеріалу. При цьому уламки (спали) матеріалу відриваються і

набувають швидкості від поділу енергії. Ці уламки летять всередину з високою швидкістю та можуть пробити захист і поранити особовий склад.

Розгляд сучасних підходів щодо захисту особового складу та створення моделей армованих захисних споруд вимагає застосування сучасних фібробетонів та нових технічних рішень. Перш за все, підвищення стійкості захисних споруд визначається на основі імовірнісної оцінки впливу частоти й інтенсивності ударних навантажень для різних сценаріїв ураження, ймовірності пробиття, сплавлення чи відколювання частинок (spall), пошкодження несучих елементів, ризик загоряння, допустимі деформації та залишкова несуча здатність.

Однією з ключових проблем при створенні тривимірних бетонних конструкцій є недостатня їх стійкість до тріщиноутворення під впливом ударних навантажень [9, 10, 11].

Традиційні методи армування не завжди можуть забезпечити рівномірне зміцнення системи в об'ємі матеріалу. Саме тому фібропідсилення розглядається як перспективна технологія для поліпшення механічних характеристик бетону. Фібра створює внутрішню тривимірну просторову структуру, що підвищує жорсткість конструкції. Металева, полімерна або базальтова фібри виконують роль мікроармування та знижують ризик утворення мікротріщин. Поєднання тривимірної структури фібробетону сприяє рівномірному розподілу навантаження в різних напрямках. Важливо оптимально підібрати тип, довжину, концентрацію та вид фібри для забезпечення необхідної міцності й пластичності бетону, оскільки не завжди рівномірний розподіл фібри або її агломерація в окремих зонах може спричинити ослаблення конструкції, тому важливо забезпечити необхідні методи змішування та укладання бетону, щоб гарантувати рівномірність армування. Загалом, використання фібри в тривимірних бетонних структурах є ефективним засобом зміцнення структури та зменшення явища спалінгу.

Серед типових систем підвищення захисних функцій фібробетонів на перший план висувається так звана багатошарова концепція підвищення ударної міцності та тріщиностійкості. Типовий вигляд двошарової конструкції подано на (рис. 2). Стрілки на рисунку показують напрямок удару і траєкторію руху уламків, а зона спалінгу в основному направлена в бік від основного фронту удару. Багатошарові рознесені шари різних матеріалів поетапно гасять кінетичну енергію удару. Особливо це проявляється з використанням амортизуючих та енергоабсорбуючих вставок [3, 4, 5, 19].

Використання багатошарових матеріалів забезпечує зменшення просторового навантаження на основну конструкцію та забезпечує стійкість

бетонної споруди в цілому. У зв'язку з цим, використовуються технології спал-лайнера - підкладки між зовнішнім та внутрішнім шарами. Це фіксує (гальмує) уламки, знижує їх енергію та розліт. При цьому внутрішня захисна конструкція повинна зберігати каркасну структуру навіть при багаторазовому ударному навантаженні та захищати викид уламків всередину тіла.



Рис. 2. Типова двохшарова модель укриття
а – типовий шар дворівневого захисту;
б – зона спалінгу в матеріалі бетону із спал-лайнєровою підкладкою

Часто в якості додаткових перешкод перед основною бетонною конструкцією використовують додаткові захисні матеріали, сітки, троси, зовнішні екрани сакрифіційні панелі, монолітні оболонки з додаткового армованого бетону та композитів або внутрішні енергоакумулюючі шари для поглинання ударної хвилі [3, 19].

Розвиток сучасних захисних матеріалів з використанням фібробетонів нового покоління, що характеризуються підвищеною стійкістю до ударних навантажень в просторовій структурі внутрішнього захисного шару, відкриває нові можливості захисних споруд, які б забезпечували підвищені показники тріщиностійкості до ударних навантажень внаслідок виникнення явища спалінгу.

Мета досліджень

Метою статті є аналіз сучасного стану діючих та новітніх сучасних захисних бетонних укриттів та фортифікаційних споруд із врахуванням явища спалінгу та застосуванням фібробетонів нового покоління для захисту особового складу, які відповідають сучасним вимогам за міцністю та стійкістю до ударних навантажень.

Виклад основного матеріалу

Фібробетони нового покоління можна віднести до композиційних матеріалів, у яких рівномірно розподілені волокна, що забезпечують тривимірне армування структури. Застосування сталєвої, поліпропіленової, базальтової та гібридної фібри дозволяє поєднати міцність, вогнестійкість та енергопоглинання від ударних навантажень. До переваг фібробетонів можна віднести підвищену ударну міцність, зниження ймовірності спалінгу та збереження несучої здатності після серії ударів.

Для вивчення властивостей традиційного залізобетону і фіброармованого бетону нового покоління проведено порівняння їх параметрів, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри залізобетону та фібробетону

Параметр	Залізобетон	Фібробетон нового покоління
Ударна міцність	Низька, крихке руйнування	Високе енергопоглинання у 2–4 рази більше
Стійкість до спалінгу	Високий ризик відшарування уламків	Знижений ризик, фібра утримує уламки
Тріщиностійкість	Низька	Висока, завдяки мікроармуванню
Довговічність	Знижується після серії ударів	Зберігає міцність навіть після багаторазових ударних навантажень

Актуальним є вивчення залежності розвитку явища спалінгу від ударної хвилі. Для аналізу порівняльних досліджень та ризиків тріщиноутворення введено коефіцієнт сапалінгу R , який характеризує співвідношення $\sigma_{t,max} / f_{t,dyn}$.

У зв'язку з цим проведено порівняльні дослідження коефіцієнта спалінгу від величини пікового надлишкового тиску p_s (рис. 3). Представлений графік показує залежність показника ризику спалінгу $R = \sigma_{t,max} / f_{t,dyn}$ від пікового надлишкового тиску p_s вибухової хвилі. Так для звичайного залізобетону поріг спалінгу R більше 1 проявляється при надлишковому тиску $p_{s,cri}$, який у порівнянні з статичним тиском вдвічі більший за динамічний тиск $f_{t,dyn}$.

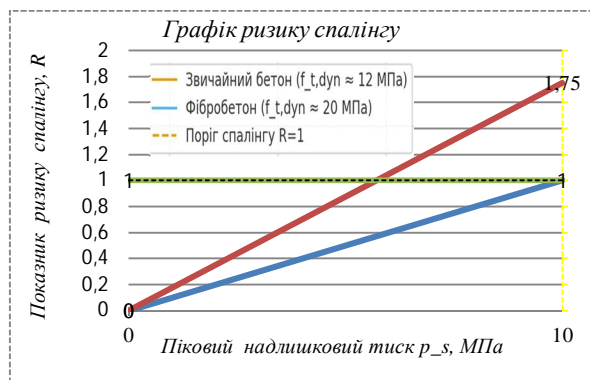


Рис. 3. Залежність показника ризику спалінгу R від пікового надлишкового тиску p_s , МПа, де: R – поріг салінгу; p_s – піковий надлишковий тиск

При сталому вдвічі більшому співвідношенні пікового статичного надлишкового тиску $p_{s,crit}$, МПа та динамічного тиску $f_{t,dyn}$, МПа можна відобразити типову картину оцінки ризику салінгу в залізобетонних конструкціях та фібробетонах нового покоління

$$p_{s,crit} = f_{t,dyn} / 2.$$

Так, для звичайного залізобетону при статистичному навантаженні співвідношення $f_{t,dyn} = 10$ МПа, а $p_{s,crit} \approx 6,0$ МПа. Тоді як для фібробетону при цих же умовах $f_{t,dyn}$ буде становити 20 МПа, а $p_{s,crit}$ відповідно 10 МПа. Підвищення динамічного навантаження $f_{t,dyn}$ за рахунок використання армуючих волокон зміщує поріг кривої праворуч та зменшує ймовірність спалінгу при фіксованому надлишковому тиску p_s .

В результаті порівняльних досліджень механізму впливу ударної хвилі на будівлі та споруди та аналізу руйнівних ефектів, що виникають внаслідок вибухів або інших джерел, що створюють ударні хвилі, можна передбачити появу спалінгу. Результати досліджень можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо проектування будівель, підвищення їх стійкості до вибухових навантажень та мінімізації наслідків руйнувань.

Ударна хвиля – це область різкого стискання атмосферного тиску з висотою, яка у вигляді сферичної хвилі розповсюджується в усі боки від місця вибуху зі швидкістю, що перевищує швидкість звуку. В результаті ударної хвилі близько до джерела виникає зона сильних руйнувань (надлишковий тиск у фронті ударної хвилі становить від 30 до 50 кПа) [5, 19]. У цій зоні наземні будинки і споруди одержують сильні руйнування, утворюються місцеві завали, виникають суцільні і масові пожежі. Більшість сховищ буде збережена, проте в окремих сховищах можуть бути завалені входи і виходи. Застосування

фібробетонів нового покоління дає змогу підвищити міцність захисних укриттів під час ураження вибуховою хвилею.

Фібробетони нового покоління формуються шляхом введення сталевих, полімерних, базальтових та гібридних волокон, які створюють тривимірне мікроармування. Це суттєво підвищує ударну міцність та енергопоглинальну здатність бетону. В умовах сучасних загроз, актуальним є підвищення ударної в'язкості бетонів, що використовуються для їх зведення. Показник ударної в'язкості (англ. impact toughness) характеризує здатність матеріалу поглинати енергію при ударному навантаженні до моменту руйнування. Так, для звичайного важкого бетону класу C32/40 ударна в'язкість є відносно низькою через крихкий характер матеріалу. За даними досліджень [17], значення ударної в'язкості можуть коливатися для звичайного бетону C32/40 близько 1–3 кДж/м², а енергія руйнування при одиничному ударі ≈ 5 –15 Дж (залежно від типу випробування). Натомість, для дисперсно-армованих фібробетонів (з сталевую, базальтовою або комбінованою фіброю) ударна в'язкість зростає від 8 до 30 кДж/м². Тобто, величина енергії руйнування може зростати в межах від 3 до 10 разів. Особливо високі показники досягаються при використанні сталевих фібри в кількості 0,5–1,5% за об'ємом та з довжиною волокон від 20 до 50 мм.

Застосування фібри знижує ризик утворення спалінгу, утримуючи уламки та гальмуючи розвиток тріщин. Додатковими перевагами є сумісність з сучасними суперпластифікаторами та нанодобавками, підвищена тріщиностійкість, довговічність і можливість виготовлення самоущільнювальних та швидкотверднучих сумішей.

У сучасному будівництві споруд дедалі ширше застосовуються суперпластифікатори нового покоління (гіперпластифікатори), основою яких зазвичай є полікарбоксилатні етери. Ці хімічні добавки призначені для значного підвищення рухливості бетонної суміші без збільшення водоцементного співвідношення. Завдяки електростатичному відштовхуванню та стеричному ефекту, ці гіперпластифікатори забезпечують стабільну дисперсію цементних частинок, що у свою чергу сприяє рівномірному твердненню та зменшенню усадки. Це особливо важливо при виготовленні високоміцних, самоущільнюючих і довговічних фібробетонів, які використовуються в сучасних захисних спорудах [8, 10, 11]. Крім того, застосування гіперпластифікаторів дозволяє зменшити кількість цементу в суміші, знижуючи витрати на матеріали та екологічне навантаження [8, 9]. Ще однією перевагою є подовжений час збереження рухливості бетонної суміші, що полегшує транспортування та укладання бетону на великих

об'єктах. Сучасні дослідження та інноваційні розробки зосереджені на удосконаленні структури полікарбонатів для підвищення сумісності з різними типами цементу, що відкриває нові перспективи для інновацій у бетонних технологіях та створення на їх основі нових композитних матеріалів, які можна назвати балістичними бетонами нового покоління.

Поряд з основними характеристиками сучасні високоміцні фібробетони для захисних укриттів повинні відповідати класу в межах C30/37...C45/55. Це важкий бетон, що використовується для споруд із підвищеними вимогами до міцності та довговічності. Такий бетон забезпечує високу опірність до механічних ударних навантажень та агресивних впливів середовища. Основними аспектами формування фібробетонів нового покоління з підвищеною ударною в'язкістю є об'єктивний підбір складу бетону, його параметри рухливості та кінцеві характеристики сформованої конструкції.

В якості в'язучого компоненту для фібробетону рекомендовано використовувати портландцементи СЕМ ІІ/А-С 42,5 R ПрАТ «Івано-Франківськцемент», кварцовий пісок, гранітний або базальтовий щебінь фракції 5-20 мм, а також полікарбонатний суперпластифікатор, мінеральні добавки, сталеву фібру (30-60 мм) та полімерні або базальтові волокна. При цьому найбільш ефективним є використання комбінованих видів фібри, які забезпечують формування комплексної матриці бетону. Матриця містить як сталі, так і мікрофіброві волокна. Типові представники фібру з різним ефектом дії представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Дія різних типів фібру на матрицю бетону

Тип фібри	Дія фібри в матриці бетону
Сталева фібру (30-60 мм)	Підвищує енергоємність руйнування, гасить тріщини
Базальтова фібру	Підвищує термічну стійкість та тріщиностійкість
Поліпропіленова фібру	Знижує утворення мікротріщин, особливо при нагріванні

Використання багатофракційних заповнювачів, покращує щільність структури бетону та зменшує кількість мікропор і капілярів, зменшуючи зону локалізації напружень при ударі. Вони зменшують пористість, підвищують зв'язок цементного каменю та заповнювача, знижують водоцементне відношення ($B/C \leq 0,38$), що сприяє зменшенню капілярної пористості, підвищенню щільності цементного каменю та надзвичайно важливо при ударному навантаженні. При цьому в зовнішньому армуванні у практиці фортифікації застосовують фібробетон в комплексі із зовнішнім шаром полімербетону або їх комбінування з амортизуючими прошарками (гумові мати, ізоляція).

До основних показників ударостійкого балістичного бетону класу C45/55 можна віднести фібробетони з міцністю на стиск: ≥ 55 МПа, модулем пружності ≥ 35 ГПа, міцністю на розтяг при згині ≥ 8 МПа.

При цьому балістичні бетони проявляють високу тріщиностійкість та зниження ефекту спалінгу. Для об'єктивного порівняльного аналізу стійкості традиційних залізобетонних укриттів та сучасних фіброармованих захисних споруд наведено їх основні параметри в умовних балах (рис. 4). Аналіз основних характеристик бетонів показує, що фіброармовані бетони нового покоління у порівнянні з традиційним залізобетоном в декілька разів перевищують свої показники за більшістю основних їх характеристик.

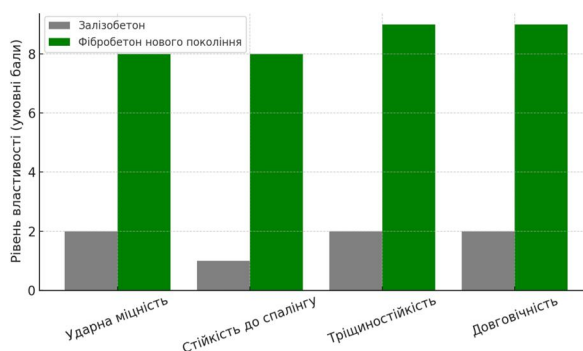


Рис. 4. Порівняльна характеристика традиційного та фіброармованого бетону нового покоління

Застосування інноваційних технологій та сучасних технічних рішень як для захисту цивільного населення, так і при виготовленні різноманітних бліндажів, опорних пунктів та фортифікаційних споруд у військовій справі активно використовується сучасними підприємствами, зокрема компанією «Hobbit House», яка спеціалізується на виробництві модульних захисних укриттів для цивільного захисту. Такі бетонні захисні укриття відзначаються високою міцністю та швидким монтажем [15, 19]. Ці укриття призначені для індивідуального та масового захисту населення, а також для використання підприємствами та енергетичними компаніями (рис. 5).



Рис. 5. Захисне укриття «Будинок Хоббіта»: а – типовий вигляд, б – напівзаглиблене укриття

Модульні укриття Hobbit House здатні витримувати повітряну ударну хвилю тиском 100, 200 або 300 кілопаскалів, що втричі перевищує державний

стандарт для укриттів цивільного захисту [19]. Для порівняння, ударна хвиля тиском 100 кПа може зрушити танк з місця та є смертельною для людини.

До переваг таких укриттів можна віднести модульність (укриття складаються з окремих модулів), що дозволяє швидко збирати конструкцію на місці, встановлювати та адаптувати її до необхідної місткості та призначення. Ця конструкція обладнана наземними вертикальними ребрами жорсткості (контрфорсами) згідно з нормами ДСТУ 9195:2022, що підвищує їхню стійкість до зовнішніх навантажень та універсальність конструкції. Такі укриття можуть бути використані як для особистого захисту, так і для захисту закладів освіти, підприємств та інших об'єктів інфраструктури.

Модульні оболонкові конструкції типу «Hobbit House» є інноваційним рішенням для швидкого будівництва укриттів. Сегментні елементи, які виготовлені з фібробетонів нового покоління, забезпечують підвищену стійкість до вибухових хвиль та ударних навантажень. Модульність дозволяє швидко розгортати споруди у зонах бойових дій, а також здійснювати їх ремонт і модернізацію.

В результаті аналізу застосування фібробетону з підвищеними характеристиками стійкості до ударних навантажень та зниженим показником салінгу можна запропонувати наступні перспективні шляхи розвитку:

1. Використання 3D-друку для виготовлення фібробетонів та їх швидкого будівництва і монтажу фібробетонних елементів конструкції.

2. Підвищення енергоефективності та комфортності укриттів.

3. Стандартизація модульних рішень для військових технологій та цивільного захисту.

Висновки

1. У статті проведено комплексний аналіз сучасного стану захисних укриттів та показано, що використання фібробетонів нового покоління дозволяє значно підвищити їх ударну міцність та стійкість до вибухових навантажень.

2. Явище спалінгу у фібробетонних конструкціях може бути зведене до мінімуму завдяки введенню фібри та оптимізації складів модифікованих бетонів.

3. Впровадження нових технічних рішень з використанням багатопшарових фібробетонних матеріалів та демпферованих підкладок підвищить ефективність комплексної системи захисту ударопоглинаючих балістичних фібробетонів.

4. Модульні рішення на основі фібробетонів оболонкового типу «Хоббіт Хаус» відкривають нові можливості у створенні сучасних захисних і фортифікаційних споруд.

5. Створення гібридних високоміцних фібробетонів можна віднести до сучасних балістичних

бетонів нового покоління, які створюють більш якісніші та надійніші умови для збереження життя і захисту особового складу від типових загроз в умовах війни.

Список літератури

1. Юрченко В., Соколовський І. Шляхи удосконалення інженерно-технічних заходів цивільного захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах особливого періоду. *Науковий вісник: Державне управління*. 2023. № 1 (13). [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312)
2. Беліков А. С., Налисько М. М., Подкопаєв С.В.З., Шиба О. В., Журбенко В. М. Використання захисних модульних споруд та захист населення в умовах воєнного стану на території України. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 2 (026). 2025, К. КНУБА. С. 7-17. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.07.1138>
3. Neville A.M. *Properties of Concrete*. Pearson Education, 2011. <http://www.pearsoned.co.uk>
4. Jacobsen E.K., Kristoffersen M., Dey S., Borvik T. Sustainable shielding: Ballistic performance of low-carbon concrete. *Construction and Building Materials* 415. 2024. 135103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135103
5. Мартиновський К., Плоский В., Михальченко С., Скочко В. Аналіз впливу дії ударної хвилі на будівлі і споруди. *Build-Master-Class-2024 : International scientific conference of young scientists*, Kyiv, 5-7 november 2024 Kyiv : KNUBA, 2024. С. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1
6. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту : [Введений у дію з 01-11- 2023]. К.: Мінеріон України, 2023. 112 с.
7. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-7:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991-1-7:2006/A1:2014, IDT). Зміна № 2:2018.
8. Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V., Karakouzian M. Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers. *Materials* 2022, 15, 7157. <https://doi.org/10.3390/ma15207157>
9. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Shyiko O., Bobetsky Y., Volianiuk A. High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. 2023. Vol. 5, № 1. pp. 37–42. <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.037>
10. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 438. pp. 362–371. DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_36
11. Королько С.В., Саницький М.А., Кропивницька Т.П., та інші Перспективи використання високоміцних фібробетонів як основи формування захисних укриттів та фортифікаційних споруд під час російсько-української війни. *Військово-технічний збірник*. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.25-33>
12. Han S., Kim G., Han S., Lee Y., Eu H., Choi Y. J. Residual impact resistance of hybrid fiber-reinforced cementitious composites after thermal degradation. *Construction and Building Materials*. Vol. 472, 18 April 2025, 141002 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141002>

13. Esaker M., Thermou G. E., Neves L. Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 180, October 2023, 104722 DOI: doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722

14. Malik T.V., Kovalyov, Yu. M. Kalashnikova V. V., Nerusheva V. M. Multi-criteria optimization of civil shelters design in Ukraine taking into account israeli experience № 2 2023. DOI: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15

15. Левковський О.О. Левковська І. М. "Модульне захисне сховище". Пат. на корисну модель № 151558 Номер заявки u202201417 Дата подання заявки - 03.05.2022, Опубліковано 10.08.2022.

16. https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3954589

17. Волощенко О.І., Косенко В.С., Ковбаса О.Ю., Черних І.В., Капля І.О. Методичний підхід щодо визначення стійкості конструкцій покриття польових фортифікаційних споруд до ударновивбухової дії сучасної ракетної зброї. *Вісник: Опір матеріалів і теорія споруд*. 2023. КНУБА № 111 С. 178-187. doi: 10.32347/2410-2547.2023.111.178-187

18. Коцюрuba В.І., Білик А.С., Бзот В.Б., Дзевєрін І.Г. Захист об'єктів критичної інфраструктури України від прямих влучань ракет за допомогою підземного розташування. *Журнал ISSN 2073-6321. Ядерна та радіаційна безпека*. 2(98). 2023. С. 69-79. DOI: https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).07

19. https://hobbithouse.com.ua/

References

1. Yurchenko V. and Sokolovskiy I. (2023), "Shliakhy udoskonalennia inzhenerno-tehnichnykh zakhodiv tsyvilnoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury v umovakh osoblyvoho periodu" [Ways to improve engineering and technical measures for the protection of civil infrastructure facilities in the conditions of a special period]. *Scientific Bulletin: Public Administration*, No. 1(13). https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312 [in Ukrainian]

2. Bielikov A.S., Nalysko M.M., Podkopaiev S.V., Shyba O.V. and Zhurbanko V.M. (2025), "Vykorystannia zakhysnykh modulnykh sporud ta zakhyst naselennia v umovakh voiennoho stanu na terytorii Ukrainy" [Use of modular shelters and shelters for the population in conditions of martial law on the territory of Ukraine]. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, № 2(026), pp. 7–17. DOI: https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.07.1138 [in Ukrainian]

3. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education, 2011. http://www.pearsoned.co.uk

4. Jacobsen E.K., Kristoffersen M., Dey S., Borvik T.. Sustainable shielding: Ballistic performance of low-carbon concrete. *Construction and Building Materials* 415 (2024) 135103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135103

5. Martynovskiy K., Ploskiy V., Mykhalchenko S. and Skochko V. "Analiz vplyvu dii udarnoi khvyli na budivli i sporudy" [Analysis of the impact of shock waves on buildings and structures]. In *Build-Master – 2024: International Scientific Conference of Young Scientists*, Kyiv, 5–7 November 2024. KNUBA, 2024, pp. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1 [in Ukrainian]

6. (2023), DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu [Civil defense structures]. Kyiv: Minregion Ukrainy. 112 p. [in Ukrainian]

7. (2018), DSTU-N B EN 1991-1-7:2010. "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General actions – Accidental actions" [Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General actions – Accidental actions]. Kyiv. (Amendment No. 2). [in Ukrainian]

8. Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V. and Karakouzian M. (2022), Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers. *Materials*, 15, 7157. https://doi.org/10.3390/ma15207157

9. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Shyiko O., Bobetsky Y. and Volianiuk A. (2023), High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. Vol. 5, № 1. pp. 37–42. https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.037

10. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O. and Bobetsky Y. (2023), Nanomodified ultra high-performance fiber reinforced cementitious composites with enhanced operational characteristics. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 438 pp. 362–371 DOI: 10.1007/978-3-031-44955-0_36

11. Korolko S.V., Sanytsky M.A., Kropyvnytska T.P. and et. "Perspektyvy vykorystannia vysokomitsnykh fibrobetoniv yak osnovy formuvannia zakhysnykh ukryttiv ta fortyfikatsiinykh sporud pid chas rosiisko-ukrainskoi viiny" [Prospects for the use of high-strength fiber concrete as a basis for the formation of protective shelters and fortification structures during the Russian-Ukrainian war]. *Military-Technical Collection*, 2023, pp. 25–33. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.25-33 [in Ukrainian]

12. Han S., Kim G., Han S., Lee Y., Eu H. and Choi Y.J. (2025), Residual impact resistance of hybrid fiber-reinforced cementitious composites after thermal degradation. *Construction and Building Materials*. Vol. 472, 141002. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141002

13. Esaker M., Thermou G.E. and Neves L. (2023), Impact resistance of concrete and fibre-reinforced concrete: A review. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 180, October 2023, 104722. doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104722

14. Malik T.V., Kovalyov Yu.M., Kalashnikova V.V. and, Nerusheva V.M. (2023), Multi-criteria optimization of civil shelters design in Ukraine taking into account Israeli experience. No. 2. DOI: https://doi.org/10.30857/2617-0272.2023.2.15

15. Levkovskiy O.O. and Levkovska I.M. (2022), "Modulne zakhysne skhovyshche. Utility Model Patent No. 151558, Application u202201417, Filed 03.05.2022, Published 10.08.2022" [Modular folding storage. Utility Model Patent No. 151558, Application u202201417, Filed 05/03/2022, Published 08/10/2022]. [in Ukrainian]

16. *Ukrinform*. Ukrainian News Agency. https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3954589 [in Ukrainian]

17. Voloshchenko O.I., Kosenko V.S., Kovbasa O.Yu., Chernykh I.V. and Kaplia I.O. (2023), "Metodychnyi pidkhid shchodo vyznachennia stiikosti konstruksii pokryttia polovokh fortyfikatsiinykh sporud do udarnovybukhovoї dii

suchasnoi raketnoi zbroi" [Methodological approach to determining the strength of the construction of the floor of the fortification structure for the impact of modern rocket weapons]. *Visnyk: Material and theoretical support of structures*, KNUBA, No. 111, pp. 178–187. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.178-187 [in Ukrainian]

18. Kotsiuruba V.I., Bielyk A.S., Bzot V.B. and Dzeverin I.H. (2023), "Zakhyst ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy

vid priamykh vluchan raket za dopomohoiu pidzemnoho rozmishchennia" [Destruction of Ukraine's indoor infrastructure targets by direct missile hits using underground deployment]. *Yaderna ta Radiatsiina Bezpeka*, No.2 (98), pp. 69-79. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).07) [in Ukrainian]

19. Hobbit House Project. <https://hobbithouse.com.ua/> [in Ukrainian]

PROTECTIVE COVERINGS WITH INCREASED IMPACT STRENGTH BASED ON NEW GENERATION FIBER-REINFORCED CONCRETES

S.V. Korolko, O.O. Levkovskiy, M.A. Sanytskyi, T.P. Kropyvnytska

The article examines the shortcomings of traditional concrete shelters used in modern conditions of warfare and increasing terrorist threats. The main problems associated with the limited use of reinforced concrete are identified, in particular its low impact strength and susceptibility to spalling under explosive loads. The current state and effectiveness of existing fortification structures designed to protect personnel, civilians, and critical military facilities are analyzed. The causes of premature failure of concrete structures under intensive dynamic effects are discussed. The necessity of transitioning to the use of new-generation materials capable of providing enhanced safety and durability is substantiated.

The paper proposes the use of fiber-reinforced concretes with three-dimensional micro-reinforcement as a promising material for creating structures with improved energy absorption capacity and high explosion resistance. It is shown that the incorporation of micro- and nanofibers into the concrete matrix significantly reduces the risk of cracking and local failure under impact loading. Special attention is given to modular protective shelters of the "Hobbit House" type, which represent an innovative approach to designing dual-purpose structures. Such constructions combine mobility, ease of installation, and excellent performance characteristics. They can be effectively used not only in the military sphere but also in civil protection during emergencies and typical threat situations. The prospects for implementing new structural solutions based on the combination of fiber-reinforced concrete with other composite materials are considered.

Keywords: brittle failure, spalling, blast resistance, fiber-reinforced concrete, impact strength, modular shelters, Hobbit House, composite materials, micro-reinforcement, fortification structures.

УДК 355.422.16

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.185-193>

Ю.О. Фтемов

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

АНТИДРОНОВИЙ ЗАХИСТ ЯК КЛЮЧОВИЙ ЕЛЕМЕНТ ІНЖЕНЕРНОЇ ПІДТРИМКИ МОБІЛЬНОСТІ ВІЙСЬК (СИЛ) В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ВІЙНИ

У статті проаналізовано сучасні підходи до ведення збройної боротьби, в умовах якої застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) стає важливим інструментом для обмеження мобільності військ (сил) і створення перешикоду для їхнього просування на полі бою. Особливу увагу приділено антидроновим захисним конструкціям тунельного типу, які забезпечують горизонтальний і вертикальний захист об'єктів від ударних дронів. Застосування дронів-камікадзе з автономним або оптоволоконним керуванням розглядається як новий виклик для підрозділів, що відповідають за безпеку на передовій і в тилу. У роботі враховано досвід бойових дій, зокрема в умовах російсько-Української війни, де тактика противника вирізняється асиметричністю та раптовістю. Ворожі дії спрямовані не лише на ураження ключових напрямів, а й на блокування маршрутів постачання, що значно ускладнює функціонування логістичних ланцюгів. Для підвищення мобільності підрозділів і захисту від БпЛА запропоновано комплекс організаційно-підготовчих заходів. Серед них: інтеграція тунельних антидронових систем для прикриття ключових маршрутів, поетапне планування будівництва наземних захисних споруд, а також шляхи оптимізації їхнього використання в умовах бойових дій.

Ключові слова: антидроновий захист, маскування, мобільність, шляхи руху військ (сил).

Постановка проблеми

Інтеграція безпілотних технологій за останні роки кардинально змінила характер ведення бойових дій. Сьогодні безпілотні системи, особливо у контексті війни в Україні, відіграють вирішальну роль у досягненні оперативних цілей – від контролю над територіями до знищення ворожих підрозділів і техніки [1].

За відкритими даними представників силових структур України, до 85% втрат живої сили та озброєння противника припадає саме на бойові БпЛА [2]. Джерела російської федерації фактично підтверджують ці цифри, повідомляючи, що понад 70% поранень були спричинені скиданням боєприпасів або влучанням дронів [3]. Це підкреслює не лише високу ефективність таких систем, а й їхній вплив на тактику наступу й оборони.

Безпілотні роботизовані комплекси фактично змінили уявлення навіть й про традиційну оборону. Замість суцільних ліній рубежів дедалі частіше використовуються мобільні опорні пункти та позиції, які забезпечують гнучкість і маневреність, знижуючи вразливість до атак [4].

Фортифікація, як наука, набула нового значення та потребує негайного перегляду положень

чинних керівних документів (статутів, настанов тощо) з урахуванням набутого бойового досвіду. Її ефективність дедалі більше асоціюється з поверненням до так званої "підземної війни". Відкриті фортифікаційні споруди більше не забезпечують необхідного рівня безпеки – натомість актуальними стають глибокі підземні ходи (до 2,5 м), бетонвані укриття з багаторівневим (2-3) захистом, приховані ходи ("нори"), інженерні антидронові засоби (заслони), димові завіси та інші комплексні заходи [4]. Типові бліндажі без додаткового захисту та маскування легко виявляються та знищуються навіть FPV-дронами.

Завдяки мобільності й здатності проникати в глибокий тил, БпЛА значно ускладнюють організацію та безпеку постачання на всіх етапах логістичного ланцюга (рис. 1). На відстанях до 5 км від лінії бойового зіткнення ефективно уражується техніка й особовий склад, а загальна ефективність логістики може знижуватись до 60–70%. Зона 5–15 км використовується для дестабілізації постачання та створення умов тривалого блокування, що може призводити до значних втрат – ефективність доставки у цій зоні знижується на 40–50%. У діапазоні 15–40 км дрони здатні перерізати ключові шляхи постачання, виявляти та уражати об'єкти у глибині [5, 6].

Article history: Income 20 May 2025; Revised 02 June 2025; Accepted 03 June 2025; Print 05 December 2025

Фтемов Ю.О. ORCID ID: 0000-0003-1709-5395

* Corresponding author fetmoy.yuriy@gmail.com

© Фтемов Ю.О.

ISSN (Online): 2708-5228 / ISSN (Print): 2312-4458

Ліцензія відкритого доступу / Open print license

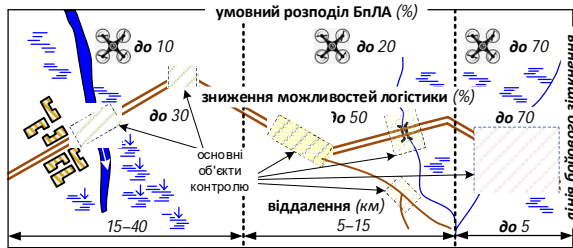


Рис. 1. Вплив БпЛА на ефективність логістики залежно від відстані до лінії бойового зіткнення

Доцільно зауважити, що вплив безпілотних авіаційних систем на процес медичної евакуації поранених має суттєві оперативні та медико-тактичні наслідки. Незахищеність маршрутів і відсутність можливості оперативного прикриття призводять до того, що в окремих випадках час доставки пораненого до етапу надання кваліфікованої медичної допомоги може сягати понад десяти годин. Подібне уповільнення евакуаційних заходів спричиняє зростання летальності серед особового складу.

Застосування БпЛА з оптоволоконним управлінням, яке стало поширеним останнім часом, забезпечує високоточне керування та дозволяє проводити атаки на значні відстані – до 40 км і більше. Такі системи практично не піддаються впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) [7].

Однією з найефективніших форм пасивного захисту від БпЛА типу "камікадзе" є фізичні бар'єри, що забезпечують механічне перехоплення та нейтралізацію дронів до моменту досягнення ними цілі. Важливою перевагою фізичного захисту є його універсальність: він здатен протистояти БпЛА різного типу, включно з високоточними моделями, що використовують оптоволоконні канали зв'язку, які залишаються маловразливими до засобів РЕБ.

Слід зазначити, що протидія включає широкий спектр заходів: маскувальні, переміщення вночі або під природними укриттями (зокрема в лісових масивах), використання техніки, оснащеної засобами протидії дронам [5]. Піхота дедалі частіше переміщується на бронетехніці зі спеціальними захисними укриттями. Обидві сторони також застосовують так звані "тунелі" з сіток (маскувальних, рибальських тощо), якими перекривають дороги – цей метод уперше був застосований російськими військами поблизу міста Бахмут, а згодом його адаптували Сили оборони України на ключових напрямках [8-11]. Втім, такі заходи не гарантують повного захисту і не є універсальним вирішенням проблеми.

Отже, комплексний вплив безпілотних систем на мобільність військ (сил), з урахуванням їхньої здатності ефективно діяти на різних оперативних і тактичних відстанях, обумовлює не лише зміну підходів до ведення бойових дій, а й формування нової концепції сучасної війни. Цей процес висуває на

перший план важливу проблему – пошук нових, більш прогресивних способів інженерної підтримки щодо безпечного пересування підрозділів мережею шляхів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений аналіз джерел [5-11], у яких започатковано вирішення даного питання, свідчить про часткове його розкриття, що в свою чергу спонукає до подальшої розробки відповідних рекомендацій. Існуючий науково-методичний апарат ґрунтується на принципах, розроблених авторами [12-17], і безумовно враховує окремі підходи та способи виконання заходів в загальній системі інженерної підтримки мобільності військ (сил).

Однак отримані результати можуть бути адаптовані до сучасних умов військового протистояння лише частково. Крім того, необхідно врахувати використання антидронових систем тунельного типу на шляхах руху військ (сил), що є важливим елементом у контексті підвищення ефективності захисту та зниження загроз від ворожих БпЛА.

Формулювання мети статті (постановка завдання)

Метою статті є обґрунтування пропозицій щодо вдосконалення організаційно-підготовчих заходів інженерної підтримки мобільності військ (сил) в умовах загрози з боку БпЛА шляхом розробки та впровадження фізичного антидронного захисту тунельного типу.

На основі аналізу сучасних загроз та існуючих способів обмеження пересування підрозділів, у статті визначено ключові напрями розвитку інженерних споруд захисного характеру, здатних забезпечити ефективне екранування об'єктів від ударних дронів, зокрема таких, що функціонують на основі автономного або оптоволоконного керування.

Основне завдання дослідження полягає у визначенні науково обґрунтованих підходів до проектування та вдосконалення конструкцій тунельного типу з метою підвищення їхньої ефективності, мобільності, швидкості розгортання та адаптивності до умов сучасного бою.

Виклад основного матеріалу

Досліджуючи тактику ведення "дронної війни", противник постійно її вдосконалює та активно застосовує безпілотні системи у форматі засідок на маршрутах пересування підрозділів. Якщо раніше біля дороги зазвичай перебував один дрон, який очікував проходження техніки Сил оборони України для нанесення удару, то нині тактика ускладнилася – на окремих ділянках одночасно можуть діяти до п'яти і більше БпЛА, розміщених у різних точках уздовж маршруту. Це дає змогу створити багатопозиційну

пастку (рис. 2), в якій кожен дрон контролює свій сектор або прикриває інші апарати.

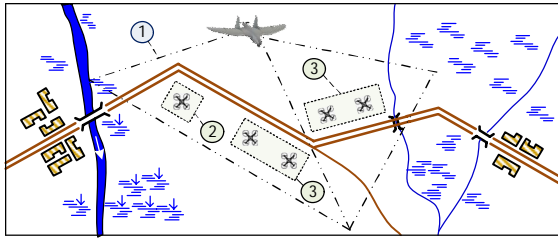


Рис. 2. Дронова засідка (варіант):

- 1 – зона спостереження (цілевказання);
2 – сектор прикриття; 3 – сектор очікування (атаки)

Паралельно в повітрі можуть перебувати кілька БПЛА-розвідників, які виконують функції спостереження та цілевказання. Вони зависають на висоті та передають дані операторам, які координують дії ударних БПЛА, застосовуючи різноманітні способи ураження, зокрема: "Класика", "Полювання", "FPV-рій", "FPV-дрон в засідці", "Комбінований удар" та ін. [3]. У деяких випадках ці дрони здатні супроводжувати ціль на великій відстані, очікуючи зручного моменту для атаки – наприклад, коли техніка сповільнюється або зупиняється.

Також фіксуються випадки використання дронів із зарядом живлення, що добігає кінця: якщо такі апарати не виявляють конкретної військової цілі, оператори навмисно скеровують їх у бік найближчої будівлі або укриття – незалежно від того, перебувають там військові чи цивільні. Це здійснюється з метою максимального психологічного впливу та фізичного ураження в глибині тилу.

Таким чином, дрони використовуються комплексно: частина з них виконує функцію довготривалого очікування на маршрутах, частина зависає в повітрі для виявлення та супроводу, а решта застосовується як ударна сила або засіб тиску, навіть інколи без визначеної цілі.

Як уже зазначалося, у зв'язку з появою новітніх засобів розвідки та наведення засобів ураження на ціль, роль маскування в сучасному бою різко зростає. У загальному розумінні маскування має подвійне й принципово протилежне призначення: з одного боку – приховування демаскувальних ознак реальних об'єктів, з іншого – імітацію діяльності військ (сил) шляхом створення хибних об'єктів [18]. Водночас сучасні умови висувають і додаткову вимогу – виконання захисної функції.

Уміле використання природних умов дозволяє ефективно приховувати війська, об'єкти та виконання військово-інженерних робіт із мінімальними витратами часу, зусиль і засобів. Проте на місцевості, позбавленій природних маскувальних властивостей, широко застосовують штучні маскувальні засоби. По суті, це екрани, які встановлюються між

противником і об'єктом, що приховується – особливо у випадках, коли об'єкт розташовано на відкритій місцевості або природна маска має недостатні маскувальні властивості. Найчастіше для укриття техніки та об'єктів застосовують маски-перекриття, а також вертикальні, горизонтальні та деформувальні маски.

За призначенням, конструкцією та зовнішнім виглядом розрізняють наступні типи: маски-перекриття, горизонтальні маски, маски-навіси, вертикальні маски та нахилені маски, деформувальні маски та маски-макети [18].

Оскільки розглянуте питання здебільшого стосується інженерної підтримки мобільності військ (сил), зокрема їх пересування дорогами та колонними шляхами, для захисту від наземної розвідки й перспективного повітряного спостереження часто використовують вертикальні маски. Вони поділяються на траншейні, дорожні та маски-паркани.

Основне призначення дорожніх масок – приховати рух підрозділів мережею шляхів. Залежно від місця встановлення, дорожні маски поділяються на придорожні та наддорожні.

Придорожні вертикальні маски встановлюються вздовж рокадних доріг. Вони можуть мати каркас або бути безкаркасними. Каркас зазвичай складається зі стійок, які забиваються або закопуються в ґрунт з інтервалом 3–6 м, прогонів або тяжів, що закріплюються на стійках з кроком 0,5–1,5 м по висоті, а також відтяжок. На твердих (кам'янистих або мерзлих) ґрунтах каркаси можуть встановлюватися на козлових опорах із прогонами. До каркаса кріпиться полотно маски, яке виготовляється з місцевих матеріалів (хмизу, жердин тощо), а також з елементів табельних маскувальних покриттів або сіток, заповнених місцевими матеріалами. Один табельний маскувальний комплект дозволяє облаштувати 72 м вертикальної маски висотою 3 м.

Наддорожні вертикальні маски встановлюються на фронтальних дорогах. Нижній край полотна підвішується на висоті, що забезпечує вільний проїзд усіх видів техніки та транспорту. Полотна таких масок також виготовляються з місцевих матеріалів або елементів табельних маскувальних комплектів.

Кожна маска складається з каркаса, виготовленого, як правило, із жердин і дроту (або тросів), та покриття шириною від 1,5 до 3,0 м, яке створюється з табельних маскувальних засобів або підручних матеріалів. Залежно від умов місцевості, на кожний кілометр дороги встановлюється від 8 до 12 масок.

Слід зазначити, що для приховування пересування підрозділів від наземної розвідки противника, застосовують комбіновані маски (рис. 3), які складаються з вертикальних масок (придорожніх або наддорожніх) і кутикових відбивачів ОМУ, які підвішуються на стійках через 8...12 м [18].

Таблиця 1

Потреба в матеріалах та інструменту для облаштування захисного антидронових тунелю (екрана)

Найменування	Потреба
Матеріали:	
Ліс круглий (довжина 6 м, Ø 20–24 см, може розпилюватися на 4 частини)	14 м³ (~170 стовпів)
Дріт в'язальний	800 кг
Цвяхи 100 мм	40 кг
Поліпропіленовий шпагат	8 км
Сітка пластикова (рулон 1,7×500 м, вічко 13×18 см)	28 рулонів
Інструмент:	
Мотобур, відбійний молоток, бензопила	по 1 од.
Лом, сокира, лопата, кирка-мотига	по 2 шт.
Рушниця (антидронів)	3 од.

Орієнтовна вартість матеріалів, наведених у табл. 1, складає 180 тис. грн.

Залежно від типу ґрунту, температурних умов та інтенсивності вогневого впливу противника, група з 15 військовослужбовців може збудувати від 40 до 60 м захисного тунелю протягом доби за умови використання відповідного обладнання та інструментів, наведених у табл. 1.

Будівництво захисних антидронових тунелів (екрана) можна умовно поділити на кілька основних етапів, кожен з яких потребує відповідного оснащення, матеріалів та інженерних рішень залежно від умов місцевості, рівня загрози та наявного ресурсу [10]. Загальний вигляд антидронових тунелів (екранів) показано на рис. 4.

На першому етапі проводиться аналіз місцевості: визначаються основні логістичні шляхи, оцінюється їхня віддаленість від лінії бойового зіткнення та інтенсивність застосування противником FPV-дронів проти техніки, що переміщується цими маршрутами та ін.

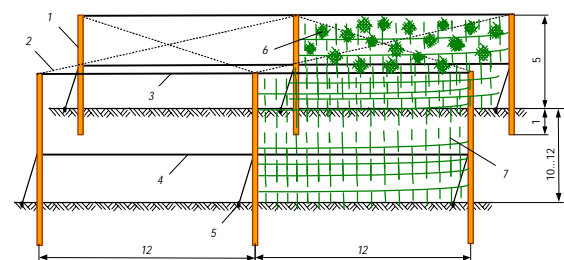


Рис. 4. Типова схема влаштування антидронових тунелю (екрана) (варіант):

- 1 – стовп; 2 – поліпропіленовий шпагат;
3 – верхній боковий дріт; 4 – нижній боковий дріт;
5 – бокова відтяжка; 6 – горизонтальна маска (маскувальне покриття, сітка тканинна);
7 – вертикальна маска (сітка пластикова)

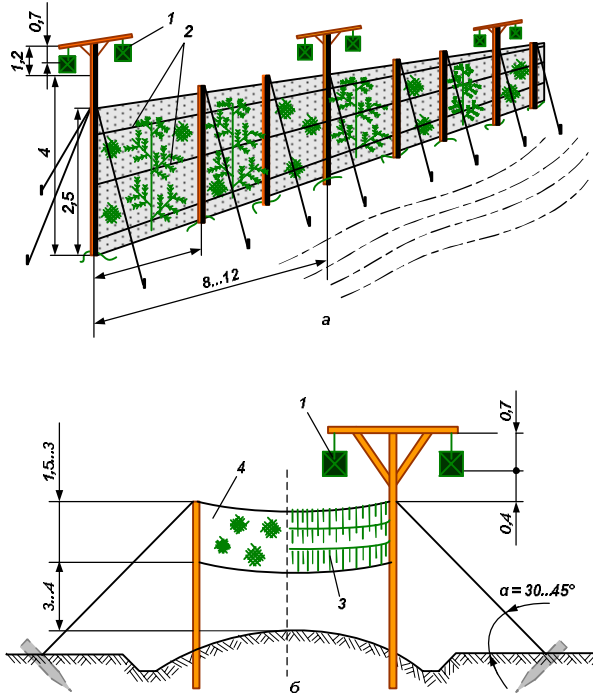


Рис. 3. Комбіновані маски (варіант):

a – придорожня; *б* – наддорожня.

1 – кутиковий відбивач ОМУ; 2 – розтяжки;

3 – полотно (солома, очерет, хмиз);

4 – маскувальне покриття (сітка з заплетенням гілок або інших місцевих матеріалів)

Водночас варто підкреслити, що наявні маски не в повній мірі виконують свої функції. Окрім основного маскувального призначення, сучасні умови вимагають від них також виконання захисної ролі – передусім у прикритті техніки на військових автомобільних дорогах від ураження дронами [9]. Наявні конструкції часто не здатні забезпечити належний рівень протидії сучасним безпілотним загрозам, що вимагає подальшого вдосконалення підходів до їхнього виготовлення та застосування.

З огляду на це, захист техніки від вогневого ураження та виявлення противником набуває вирішального значення під час її пересування в умовах сучасного високоманеврового бою. Одним із способів забезпечення безпеки техніки під час руху та збереження бойових машин є так звані антидронові укриття тунельного типу.

Захисні антидронові тунелі (екрани) призначені для обладнання на логістичних шляхах з метою створення перешкод для БПЛА противника, що дозволяє зменшити ймовірність ураження техніки та особового складу під час пересування.

Для облаштування захисного антидронових тунелю (екрану) протяжністю 1 км мінімальна орієнтовна потреба в матеріалах подана в табл. 1 [10].

Після ідентифікації логістичних шляхів, які підлягають обладнанню засобами антидронових захисту, організовується їх інженерна розвідка. У ході якої визначають:

наявність інженерних загороджень на запланованій ділянці робіт;

протяжність відкритих ділянок, що потребують обладнання;

стан дорожнього покриття та узбіч, їхню ширину, матеріал дорожнього одягу та тип ґрунтів уздовж дороги та ін.

Після проведення інженерної розвідки здійснюється розрахунок необхідних матеріальних засобів та інструментів, подається запит. З урахуванням протяжності ділянок, що підлягають обладнанню, та строків виконання робіт проводиться розподіл особового складу на робочі групи, а дороги ділять на окремі робочі ділянки.

Завдання на обладнання захисних антидронових тунелів доводяться до загальновійськових підрозділів через розпорядження з підтримки, а до підрозділів інженерної підтримки – через бойові розпорядження.

Облаштування захисної конструкції (рис. 4) відбувається на другому етапі, особливості якого наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Основні кроки будівництва захисного антидронного тунелю (екрана)

Назва кроку	Короткий опис
Підготовка місцевості	Проводиться розмітка місць встановлення стовпів
Встановлення каркаса	Прив'язуються бокові розтяжки, стовпи закріплюються в'язальним дротом, після монтажу натягується дріт по верхній частині конструкції
Обшивання сіткою	Сітка натягується поперек осі тунелю, фіксується мотузкою з вантажем, яка перекидається через тунель. Сітка розгортається і закріплюється до нижнього бокового дроту. Нижня частина сітки повинна вільно провисати до землі для евакуації
Фіксація сітки (маски)	Під сіткою (маскою) натягуються мотузки навхрест для уникнення провисання
Захист в'їздів та виїздів	Встановлюються вертикальні "жалюзі" з мотузок на повну висоту тунелю, верхній край додатково фіксується до сітки, мотузки прив'язуються до кожного вічка для запобігання обриву всієї системи

Окрім зазначених заходів, альтернативним рішенням для створення горизонтального та вертикального перекриття є застосування різноманітних сітчастих конструкцій, зокрема рибальських сіток. У разі спроби дрона-камікадзе подолати таку перешкоду, він заплу-

тується в сітці, втрачаючи можливість прицільного ураження об'єкта. Крім того, заплутування призводить до порушення просторової орієнтації апарата, що унеможливорює активацію його детонаційного механізму, оскільки для багатьох моделей дронів вибух ініціюється безпосереднім ударом або контактом із ціллю [9-11].

Цей підхід базується на фізичному принципі механічного перехоплення та значною мірою ігнорує технічні характеристики FPV-дрона, включаючи тип його керування, що робить його актуальним навіть у випадках використання безпілотників з автономною навігацією або на шифрованому/ оптоволоконному каналі зв'язку.

Слід зазначити, оскільки противник може атакувати тільки на в'їздах/виїздах, рекомендується початок і кінець тунелю розмішувати в природних укриттях, зокрема лісистій місцевості.

На етапі оформлення документації, а саме паспорта споруди та постановки її на облік, комісія підрозділу складає акт виконаних робіт, в якому зазначаються підстави, місце, період виконання робіт та використані матеріали. На підставі цього створюється акт якісного стану, що містить інформацію про матеріали та характеристики споруди. Потім на основі зазначених документів складається паспорт наземної захисної споруди тунельного типу, який подається на реєстрацію встановленим порядком.

Для утримання тунелю (екрана) виділяється група до 5 військовослужбовців з автомобілем, необхідним інструментом та матеріальними засобами для ремонту. Щоденно проводиться огляд тунелю (екрана) методом патрулювання. У разі критичних пошкоджень від вогневого впливу противника, робоча група доповідає за підпорядкуванням, а інформація про пошкодження вноситься у журнал бойових дій. В залежності від характеру ушкоджень, частина конструкції може бути списана або знята з експлуатації [10].

Порівняно з наведеними вище конструктивними рішеннями, у роботі [11] запропоновано рекомендації щодо інженерного облаштування антидронних тунельних транспортних коридорів, зведення яких здійснюється за каркасно-розтяжним принципом. Залежно від віддаленості від лінії бойового зіткнення (ЛБЗ), протяжності маршруту та характеру завдань, що виконуються, передбачено поділ зазначених споруд на два основні типи (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняльна характеристика антидронних коридорів

Характеристики	Тип № 1	Тип № 2
Віддалення від ЛБЗ (км)	до 20	понад 20
Залучення засобів механізації	–	+
Кількість залученого особового складу (чол.)	20 (5 розрахунків, 1 з них для прикриття)	

Продовження табл. 3

Характеристики	Тип № 1	Тип № 2
Габарити тунелю:		
ширина, висота центральної частини (м)	10×5	10×6
ширина похилих зон з обох сторін (м)	3,5	4,6
допустима висота техніки (м)	4,8	до 5,5
висота основних опорних стійок (м)	5	6
Сітка (нейлон, армований полімер та ін.) (мм)	вічко 150×150 (150×170)	

Особливістю зазначених транспортних коридорів, порівняно з антидроновим тунелем, зображеним на рис. 4, є наявність оптимального кута нахилу бокових поверхонь конструкції, що становить орієнтовно 30 – 45°. Такий кут сприяє зниженню ризику ураження техніки та особового складу дронами противника або їх уражаючими елементами, а також впливає на зміну траєкторії кумулятивного струменя відносно потенційних цілей.

У місцях в'їзду та виїзду техніки до/з тунелю (коридору) передбачено встановлення "антидронових штор", конструкція яких складається з двох основних елементів: верхнього – смужки з сітки шириною 30 см з великим вічком (150×150 мм, поліестер або інші подібні матеріали), та основного – підвісів із поліамідного шнура діаметром 8 мм. Підвіси кріпляться до верхнього елемента вузловим способом з кроком не більше 15 см та відступом від поверхні ґрунту не більше 10 см [11].

Для забезпечення надійного монтажу вертикальних опор (стійок) антидронного коридору другого типу використовуються опорні елементи: швелер № 12 довжиною до 2 м та профільна труба 80×80×3 мм довжиною 1,5 м. Зазначені елементи забиваються у ґрунт за допомогою палейних засобів, що забезпечує їхню необхідну стійкість і фіксацію.

Таким чином, запропоновані функціональні модифікації дозволяють адаптувати технічні рішення залежно від віддаленості до ЛБЗ, протяжності мережі шляхів, наявних засобів механізації тощо.

З огляду на зростаючу загрозу застосування сучасних дронів-камікадзе, особливої уваги набуває вдосконалення фізичних засобів захисту, зокрема тунельного типу – інженерної системи перекриттів, яка забезпечує багатопланове горизонтальне й вертикальне екранування об'єктів (рис. 5).

На рис. 5 представлено конструкцію тунельного типу захисту, де відстань між першим і другим шарами перекриттів становить орієнтовно 1–1,5 метра. Такий проміжок дозволяє ефективно розсіювати енергію вибуху дронів-камікадзе, знижуючи ймовірність пробиття захисту. Багатопланова

структура значно перевершує одношаровий захист за ефективністю, оскільки дає змогу перехопити або зруйнувати боєприпас ще до досягнення основного об'єкта, створюючи додатковий бар'єр, який ускладнює пряме влучання.

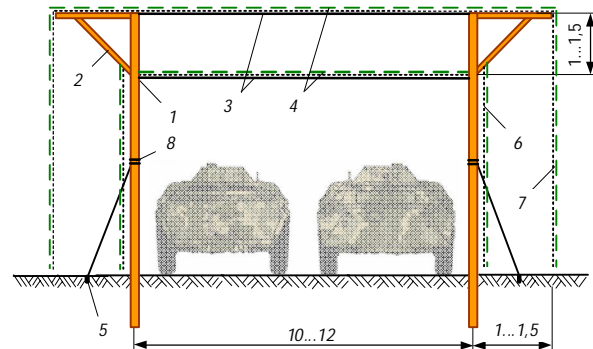


Рис. 5. Схема облаштування двошарового антидронного тунелю (екрана) (варіант):

- 1 – стовп; 2 – "Г-подібна" стійка;
3 – нижній та верхній поліпропіленовий шпигат (дріт);
4 – внутрішня та зовнішня горизонтальна маска (маскувальне покриття, сітка тканинна);
5 – бічна відтяжка; 6 – внутрішня вертикальна маска (сітка пластикова); 7 – зовнішня вертикальна маска (маскувальне покриття, сітка тканинна);
8 – нижній бічний дріт

Ці два шари захисту можуть бути виконані у різних конструктивних варіантах з урахуванням особливостей місцевості, доступних матеріалів та характеру загроз. Зокрема, верхній шар може мати вигляд натягнутої нахрест сітки з мотузок або сталевих дротів невеликого діаметра [9]. Вона не створює великого навантаження на каркас, однак ефективно виконує роль першого бар'єра: при зіткненні з нею дрон може втратити орієнтацію, уповільнитися або передчасно ініціювати бойову частину. Подібна конструкція є простою у монтажі, відносно дешевою та легко відновлюваною, що робить її доцільним елементом багаторазового захисту.

У цьому контексті визначено низку ключових напрямів удосконалення, що наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Основні напрями удосконалення антидронного захисту тунельного типу

Напрямок удосконалення	Обґрунтування
Нарощування площини покриття	Збільшення площі перекриття запобігає атакам з різних траєкторій. Модульність дозволяє адаптувати захист під об'єкт

Продовження табл. 4

Напрямок удосконалення	Обґрунтування
Удосконалення технології установки сіток	Використання легких, міцних матеріалів і попередньо зібраних модулів забезпечує швидке розгортання
Інтеграція елементів, що дозволяють виявляти	Сенсори натягу або вібрації в сітці дозволяють оперативно виявляти контакт із дронами та підвищують ситуаційну обізнаність
Використання багатошарових бар'єрів	Комбінування сіток з різною щільністю та висотою забезпечує поетапне уповільнення та знешкодження БпЛА
Мобільні конструкції на автотранспортній базі	Переносні інженерні системи тунельного типу дозволяють захищати як постійні, так і тимчасові об'єкти
Маскування та оптична дезорієнтація	Застосування тканин, що знижують теплову/радарну видимість, ускладнює наведення дронів на захищений об'єкт

Вони охоплюють як конструктивні, так і функціональні аспекти системи, зокрема нарощування площини покриття, прискорення монтажу, багатошаровість, мобільність та інтеграцію додаткових технологій для виявлення та маскування.

Важливим етапом у процесі зведення антидронного тунелю (коридору, екрану) є організація охорони району будівництва, яка умовно поділяється на два типи: пасивну та активну.

До засобів пасивного захисту належать: системи раннього виявлення БпЛА, пости візуального спостереження, технічні засоби виявлення дронів, використання наземних роботизованих комплексів для підвезення матеріально-технічних засобів, а також застосування суцільних захисних коконів для техніки, таких як СКПЗ "РАПАН-5", "RingGuard" тощо.

Активний захист передбачає застосування стрілецької зброї, зокрема помпових рушниць для ураження малогабаритних цілей типу FPV-дронів на відстані до 50 м, а також використання БпЛА з підвісними ріжучими системами, призначеними для переривання оптоволоконних ліній зв'язку та виконання інших спеціалізованих завдань [7, 10, 11].

Особливу увагу доцільно приділити інтеграції засобів РЕБ, які забезпечують нейтралізацію каналів управління БпЛА, створюючи додатковий рівень захисту. Включення систем РЕБ до складу комплексу протидії дронам суттєво підвищує його ефективність і знижує ймовірність успішної атаки з боку противника.

У районах, де розгортання стаціонарних засобів прикриття (зокрема антидронних тунелів або екранів) є технічно складним або неможливим, доцільне є використання мобільних протидронних команд (МПК). Такі підрозділи здатні забезпечувати оперативне прикриття відкритих ділянок маршрутів, що особливо актуально в умовах інтенсивного застосування БпЛА противником.

До складу МПК може входити спеціалізована техніка, зокрема високомобільні легкоброньовані транспортні засоби (типу багі), обладнані засобами РЕБ для протидії FPV-дронам. Основними засобами ураження повітряних цілей виступають багатоцільові дрони-перехоплювачі, здатні діяти в автоматизованому режимі, а також БпЛА, оснащені сітко-метами для селективного та "м'якого" перехоплення ворожих апаратів.

Стандартний склад МПК зазвичай повинен включати оператора РЕБ-систем, пілота дрона-перехоплювача, водія-механіка (командира екіпажу), що забезпечує координацію дій. Така організаційно-технічна структура дозволить здійснювати ефективне реагування на повітряні загрози в реальному часі та суттєво підвищувати рівень захисту сил і засобів на маршрутах пересування.

Отже, комплексне удосконалення систем фізичного антидронного захисту є ключовою умовою підвищення живучості військ і критично важливих об'єктів в умовах сучасного високотехнологічного бою. Фізичні бар'єри при цьому розглядаються як універсальний, надійний та відносно економічний компонент системи протиповітряної оборони ближньої дії.

Висновки

Для забезпечення ефективного захисту від FPV-дронів противника доцільно облаштовувати захисні екрани на загрозованих напрямках, з урахуванням оперативної обстановки, рельєфу місцевості та маршрутів пересування військ. Важливим елементом є створення підрозділів, відповідальних за технічне утримання й відновлення захисних конструкцій тунельного типу, а також розгортання вогневих груп протиповітряної оборони на в'їздах, виїздах та з'їздах, що сприятиме підвищенню надійності системи прикриття.

Досягнення максимальної ефективності вимагає комплексного підходу, що включає використання мобільних та адаптивних інженерних засобів перекриття, інтеграцію сенсорних технологій виявлення та раннього попередження, а також постійний моніторинг повітряної обстановки.

Перспективні напрями подальших досліджень включають:

удосконалення технологій автоматизації процесів розгортання та демонтажу захисних систем;

розроблення й апробацію новітніх матеріалів з підвищеною стійкістю до впливу елементів ураження від БпЛА;

аналіз ефективності комбінованих підходів, які поєднують використання антидронних сіток і вогневих засобів у межах єдиного комплексу захисту.

Урахування тактичних і технічних новацій у зазначених напрямках дозволить суттєво підвищити ефективність захисту об'єктів та підрозділів Збройних Сил України в умовах ведення сучасної війни.

Список літератури

1. Доктрина застосування безпілотних систем у Силах оборони України. ОП 3-0(46). Центральне управління безпілотних систем Генерального штабу Збройних Сил України. Київ, 2024. 55 с.
2. Малюк В. Про операції СБУ: Робота БПЛА забезпечує 85% знищення і живої сили, і техніки ворога. *Укрінформ*. 23 лютого 2025. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3963389-maluk-pro-operacii-sbu-robota-bpla-zabezpecue-85-znisenna-i-zivoi-sili-i-tehniki-voroga.html> (дата звернення: 16.05.2025).
3. Тактика применения противником FPV-дронов (в схемах) и способы противодействия. Справочник. Книга врага, ворожою мовою. Київ : Сварог вид. дім, 2025. 32 с.
4. Керівництво "Військові фортифікаційні споруди". ПТКП 11-92(298). Командування Сил підтримки Збройних Сил України. Київ, 2025. 337 с.
5. Інженерна підтримка бойових дій військ (сил) з урахуванням досвіду російсько-української війни : навч. посібник / Ткачук П.П. та ін. Львів : НАСВ, 2024. 218 с.
6. Олексенко О. О., Авраменко О. В., Федоров А. В., Сніцаренко В. В., Чернавіна О. Є. Застосування безпілотних літальних апаратів збройними силами російської федерації у війні проти України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. Харків, 2022. № 4 (49). С. 37-42. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.05> (дата звернення: 18.05.2025).
7. Інформаційний бюлетень з протидії БПЛА типу FPV із використанням оптико-волоконного каналу зв'язку. ВП 3(7)-(01, 03-05)162.55. Головне управління доктрин та підготовки Генерального штабу Збройних Сил України. Київ, 2025. 38 с.
8. Анализ южной группировки войск по обобщению опыта боевых действий. Министерство обороны российской федерации. 2024. 67 с.
9. Інформаційний бюлетень з питань інженерного обладнання, маскування вогневих позицій, районів зосередження, протидії ударним БПЛА противника. Центральне управління підготовки ракетних військ і артилерії командування ракетних військ і артилерії Командування Сухопутних військ Збройних Сил України. Київ, 2025. 34 с.
10. Методичні рекомендації по обладнанню захисних антидронових тунелів (екранів). Командування угруповання військ "Курск". Токарі, 2025. 12 с.
11. Методичні рекомендації щодо облаштування "антидронового" захисту на маршрутах висування військ. Командування Сил підтримки Збройних Сил України. Київ, 2025. 42 с.
12. Спірін Д. А., Брянкін С. С., Подчерніна В. О., Сай В. М., Доманов І. О. Протидія безпілотним літальним апаратам: аналіз загроз та пошук ефективних рішень. *Випробування та сертифікація*. Черкаси, 2024. №2(4). С. 111-117. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.14> (дата звернення: 18.05.2025).
13. Дудуш А. С., Тютюнник В. О., Резніченко О. А., Гогонянц С. Ю. Сучасний стан та проблеми протидії маловисотним, низькошвидкісним та малорозмірним БПЛА. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ, 2018. № 31(1), С. 121-131. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2018-31-1-121-131> (дата звернення: 18.05.2025).
14. Корольов Р. В., Королюк Н. О., Петров О. В., Сюлев К. В. Аналіз сучасних засобів знищення без пілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Харків, 2017. № 4. С. 17-21 DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2017_4_6 (дата звернення: 18.05.2025).

15. Krivtsun, V., Holushko, S. (2024). Analysis of ways and means of counteracting unmanned aerial vehicles and areas for their improvement. *Social Development and Security*, 2024. №14(4), pp. 210–222. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.4.17> (Accessed 18 May 2025).
16. Skoglund, P., Listou, T., Ekström, T. (2022). Russian Logistics in the Ukrainian War: Can Operational Failures be Attributed to logistics? *Scandinavian Journal of Military Studies*. 2022. № 5(1), pp. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.31374/sjms.158> (Accessed 18 May 2025).
17. Фтемов Ю. О., Купрінченко О.М., Ленков С.В., Мірошніченко О.В., Літвіненко Н.І. Удосконалення способів ведення інженерної розвідки в інтересах інженерної підтримки бойових дій військ (сил). *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2023. № 80. С. 72-86. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2023/80-08> (дата звернення: 18.05.2025).
18. Керівництво з виконання інженерних заходів маскування військ та об'єктів. Наказ №90. Головне управління оперативного забезпечення Збройних Сил України. Київ, 2017. 138 с.

References

1. The General Staff of the Armed Forces of Ukraine (2024), "Doktryna zastosuvannia bezpilotnykh system u Sylakh oborony Ukrainy" [Doctrine on the Use of Unmanned Systems in the Defense Forces of Ukraine]. OP 3-0(46). Kyiv, 55 p. [in Ukrainian].
2. Maluk V. (2025), "Pro operatsii SBU: Robota BPLA zabezpechue 85% znischennia i zhivoi sylu, i tekhniky voroha" [About SBU operations: UAV work ensures 85% destruction of both enemy manpower and equipment]. *Ukrinform*, 23 February 2025. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3963389-maluk-pro-operacii-sbu-robota-bpla-zabezpecue-85-znisenna-i-zivoi-sili-i-tehniki-voroga.html>. (Accessed 16 May 2025). [in Ukrainian].
3. Swarog Publishing House (2025), "Taktyka zastosuvannia protivnykom FPV-droniv (v skhemakh) i sposoby protydyi" [Tactics of enemy use of FPV drones (with diagrams) and countermeasures]. Kyiv, 32 p. [in russian].
4. Command of Support Forces of the Armed Forces of Ukraine (2025), "Kerivnytstvo 'Viiskovi fortyfikatsiini sporudy'." [Manual "Military Fortification Structures"]. PTKP 11-92(298). Kyiv, 337 p. [in Ukrainian].
5. Tkachuk P.P., et al. (2024), "Inzhenerna pidtrymka boiovykh dii viisk (syl) z urakhuvanniam dosvidu rosiiskoukrainskoi viiny" [Engineering support of military operations considering the experience of the russo-ukrainian war]: Tutorial, NASV, Lviv, 218 p. [in Ukrainian].
6. Oleksenko O.O., Avramenko O.V., Fedorov A.V., Snitsarenko V.V. and Chemavina O.Ye. (2022), "Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparatov zbroinymy sylamy rosiiskoi federatsii u viini proty Ukrainy" [Application of UAVs by the armed forces of the russian federation in the war against Ukraine]. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, Kharkiv, 2022. Issue № 4(49). pp. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.05>. (Accessed 18 May 2025). [in Ukrainian].
7. Main Directorate of Doctrines and Training of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine (2025), "Informatsiyni biuletyn z protydyi BpLA typu FPV iz vykorystanniam optyko-volokonnoho kanalu zviazku" [Information Bulletin on Countering FPV-type UAVs Using Optical-Fiber Communication Channel]. VP 3(7)-(01, 03-05)162.55. Kyiv, 38 p. [in Ukrainian].

8. Ministry of Defence of the Russian Federation (2024), "Analiz yuzhnoy grupirovki voysk po obobshcheniyu opyta boevykh deystviy" [Analysis of the Southern Troop Grouping Based on Combat Experience]. 67 p. [in Russian].

9. Central Directorate of Missile Troops and Artillery Training, Missile Troops and Artillery Command of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine (2025), "Informatsiyni biuleten z pytan inzhenernoho obladnannia, maskuvannia vohnevykh pozitsii, raioniv zoseredzhenia, protydii udarnym BpLA protyvnyka" [Information Bulletin on Engineering Equipment, Camouflage of Fire Positions, Concentration Areas, Counteraction to Enemy Strike UAVs]. Kyiv, 34 p. [in Ukrainian].

10. Command of the "Kursk" Troop Grouping (2025), "Metodychni rekomendatsii po obladnanniu zakhysnykh antydronovykh tuneliv (ekraniv)" [Methodical Recommendations for Equipping Protective Anti-Drone Tunnels (Screens)]. Tokari, 12 p. [in Ukrainian].

11. Command of the Support Forces of the Armed Forces of Ukraine (2025), "Metodychni rekomendatsii shchodo oblashchennia 'antydronovoho' zakhystu na marshrutakh vysuvannia viisk" [Methodical Recommendations on Arranging "Anti-Drone" Protection on Troop Movement Routes]. Kyiv, 42 p. [in Ukrainian].

12. Spirin D.A., Briankin S.S., Podchernina V.O., Sai V.M. and Domanov I.O. (2024), "Protydiia bezpilotnym litalnym aparatam: analiz zahroz ta poshuk efektyvnykh rishen" [Countering Unmanned Aerial Vehicles: Threat Analysis and Search for Effective Solutions]. *Testing and Certification*, Cherkasy, 2024. Issue № 2(4), pp. 111–117. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.14> (Accessed 18 May 2025). [in Ukrainian].

13. Dudush A.S., Tiutunyyk V.O., Reznichenko O.A. and Hohonianets S.Yu. (2018), "Suchasnyi stan ta problemy protydii malovysotnym, nyzkoshvydkisnym ta maloroznirnym BpLA" [Current State and Problems of Countering Low-Altitude, Low-Speed and Small-Size UAVs]. *Modern Information*

Technologies in Security and Defense, Kyiv, 2018. Issue № 31(1), pp. 121–131. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2018-31-1-121-131> (Accessed 18 May 2025). [in Ukrainian].

14. Korolov R.V., Koroliuk N.O., Petrov O.V. and Siulev K.V. (2017), "Analiz suchasnykh zasobiv znyshchennia bezpilotnykh litalnykh aparativ" [Analysis of Modern Means for Destruction of Unmanned Aerial Vehicles]. *Collected Scientific Works of the Kharkiv Air Force University*, Kharkiv, 2017. Issue № 4, pp. 17–21. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2017_4_6 (Accessed 18 May 2025). [in Ukrainian].

15. Krivtsun V. and Holushko S. (2024), "Analysis of ways and means of counteracting unmanned aerial vehicles and areas for their improvement". *Social Development and Security*. 2024. Issue № 14(4), pp. 210–222. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.4.17> (Accessed 18 May 2025). [in English].

16. Skoglund P., Listou T. and Ekström T. (2022). Russian Logistics in the Ukrainian War: Can Operational Failures be Attributed to logistics? *Scandinavian Journal of Military Studies*. 2022. Issue № 5(1), pp. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.31374/sjms.158>. (Accessed 18 May 2025). [in English].

17. Ftemov Yu.O., Kuprinenko O.M., Lenkov S.V., Miroshnychenko O.V. and Litvinenko N.I. (2023), "Udoskonalennia sposobiv vedennia inzhenernoi rozvidky v interesakh inzhenernoi pidtrymky boiovykh dii viisk (syl)" [Improvement of methods for conducting engineering reconnaissance to support military operations]. *Collection of scientific works of Military Institute of Tarasa Shevchenko*. Kyiv, 2023. Issue № 80, pp. 72–86. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2023/80-08>. (Accessed 18 May 2025). [in Ukrainian].

18. Main Directorate of Operational Support of the Armed Forces of Ukraine (2017), "Kerivnytstvo z vykonannia inzhenernykh zakhodiv maskuvannia viisk ta ob'ektiv. Nakaz №90" [Manual on Implementation of Engineering Camouflage Measures for Troops and Objects. Order №90]. Kyiv, 138 p. [in Ukrainian].

ANTI-DRONE DEFENSE AS A KEY ELEMENT OF ENGINEERING SUPPORT FOR MILITARY (FORCES) MOBILITY IN THE CONTEXT OF MODERN WARFARE

Yu. Ftemov

The article provides an in-depth analysis of current approaches to warfare in which the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) significantly influences the mobility of military forces and their ability to advance on the battlefield. Special attention is given to tunnel-type anti-drone protective structures, which offer both horizontal and vertical shielding against loitering munitions and kamikaze drones. The research highlights the growing threat posed by UAVs with autonomous or fiber-optic guidance systems, which are capable of striking from long distances and remain resistant to electronic warfare countermeasures. Drawing on the operational experience of the ongoing Russian-Ukrainian war, where asymmetrical and sudden tactics dominate, the article emphasizes how drones are increasingly used not only on the front lines but also to disrupt logistics and evacuation routes deep in the rear.

The study outlines the significant impact of UAVs on logistical chains, including a reduction of delivery efficiency by up to 70% within 5 km of the front, and 40–50% within 5–15 km, due to drone strikes and surveillance. These effects extend to medical evacuation operations, where delayed transportation of the wounded may exceed ten hours, directly increasing the lethality rate.

To counter such threats, the article proposes a comprehensive set of organizational and engineering measures aimed at enhancing force mobility and survivability. These include the deployment of tunnel-type anti-drone systems along critical movement routes, the construction of underground shelters with multi-level protection, and the adaptation of camouflage and deceptive techniques to modern drone warfare. Moreover, the research stresses the importance of developing mobile and quickly deployable protective infrastructures to meet the dynamic demands of high-intensity conflict environments.

The authors also analyze enemy tactics, including complex drone ambushes composed of surveillance and strike UAVs operating in coordination. This layered use of UAVs highlights the necessity for integrated defense systems capable of both passive (structural) and active (tactical and organizational) responses.

In conclusion, the article presents scientific and practical recommendations for improving engineering support to military mobility under the threat of UAVs. The findings serve as a basis for the evolution of modern defensive doctrines, engineering design principles, and field logistics strategies.

Keywords: anti-drone defense, camouflage, mobility, routes of movement of troops (forces).

ПІДГОТОВКА ВІЙСЬКОВИХ ФАХІВЦІВ TRAINING OF MILITARY SPECIALISTS

УДК [355.232:623.445]:378.147 DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.33.2025.194-202>

А.М. Андрієнко*, Б.О. Оліярник, М.В. Чорний

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ СТРІЛЬЦЯ ДО ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ЗРАЗКІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

Стаття присвячена аналізу сучасної стрілецької зброї, що поєднує інноваційні технології, вдосконалені принципи балістики та складні електронні системи. Значна увага приділена особливостям підготовки стрільця, що поєднують фізичну, технічну, тактичну та психологічну складові для забезпечення ефективного використання зброї в умовах бойових дій. У контексті сучасних збройних конфліктів, де технологічна перевага відіграє ключову роль, актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення систем підготовки військовослужбовців, які використовують високотехнологічну стрілецьку зброю, а також пошук ефективних методів підвищення їх бойової готовності. Метою статті є дослідження використання сучасної стрілецької зброї та її технологічних особливостей для формування вимог до підготовки стрільця, а також визначення ключових напрямів удосконалення методик вогневої підготовки щодо забезпечення високої ефективності стрільби в бойових умовах. У роботі використано методи системного і порівняльного аналізу, узагальнення для оцінки технологічних характеристик зброї та ефективності тренувальних методик, включаючи симуляційні тренування та використання електронних тренажерів. Встановлено, що завдяки інтеграції передових матеріалів, електронних систем і спеціалізованих боєприпасів суттєво підвищується бойова ефективність сучасної стрілецької зброї. Поряд із тим, це вимагає від стрільця глибоких знань балістики, метеорології та досвіду роботи з цифровими технологіями. Виявлено, що комплексна підготовка, яка включає фізичні вправи, тактичні симуляції, психологічні тренування та роботу з тренажерами, сприяє формуванню стійких моторних і рефлексивних навичок, знижуючи вплив стресових факторів, таких як "очікування пострілу". Визначено проблеми формального характеру вогневої підготовки в підрозділах і необхідність підвищення кваліфікації інструкторів. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці адаптивних методик індивідуальної підготовки стрільців з урахуванням їх психофізіологічних особливостей, а також удосконаленні тренажерних комплексів для імітації реальних бойових умов.

Ключові слова: бойова ситуація, вогнева підготовка, ефективність навчання, короткоствольна стрілецька зброя, методика підготовки, постріл, стрільба в обмеженому просторі, технологія, тип боєприпасу, тренажер, тренування на короткі дистанції, ураження цілі, форми і методи, формування навичок.

Постановка проблеми

Зважаючи на стрімкий розвиток науково-технічного прогресу та цифрової трансформації всіх сфер суспільного життя, особливого значення набуває модернізація системи професійної підготовки осіб, які виконують завдання у сфері безпеки та оборони держави. Технічний прорив останніх десятиліть обумовив не лише збільшення обсягів інформації, яку

необхідно обробляти, а й виникнення нових вимог до підготовки кадрів, зокрема у сфері використання сучасної стрілецької зброї. Саме тому актуальним стає питання удосконалення підходів до навчання стрільців, особливо в умовах оновлення озброєння та введення в експлуатацію новітніх зразків стрілецької зброї, які потребують від користувачів високого рівня технічної обізнаності, психологічної витривалості та тактичної гнучкості.

Article history: Income 17 May 2025; Revised 20 August 2025; Accepted 27 August 2025; Print 05 December 2025

Андрієнко А.М. ORCID ID: 0000-0002-7018-3784, Оліярник Б.О. ORCID ID: 0000-0002-7502-9209,
Чорний М.В. ORCID ID: 0000-0001-6024-9340

* Corresponding author tank-1974@ukr.net

Актуальність дослідження зумовлена тим, що сучасні зразки стрілецької зброї, створені з урахуванням останніх досягнень інженерної думки та бойового досвіду, мають значну складність конструкцій, високоточні механізми, електронні компоненти та можливість адаптації до різних бойових умов. В умовах зростання рівня загроз як у внутрішньо-державному, так і в міжнародному контексті, підвищення ефективності бойової підготовки стає ключовим чинником забезпечення обороноздатності країни та оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Значна частина службових обов'язків представників Сил оборони держави пов'язана з виконанням завдань у складних умовах, де правильний вибір зброї і професійне поводження з нею досить часто визначає успіх або невдачу операції. У цьому контексті особливої ваги набуває не тільки технічне вдосконалення зброї, а й науково обґрунтоване оновлення підходів до освітнього процесу в системі професійної підготовки, що повинно враховувати як фізіологічні, так і когнітивні характеристики людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних підходів до організації стрілецької підготовки показав, що більшість дослідників і практиків, серед яких Бондаренко В. [2], Рец В. [14] та інші, поділяють засоби навчання стрільби на три ключові категорії: практичні вправи, уявні (ментальні) тренування та технічні засоби, кожна з яких виконує унікальну функцію при формуванні професійних навичок стрільця в умовах сучасної війни. Поряд із цим дослідження Мельника І., Канюка В., Богайчука В. [10]; Чабаненка Ю., Мельника О. [17] демонструють як переваги, так і недоліки використання сучасних зразків зброї в процесі підготовки. З одного боку, вони дозволяють швидко сформувати у стрільця базові навички прицілювання, виявити похибки в техніці утримання зброї, скоригувати напрямок пострілу до натискання на спусковий гачок, і таким чином уникнути помилок ще до моменту пострілу. З іншого боку, надмірна залежність від лазерного прицілу може сформувати в стрільця спотворене уявлення про прицільні механізми зброї, знизити автономність його навичок і призвести до зменшення точності вогню під час використання штатного озброєння без допоміжних електронних пристроїв.

Окремий напрямок розвитку вогневої підготовки становить застосування багатофункціональних технічних тренажерних комплексів, які моделюють різноманітні бойові ситуації з урахуванням звуку пострілу, віддачі, а також динаміки ураження цілі. Автори досліджень Зеленський Є., Задорожня Р., Фісун Н. [5]; Наумов Н., Лопасєва О. [12]; Тимофєєв В., Дусяк О., Крисько В. [15] умовно поділяють ці системи на дві

групи: тренажери типу “стрілець-мішень” та “стрілець-стрілець”. Перший тип, орієнтований на точність і стабільність прицільного вогню, моделює ситуацію стрільби по нерухомій або рухомій мішені, зазвичай із використанням навчального макета зброї з симуляцією пострілу. Другий тип – більш адаптований до бойових реалій, адже дозволяє імітувати контактне протистояння, маневрову стрільбу, реагування на несподівані зміни тактичної обстановки, що наближує курсанта до умов реального бою.

Таким чином, ми реально бачимо, що застосування сучасних НТЗ у процесі бойової підготовки підрозділів СВ здійснює суттєвий позитивний вплив на якісні та кількісні показники у навчанні відповідних фахівців [20-22].

Головними показниками систем (комплексів) є універсальність, мобільність, малогабаритність, простота і мале енергоспоживання [22 С. 144-145].

І одним із таких рішень є використання сучасних українських тренінгових систем, наприклад, “UNITS” (рис. 1) компанії “Logics7”, яка виготовляє професійні рішення для симуляторів вогневої підготовки з 2019 року [12].



Рис. 1. Тренінгова система “UNITS” [12]

Українська “мобільна система UNITS дозволяє проводити навчання в будь-яких приміщеннях, що гарантує безпеку особового складу. При необхідності система з легкістю може бути переміщена на іншу локацію. Тренування можуть відбуватись цілодобово та з будь-якою інтенсивністю як в тилу, так і на другій лінії зіткнення” [12].

Виробник UNITS для замовника може включати в комплекс “різноманітні види зброї. Тренажер має масогабаритні макети, які повністю ідентичні справжній зброї. Це дозволяє бійцям досконало вивчати зброю і тренувати м'язову пам'ять, що допоможе їм ефективно виконувати поставлені бойові задачі” [12].

Таким чином, проблематика вогневої підготовки показує, що ефективність підготовки стрільця до роботи з новітніми зразками стрілецької зброї полягає не лише в удосконаленні матеріально-технічної бази та використанні інноваційних тренажерів, а й методологічному переосмисленні процесу тренувальної підготовки.

Мета досліджень

Метою статті є дослідження особливостей підготовки стрільця до застосування новітніх зразків стрілецької зброї в умовах ведення бойових дій з урахуванням технічних характеристик озброєння та особливостей професійної підготовки військово-службовців.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання дослідження:

проаналізувати сучасні напрями розвитку стрілецької зброї та визначити її ключові конструктивні й функціональні характеристики, які впливають на підготовку стрільця;

дослідити ефективність застосування новітніх методик і технічних засобів навчання, зокрема інтерактивних тренажерів у процесі вогневої підготовки особового складу;

обґрунтувати важливість використання комплексного підходу до формування стрілецьких навичок, що передбачає розвиток фізичної витривалості, психологічної стійкості, технічної підготовки та здатності військовослужбовця адаптуватися до умов сучасного бойового середовища;

розробити практичні рекомендації щодо удосконалення програм вогневої підготовки з метою підвищення рівня бойової готовності військових формувань.

Виклад основного матеріалу

Результатом тривалого технологічного прогресу є сучасна стрілецька зброя, що поєднує в собі інноваційні матеріали, складні електронні системи та вдосконалені принципи балістики, забезпечуючи безпрецедентну точність, надійність і ефективність у різноманітних умовах бойового застосування. У свою чергу, вимагає від стрільця не лише високого рівня технічної підготовки, але й глибокого розуміння принципів роботи зброї, психологічної стійкості та фізичної витривалості, необхідних для успішного виконання завдань у стресових ситуаціях. Від автоматичних гвинтівок до снайперських комплексів сучасна стрілецька зброя стала ключовим елементом тактичних операцій, де її ефективність залежить не лише від конструктивних особливостей, але й від рівня підготовки оператора, який має адаптуватися до швидкозмінних умов бою, враховувати фактори навколишнього середовища та використовувати складні прицільні системи для досягнення максимальної результативності.

Сучасна стрілецька зброя є продуктом еволюції та бере свій початок від простих механічних конструкцій (наприклад, мушкети та гвинтівки з ручним перезарядженням) і поступово доведена до рівня високотехнологічних систем, які інтегрують передові матеріали (полімери та титанові сплави) та електронні

компоненти, включаючи тепловізійні приціли, лазерні далекоміри та балістичні обчислювачі, що дозволяють стрільцям уражати цілі на значних відстанях із мінімальними відхиленнями. Наприклад, такі сучасні штурмові гвинтівки, як американська M4A1, оснащені модульними системами, що дозволяють швидко адаптувати зброю до різних бойових завдань шляхом встановлення додаткових аксесуарів (оптичні приціли, глушники або підствольні гранатомети), що значно підвищує їх універсальність і ефективність у бойових умовах. Снайперські гвинтівки Barrett M82 або Accuracy International AX50 демонструють ще більший рівень технологічної складності, поєднуючи надпотужні боєприпаси з високоточними прицільними системами, які дозволяють уражати цілі на відстані до 2 км, враховуючи такі фактори, як сила вітру, температура повітря та навіть обертання Землі, що вимагає від стрільця не лише вміння точно прицілюватися, але й глибоких знань теорії зовнішньої балістики та метеорології.

Однак технологічний прогрес не обмежується лише конструкцією зброї: він також охоплює боєприпаси, які стали більш спеціалізованими та ефективними, включаючи бронебійні, трасуючі та субкаліберні набої, що дозволяють стрільцям адаптуватися до різних типів цілей – від легкоброньованої техніки до укріплених позицій. У свою чергу, це потребує від них умінь правильно вибирати тип боєприпасів залежно від конкретної бойової ситуації. Крім того, інтеграція цифрових технологій (системи управління вогнем і датчики, що відстежують стан зброї) дозволяє стрільцям отримувати реальну інформацію про кількість залишкових набоїв, стан ствола чи навіть оптимальний момент для стрільби. Безумовно, це значно підвищує їх бойову ефективність, але водночас ускладнює процес підготовки, оскільки вимагає освоєння нових навичок роботи з електронними системами [1].

Підготовка сучасного стрільця є багатогранним процесом, який поєднує фізичну, технічну, тактичну та психологічну підготовку, спрямовану на формування професійного бійця, здатного ефективно діяти в умовах сучасного бою, де швидкість прийняття рішень, точність виконання завдань і стійкість до стресу відіграють вирішальну роль. При цьому фізична підготовка залишається основою, оскільки стрілець повинен мати достатню силу, витривалість і спритність, щоб переносити важке спорядження, швидко пересуватися пересіченою місцевістю та зберігати стабільність під час стрільби, особливо в умовах тривалого бою, коли втома може суттєво вплинути на точність і концентрацію. Наприклад, підготовка снайперів включає спеціальні вправи для розвитку дихального контролю та м'язової стабільності, що дозволяють їм зберігати нерухомість під час тривалого прицілювання, що є критично важливим для точного влучання на великих відстанях.

Нові методики вогневої підготовки військовослужбовців розглядаються не лише як окрема складова системи бойового навчання, але й як критично важливий елемент загальної концепції підвищення боєздатності Збройних Сил, що інтегрується в структуру професійної, фізичної та тактичної підготовки особового складу. Її реалізація в умовах військових навчальних центрів, а також у підрозділах безпосереднього бойового призначення, тісно пов'язана з іншими дисциплінами, зокрема з тактикою дій у бою, топографією, інженерною справою та медичним забезпеченням. Головним вектором розвитку системи вогневої підготовки є активний пошук ефективних інструментів, методів та адаптивних форм навчання, що дозволяють формувати у військовослужбовців не лише базові стрілецькі навички, а й, насамперед, здатність безпечно, впевнено та технічно грамотно використовувати сучасні зразки стрілецької зброї в умовах реальних бойових дій. При цьому йдеться не про механічне виконання вправ по мішенях, а про опанування повноцінного комплексу дій, який охоплює фізичну координацію, психоемоційну стійкість, швидке прийняття рішень і дотримання вимог безпеки в динамічних, нестандартних ситуаціях [9].

Потребує уваги проблема організації вогневої підготовки на рівні батальйонів і рот, де значна частина занять часто має формальний характер або проводиться персоналом, який не має спеціальної підготовки у сфері стрілецького інструктажу. Часто особовий склад сприймає такі тренування не як можливість підвищити бойову майстерність, а як рутинний обов'язок, що зумовлено низькою мотивацією та слабкою методичною підготовкою інструкторів. Подібна ситуація значною мірою залежить від професіоналізму командирів та сержантського складу, які відповідають за організацію підготовки підрозділів.

Перш ніж розпочинати стрільбу з бойової зброї, військовослужбовець повинен належним чином підготуватись. Це передбачає прийняття стійкого положення, яке забезпечує оптимальну рівновагу, координацію рухів та можливість оперативно реагувати на зміну тактичної обстановки. На етапі попередньої підготовки до стрільби, навіть без використання зброї, доцільно моделювати положення тіла, витягнувши руки вперед у бойовій стійці, що дозволяє перевірити зручність амуніції, екіпірування, розташування кобури, елементів захисту слуху тощо, а в разі виявлення перешкод – усунути їх, не чекаючи початку виконання вправи. Це є обов'язковим для досягнення бойової готовності й концентрації. Після оголошення команди до відкриття вогню військовослужбовець зобов'язаний діяти швидко, впевнено і технічно виважено: витягнути пістолет із кобури, зняти його з запобіжника, дослати патрон у патронник і виконати визначену кількість пострілів у зону ураження. Всі дії мають

бути чіткими, позбавленими сумнівів, надмірної поспішності чи нервозності, оскільки будь-який прояв внутрішнього напруження, психоемоційної нестабільності чи моторної розгубленості може призвести до мимовільного тремору рук і, як наслідок, погіршення результативності стрільби [11, С. 69].

На практиці часто трапляються випадки, коли під час перших вправ на бойовому рубежі військовослужбовці-початківці демонструють підвищений рівень тривожності: стискають пістолет із надмірною силою, мають напружену позу (наявність синдрому “тремтячих рук”), губляться в діях і частково або повністю ігнорують отримані під час навчання рекомендації. Така реакція є типовою для організму людини, яка вперше стикається із ситуацією, що супроводжується гучними звуками пострілів, вибухом пороху, віддачею, тобто комплексом факторів, які активують архаїчні біологічні інстинкти страху. Усвідомлення того, що натисканням на спусковий гачок військовий запускає потенційно смертельний механізм, активізує захисні процеси в центральній нервовій системі, гальмуючи моторні реакції, пригнічуючи свідомі дії та викликаючи надмірну напругу, що може бути небезпечною в умовах застосування бойової зброї. На цьому фоні типовим є феномен “очікування пострілу”, коли стрілець не стільки контролює процес прицілювання, скільки внутрішньо готується до шоку від пострілу, що порушує плавність натискання на гачок, дестабілізує прицільні механізми й викликає відхилення траєкторії кулі. Внаслідок порушення дихання, прискореного серцебиття, підвищеного тиску та напруги м'язів рук навіть добре підготовлений стрілець може демонструвати нестабільні результати в умовах стресу [7, С. 102].

Необхідно чітко усвідомити, що неякісний постріл – це не поразка, а діагностичний сигнал про наявність технічних або психологічних збоїв, які підлягають корекції. В умовах бойової ситуації на якість стрільби значною мірою впливають індивідуальні фізіологічні особливості, зокрема: стан здоров'я, витривалість, рівень фізичної підготовки, швидкість адаптації до стресових факторів, що в сукупності визначають здатність контролювати свою поведінку в критичній ситуації. Прийняття вірного рішення в бойових умовах і його реалізація вкрай обмежені в часі, тому мисленнєві процеси у стрільця повинні бути тренуваними до такого рівня, коли інтелектуальна оцінка обстановки переходить у дію рефлексивно. У тих випадках, коли особа звикає до швидкісного ритму завдань (наприклад, стрільба в умовах обмеженого часу), вона втрачає схильність до помилок, пов'язаних з очікуванням пострілу, адже зосереджується на серії автоматизованих дій, засвоєних на етапі попередньої підготовки без набоїв. Оскільки дії військовослужбовця в незвичних умовах часто супроводжуються порушеннями когнітивних процесів,

необхідною є розробка й впровадження спеціальних фізичних вправ, які максимально відтворюють моторні й нейром'язові навантаження, властиві бойовій стрільбі. Одним із дієвих засобів розвитку моторної пам'яті є багаторазове уявне і практичне повторення дій стрільця із заплющеними очима. Саме такі вправи дозволяють сформувати точні рефлекторні реакції, які є критичними для роботи з озброєнням у темряві, диму, пилу та інших умовах обмеженої видимості [3].

Для забезпечення ефективного опанування навичок стрільби з сучасної стрілецької зброї в умовах підготовки військовослужбовців надзвичайно важливою є не лише практична складова, але й ґрунтовне вивчення нормативно-правової бази, що регламентує правила проведення стрільб, вимоги до безпеки та поведінки стрільця на вогневому рубежі, а також знання технічних характеристик озброєння, взаємодії його механізмів і складових частин та правил експлуатації в бойових умовах. Розуміння того, коли й за яких обставин стрільба має бути припинена, які команди подаються інструкторами, а також порядок реагування на позаштатні ситуації, є невід'ємним елементом професійної підготовки військовослужбовців.

Усі ці знання мають не лише вивчатися теоретично, але й закріплюватися на практиці з постійним контролем, супроводом та корекцією дій із боку кваліфікованого інструктора, який повинен володіти не лише високим рівнем бойової компетентності, а й методичною підготовкою та здатністю адаптувати навчальний матеріал до рівня сприйняття кожного конкретного військовослужбовця. Адже недбалість, неуважність або непрофесійне пояснення інструктором принципів поведінки зі зброєю можуть призвести не лише до формального порушення військової дисципліни, а й до катастрофічних наслідків, включаючи травмування особового складу чи навіть загрозу життю та здоров'ю [6].

Оскільки кожен військовослужбовець має різний рівень підготовки, відмінності у швидкості засвоєння нового матеріалу та психологічні особливості реагування на стресові ситуації, неабиякої актуальності в сучасних умовах набуває проблема індивідуалізації підходу до кожного бійця. Завдання інструктора полягає не тільки в передачі знань, а й формуванні впевненого, рішучого і технічно грамотного стрільця, здатного діяти в екстремальних умовах під впливом факторів часу та ворожого вогню. При цьому слід пам'ятати, що сучасне військове навчання значною мірою базується на принципах самоосвіти, а отже, успішність підготовки безпосередньо залежить від мотивації та самодисципліни кожного військовослужбовця. Зважаючи на те, що обсяг відведених академічних годин на навчальні стрільби у вищих військових навчальних закладах

часто становить 36-72 години на семестр, стає очевидним, що зазначеного бюджету часу недостатньо для повноцінного засвоєння всіх компонентів вогневої підготовки, особливо в частині роботи з новітніми зразками стрілецької зброї. Для досягнення високого рівня підготовки необхідно, щоб кожен військовий самостійно здійснював аналіз своїх помилок, використовував сучасні тренажери для моделювання стрільби, регулярно повторював технічні дії та формувалася моторні навички до рівня автоматизму [1, 8].

До ключових елементів точної стрільби з новітньої зброї належать: стійке та збалансоване положення тіла; правильний хват зброї; чітка послідовність дій без метушні; контрольоване, плавне натискання на спусковий гачок; здатність стрільця зберігати психологічну рівновагу та бути стресостійким у найскладніших бойових ситуаціях. Найважливіше правило стрільця – не чекати пострілу, а усвідомлено й спокійно виконувати повний цикл дій. Порушення хоча б одного з цих компонентів може спричинити збої, які в реальному бою вартують набагато більше, ніж втрачені очки на навчальній стрільбі.

Сучасні електронні тренажери, які широко використовуються у військах, дають змогу формувати у військовослужбовців відпрацьовані, стійкі до стресу стрілецькі навички. Ці системи дозволяють імітувати процес прицілювання й ведення вогню з використанням лазерного сенсора, що фіксує всі координати прицілу та момент пострілу на екрані монітора, завдяки чому інструктор і сам стрілець можуть оперативно виявити типові помилки й внести корективи. Найпоширенішими помилками, які фіксуються при роботі з такими тренажерами, є: порушення концентрації уваги (зміщення фокуса з прицільних пристроїв на мішень або спусковий гачок); помилковий вибір зони прицілювання (приціл не в центрі мішені); різке натискання на гачок, зумовлене психологічним тиском або браком часу на виконання вправи. Для їх уникнення застосовуються методики ізоляції руху пальця, роботи вздовж осі ствола, а також постановка однакової позиції пальця на спусковий гачок, що легко моделюється за допомогою інтерактивних технологій. Разом із тим тренажери не повинні повністю замінювати роботу з бойовою зброєю, оскільки не передають реалістичну віддачу, акустичний супровід та психологічне навантаження, пов'язані тим фактом, що кожен постріл у реальній ситуації може мати фатальні наслідки [19, С. 52]. Саме тому доцільним є поєднання технологічного навчання з обов'язковими тренуваннями на полігонах із використанням холостих і бойових патронів, що дозволяє готувати бійців не лише до точності дій, а й до самоконтролю у стресовому середовищі реального бою.

У результаті такої підготовки формується не лише технічна, але й тілесна звичка до зброї, коли

стрілець не відчуває дискомфорту від її ваги, руху механізмів чи специфіки прицільних дій. Саме досягнення автоматизму при володінні зброєю, закріплене фізичними навичками й психоемоційною витримкою, забезпечує бойову готовність військовослужбовця в умовах підвищеного ризику й фізичного навантаження. Водночас не менш важливою за фізичну є психологічна складова підготовки, оскільки навіть досконале технічне опанування зброї втрачає практичну цінність, якщо стрілець не здатен зберігати холодний розум і дієздатність у критичних ситуаціях. Завдання психологічної підготовки полягає у формуванні внутрішньої стійкості, готовності діяти в умовах загрози життю, а також розвитку рішучості, впевненості та навичок контролю стресу, що є фундаментальними для ефективного використання новітніх зразків стрілецької зброї в умовах сучасного бою [13, С. 182].

Особливу категорію складають військовослужбовці, які повертаються до служби після тривалих перерв або переводяться до бойових підрозділів із тиллових частин. Навіть після проходження базової підготовки, в умовах активної експлуатації зброї в реальних бойових діях спостерігається втрата навичок або накопичення хибних дій, що потребує проведення поглибленої індивідуальної корекції. Це актуально і для тих випадків, коли вогнева підготовка здійснюється особами без фахової стрілецької освіти, що обмежує ефективність занять і унеможливує виявлення типових помилок під час виконання вправ. У цьому контексті першочерговим завданням стає підготовка кваліфікованих інструкторів, які не лише добре володіють штатною стрілецькою зброєю, але й здатні грамотно навчати інших, застосовуючи методики підготовки до використання новітніх зразків озброєння (автоматизовані гвинтівки, прицільні комплекси з лазерними та тепловізійними модулями, цифрові системи контролю вогню тощо). Практичні заняття з вогневої підготовки доцільно розпочинати з відпрацювання базових елементів техніки стрільби без використання набоїв, тобто з так званої холостої підготовки, що дозволяє формувати стійкі моторні навички та усувати грубі помилки до переходу на бойову стрільбу. Такі тренування можуть включати як групову, так і індивідуальну роботу з навчальною зброєю, моделювання реакції на команду, тренування на таймер, дотримання тактичних нормативів тощо [4].

Наступним етапом є виконання підготовчих вправ у повільному темпі – спочатку з однієї руки, що є критично важливим у бойових умовах, коли інша рука може бути зайнята, поранена або використовується для утримання засобів зв'язку, спорядження чи навіть противника. Після цього необхідно перейти до дворукого утримання зброї, що дозволяє знизити рівень неконтрольованих м'язових скорочень та підвищити точність стрільби. Завершальний етап

включає опанування стрільби в складних умовах: з різних положень (стоячи, з коліна, лежачи), після пересування, з використанням укриттів, у нічний час або за інших умов обмеженої видимості. Для ефективної реалізації цих завдань у навчальному процесі слід задіювати тренажери, макети укриттів, мобільні платформи, світлозвукові сигнали, а також таймери для відстеження часу реакції та вироблення стресостійких навичок.

Технічна підготовка охоплює освоєння принципів роботи зброї, включаючи її неповне збирання, розбирання, чищення та усунення несправностей, що є особливо важливим у польових умовах, де доступ до професійного ремонту може бути обмеженим, а також навчання правильного використання прицільних систем, які часто включають складні оптичні та електронні компоненти, що потребують від стрільця не лише технічних знань, але й умінь швидко адаптуватися до нових технологій. Наприклад, використання тепловізійних прицілів вимагає розуміння принципів теплового випромінювання та вміння розрізняти цілі в умовах низької видимості, що накладає додатковий рівень складності до процесу підготовки [16, С. 195].

Тактична підготовка спрямована на розвиток умінь стрільця діяти в складних бойових сценаріях, включаючи міські бої, де необхідно враховувати обмежений простір і велику кількість перешкод, або операції в умовах відкритого простору, де стрілець може бути уразливим для контратаки, що вимагає від нього вміння правильно вибирати позицію, використовувати укриття та координувати свої дії з іншими членами команди (підрозділу). Сучасні методи підготовки часто включають симуляційні тренування, які використовують віртуальну реальність для створення реалістичних бойових сценаріїв, що дає стрільцям можливість відпрацьовувати тактичні навички в безпечному середовищі, розвиваючи при цьому вміння швидко аналізувати ситуацію та приймати обґрунтовані рішення.

Психологічна підготовка є не менш важливою, оскільки сучасний стрілець часто діє в умовах високого стресу, де необхідно зберігати холонокровність, швидко реагувати на загрози та приймати рішення, які можуть мати фатальні наслідки, що вимагає від нього високого рівня емоційної стійкості та здатності справлятися з психологічним тиском. Спеціальні програми підготовки, такі як тренування в умовах штучно створеного стресу або симуляція бойових ситуацій із високим рівнем невизначеності, допомагають стрільцям розвивати психологічну витривалість, що дозволяє їм зберігати концентрацію та ефективність навіть у найскладніших умовах [18, С. 147-148]. Поряд із цим стрілецька зброя нового покоління попри всі свої технологічні переваги залишається лише інструментом, ефективність якого залежить від майстерності стрільця, який

повинен не лише досконало володіти технічними аспектами її використання, але й бути готовим до фізичних, тактичних і психологічних викликів, що супроводжують бойові дії. Зазначений факт ще раз підкреслює важливість комплексної підготовки, яка поєднує всі ці елементи в єдину систему.

Висновки

У роботі досліджено конструктивні характеристики сучасних зразків стрілецької зброї, зокрема автоматичних гвинтівок і снайперських систем, оснащених лазерними далекомірами, тепловізійними приладами й балістичними обчислювачами. Це забезпечує ефективне ураження цілей на значних відстанях з урахуванням різноманітних факторів навколишнього середовища. Проаналізовано основні аспекти бойової підготовки стрільців, які включають фізичну підготовку, технічні навички, тактичне мислення та психологічну стійкість. Для досягнення максимального ефекту ці компоненти мають функціонувати як єдина адаптивна система, спрямована на формування здатності військовослужбовців ефективно діяти в реальних бойових умовах. Виявлено проблемні питання організації вогневої підготовки на рівні батальйонів та рот, де практичні заняття нерідко проводяться формально, без урахування особливостей застосування новітньої зброї, що негативно впливає на загальну ефективність навчання.

Обґрунтовано важливість використання інтерактивних тренажерів і технічних комплексів нового покоління, які дають можливість реалістично моделювати бойові ситуації та формувати відпрацьовані, автоматизовані дії військовослужбовців. Це критично важливо для успішної стрільби в умовах стресу, поганої видимості чи підвищеного фізичного й психологічного навантаження. Наведено особливості побудови навчальних курсів вогневої підготовки з урахуванням поступового зростання складності завдань – від базового холостого тренування до реальних стрільб у симуляційних і польових умовах. Запропоновано комплексну модель підготовки стрільця до ефективного використання новітніх зразків стрілецької зброї. Вона передбачає поєднання когнітивного аспекту (вивчення технічних характеристик зброї й балістики), моторної підготовки (практичні заняття з поступовим зростанням інтенсивності), психологічного тренування (формування стійкості до стресових ситуацій) та технологічної адаптації (навчання користування цифровими прицілами та системами управління вогнем).

Список літератури

1. Бодирєв Д.А., Завістовський О.Д. Оптимізація методів проведення занять з вогневої підготовки курсантів Національної поліції України в умовах обмеженої видимості.

Електронне наукове видання “Аналітично-порівняльне правознавство”. 2024. № 4 (24). С. 358-361. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.04.57>

2. Бондаренко В.В. Професійна підготовка працівників патрульної поліції: зміст і перспективні напрями : монографія. К.: ФОП “Кандиба Т.П.”, 2018. 524 с.

3. Воробець Х.О., Наточій А.Д. Використання новітніх методик під час викладання дисципліни “Вогнева підготовка” у вищих навчальних закладах зі специфічними умовами навчання. *Підготовка поліцейських в умовах реформування системи МВС України. Збірник наукових праць ХНУ ВС МВС України*. 2019. С. 316-318.

4. Геращенко О.С., Головацький О.О. Особливості формування навичок влучної стрільби у здобувачів вищої освіти навчальних закладів із специфічними умовами навчання. *Південноукраїнський правничий часопис*. 2019. № 3. С. 47-51. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2019.3-45>.

5. Зеленський Є.С., Задорожня Р.В., Фісун Н.О. Використання інтерактивних методів навчання під час проведення практичних занять з вогневої підготовки. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2023. Вип. 80. Ч. 2. С. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2023.80.2.21>.

6. Казначеев Д.Г., Волков Ю.М. Особливості ідеомоторного тренування під час вогневої підготовки. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2022. № 11. С. 491-494. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-11/102>.

7. Конев О.Ю., Геращенко О.С. Удосконалення методики навчання вогневої підготовки здобувачів вищої освіти навчальних закладів зі специфічними умовами навчання та цивільних осіб в умовах воєнного стану. *Південноукраїнський правничий часопис*. 2022. № 1-2. С. 99-104. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2022.1-2.18>

8. Лопасєва О., Бойко О. Система підготовки поліцейських в Україні та закордонний досвід. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2023. Том 2. № 2. С. 56-62. DOI: 10.46299/j.isjel.20230202.07

9. Македон В.В. Дослідження процесів забезпечення соціальної відповідальності у провідних моделях корпоративного управління. *Вісник Харківського національного університету ільського господарства: Економічні науки*. Вип. 126. 2012. С. 198-206.

10. Мельник І.М., Канюка В.Є., Богайчук В.І. Основи володіння зброєю та вогневої підготовки студентів спеціальності “Правоохоронна діяльність” з використанням елементів снайпінгу. *Наукові записки. Серія: Право*. 2023. №14. С. 183-186. DOI: <https://doi.org/10.36550/2522-9230-2023-14-183-186>.

11. Наточій А.Д., Болгаренко В.М. Вогнева підготовка та формування професійних якостей у майбутніх офіцерів: взаємозв'язок та взаємозалежність. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2024. № 3. С. 64-72. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.03.64>.

12. Наумов Н., Лопасєва О. Методика вивчення вогневої підготовки у закладах вищої освіти Міністерства внутрішніх справ України. 2024. № 6(24). С. 582-587. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-582-587](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-582-587).

13. Пестрецов О.В. Удосконалення професійної компетентності майбутніх фахівців Державної кримінально-виконавчої служби України у контексті підвищення рівня

навичок управління вогнем. *Науковий вісник Сіверщини. Серія: Освіта. Соціальні та поведінкові науки*. 2023. № 1(10). С. 174-186. DOI: 10.32755/sjeducation.2023.01.174.

14. Рец В.В. Роль занять з вогневої підготовки у професійній підготовці майбутніх поліцейських. *Підготовка поліцейських в умовах реформування системи МВС України. Збірник наукових праць ХНУ ВС МВС України*. 2018. С. 220-222.

15. Тимофеев В., Дусяк О., Крисько В. Вогнева підготовка курсантів ЗВО зі специфічними умовами навчання в умовах воєнного стану. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2023. № 6. С. 372-376. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2023.06.63>

16. Ульянов О.І., Конєв О.Ю. Теоретико-методологічні засади удосконалення викладання вогневої підготовки у вищих навчальних закладах зі специфічними умовами навчання. *Південноукраїнський правничий часопис*. 2019. № 3. С. 191-198. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2019.3-46>.

17. Чабаненко Ю.С., Мельник О.М. Удосконалення методики проведення практичних занять з дисципліни "Вогнева підготовка" у майбутніх працівників правоохоронних органів. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2021. № 4. С. 559-562. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-4/138>.

18. Шелест Ю.Д., Найда В.О. Актуальні питання вдосконалення вогневої підготовки поліцейських в умовах воєнного стану. Харків, 2022. 281 с.

19. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. No 2(13(128)), p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

20. Рудковський О.М. Інтегрування системи тренажерів у процес бойової підготовки підрозділів Сухопутних військ. *Військово-технічний збірник*. 2013. № 2(9). 2013. С. 99-104. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.9.2013.99-104>

21. Баліцький Н.С., Рудковський О. М., Ванкевич П. І., Іваник Є. Г., Оборнев С. І. Використання сучасних навчально-тренувальних засобів у бойовій підготовці підрозділів Сухопутних військ. *Військово-технічний збірник*. № 23. 2020. С. 79 – 85. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.79-85>

22. Кохан В.Ф., Муковоз О.М., Лівінська Ю.Г., Рудковський О. М., Мезенцев Ю.О. Аналіз застосування тренажерних засобів у Сухопутних військах Збройних Сил України та провідних країнах світу. *Військово-технічний збірник*. № 32. 2025. С. 134-147. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.134-147>

References

1. Bodyryev D.A. and Zavistovskyi O.D. (2024), "Optimizatsiya metodiv provedennya zanyat' z vohnevoi' pidhotovky kursantiv Natsional'noyi politsiyi Ukrainy v umovakh obmezhenoyi vydyomosti" [Optimization of methods for conducting firearms training classes for cadets of the National Police of Ukraine in conditions of limited visibility], *Analitychno-porivnyal'ne pravoznavstvo*, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.04.57>.

2. Bondarenko V.V. (2018), "Profesiyna pidhotovka pratsivnykiv patrol'noyi politsiyi: zmist i perspektyvni napryamy" [Professional training of patrol police officers: content and promising directions], *Monohrafiya*, Kyiv: FOP "Kandyba T. P.", 524 p.

3. Vorobets' Kh.O. (2019), "Vykorystannya novi'tnikh metodyk pid chas vykladannya dystsypliny 'Vohneva pidhotovka' u VNZ zi spetsyfichnymi umovamy navchannya" [Use of modern methods in teaching the discipline "Firearms training" in higher education institutions with specific learning conditions], *Pidgotovka politseys'kykh v umovakh reformuvannya systemy MVS Ukrainy: zbirnyk naukovykh prats'*, Kharkiv: KhNUVS, pp. 316-318.

4. Herashchenko O.S. and Holovats'kyi O.O. (2019), "Osoblyvosti formuvannya navychok vluchnoyi stril'by u zdobuvachiv vyshchoyi osvity navchal'nykh zakladiv iz spetsyfichnymi umovamy navchannya" [Features of developing accurate shooting skills in students of higher education institutions with specific learning conditions], *Pivdemoukrayins'kyi pravnychyi chasopys*, No. 3, pp. 47-51. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2019.3-45>.

5. Zelenskyi Ye.S., Zadorozhnia R.V. and Fisun N.O. (2023), "Vykorystannya interaktyvnykh metodiv navchannya pid chas provedennya praktychnykh zanyat' z vohnevoi' pidhotovky" [Using interactive teaching methods during practical firearms training classes], *Naukovyy visnyk Uzhorods'koho natsional'noho universytetu*. Seriya: Pravo, Issue 80, Part 2, pp. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2023.80.2.21>.

6. Kaznachejev D.H. and Volkov Yu.M. (2022), "Osoblyvosti ideomotomoho trenuvannya pid chas vohnevoi' pidhotovky" [Features of ideomotor training during firearms training], *Yurydychnyy naukovyy elektronnyy zhurnal*, No. 11, pp. 491-494. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2022-11/102>.

7. Konev O.Yu. and Herashchenko O.S. (2022), "Udoskonalennya metodyky navchannya vohnevoi' pidhotovky zdobuvachiv vyshchoyi osvity ta tsyvil'nykh osib v umovakh voyennoho stanu" [Improvement of firearms training methods for higher education students and civilians in martial law conditions], *Pivdemoukrayins'kyi pravnychyi chasopys*, No. 1-2, pp. 99-104. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2022.1-2.18>.

8. Lopayeva O. and Boyko O. (2023), "Systema pidhotovky politseys'kykh v Ukraini ta zakordonny dosvid" [The police training system in Ukraine and foreign experience], *International Science Journal of Education & Linguistics*, Vol. 2, No. 2, pp. 56-62. DOI: 10.46299/j.isjel.20230202.07.

9. Makedon V.V. (2012), "Doslidzhennya protsesiv zabezpechennya sotsial'noyi vidpovidal'nosti u providnykh modelyakh korporativnoho upravlinnya" [Research on ensuring social responsibility in leading models of corporate governance], *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva. Ekonomichni nauky*, Issue 126, pp. 198-206.

10. Mel'nyk I.M., Kanyuka V.Ye. and Bohaychuk V.I. (2023), "Osnovy volodinnya zbroyeu ta vohnevoi' pidhotovky studentiv spetsial'nosti 'Pravookhoronna diyal'nist'" [Basics of weapon handling and firearms training of law enforcement students], *Naukovi zapysky. Seriya: Pravo*, No. 14, pp. 183-186. DOI: <https://doi.org/10.36550/2522-9230-2023-14-183-186>.

11. Natochii A.D. and Bolharenko V.M. (2024), "Vohneva pidhotovka ta formuvannya profesiynykh yakostey u maybutnikh ofitseriv: vzayemoz'v'yazok ta vzayemozalezhnist'" [Firearms training and the formation of professional qualities in future officers: interconnection and interdependence], *Analitychno-porivnyal'ne pravoznavstvo*, No. 3, pp. 64-72. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.03.64>.

12. Naumov N. and Lopayeva O. (2024), "Metodyka vyvchennya vohnevoi' pidhotovky u zakladakh vyshchoyi osvity Ministerstva vnutrishnikh sprav Ukrainy" [Methodology of studying firearms training in higher education institutions of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine], DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-582-587](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-582-587).

13. Pestretsov O.V. (2023), "Udoskonalennya profesiynoyi kompetentnosti maybutnikh fakhivtsiv Derzhavnoyi kryminal'no-vykonavchoyi sluzhby Ukrainy u konteksti pidvyshchennya rivnya navychok upravlinnya vohnem" [Improving the professional competence of future specialists of the State Criminal Executive Service of Ukraine in the context of enhancing fire management skills], *Naukovyy visnyk Sivershchyny. Seriya: Osvita. Sotsial'ni ta povedinkovi nauky*, No. 1(10), pp. 174-186. DOI: 10.32755/sjeducation.2023.01.174.

14. Rets V.V. (2018), "Rol' zanyat' z vohnevoi' pidhotovky u profesiyniy pidhotovtsi maybutnikh politseys'kykh" [The role of firearms training classes in the professional training of future police officers], *Pidgotovka politseys'kykh v umovakh reformuvannya systemy MVS Ukrainy: zbimyk naukovykh prats'*, Kharkiv: KhNUVS, pp. 220-222.

15. Tymofieiev V., Dusiak O. and Krysko V. (2023), "Vohneva pidhotovka kursantiv ZVO zi spetsyfichnymy umovamy navchannya v umovakh voyennoho stanu" [Firearms training of cadets of higher education institutions with specific training conditions under martial law], *Analitichno-porivnyal'ne pravoznavstvo*, No. 6, pp. 372-376. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2023.06.63>.

16. Ulyanov O.I. and Konev O.Yu. (2019), "Teoretyko-metodolohichni zasady udoskonalennya vykladannya vohnevoi' pidhotovky u VNZ zi spetsyfichnymy umovamy navchannya" [Theoretical and methodological foundations for improving the teaching of firearms training in higher education institutions with specific training conditions], *Pivdemoukrayins'kyi pravnychy chasopys*, No. 3, pp. 191-198. DOI: <https://doi.org/10.32850/sulj.2019.3-46>.

17. Chabanenko Yu.S. and Mel'nyk O.M. (2021), "Udoskonalennya metodyky provedennya praktychnykh zanyat' z dystsypliny 'Vohneva pidhotovka' u maybutnikh pratsivnykiv pravookhoronnykh orhaniv" [Improving the methodology of conducting practical classes in the discipline

'Firearms training' for future law enforcement officers], *Yurydychnyy naukovyy elektronnyy zhurnal*, No. 4, pp. 559-562. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-4/138>.

18. Shelest Yu.D. and Naida V.O. (2022), "Aktual'ni pytannya udoskonalennya vohnevoi' pidhotovky politseys'kykh v umovakh voyennoho stanu" [Topical issues of improving police firearms training in martial law conditions], Kharkiv, 281 p.

19. Makedon V., Myachin, V., Plakhotnik O., Fisunenka N. and Mykhailenko O. (2024), "Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No 2(13(128)), p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/17294061.2024.300796>

20. Rydkovs'kyi O.M. (2013), "Intehruvannya systemy trenazheriv u protses boyovoi pidhotovky pidrozdiliv Sukhoputnykh viysk" [Integration of the simulator system into the combat training process of Land Forces units], *Viys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk*, No. 2(9)/2013, pp. 99-104. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.9.2013.99-104>

21. Balits'kyi N.S., Rudkovs'kyi O.M., Vankevych P.I., Ivanyk Ye.H. and Oborniev S.I. (2020), "Vykorystannya suchasnykh navchal'no-trenuval'nykh zasobiv u boyoviy pidhotovtsi pidrozdiliv Sukhoputnykh viysk" [The use of modern training tools in the combat training of Land Forces units], *Viys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk*, No. 23/2020, pp. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.23.2020.79-85>

22. Kokhan V.F., Mukovoz, O.M., Livins'ka Yu.H., Rudkovs'kyi O.M. and Mezentsev Yu.O. (2025), "Analiz zastosuvannya trenazhernykh zasobiv u Sukhoputnykh viyskakh Zbroynykh Syl Ukrainy ta providnykh krainakh svitu" [Analysis of the use of simulation tools in the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine and leading countries of the world], *Viys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk*, No. 32/2025, pp. 134-147. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.134-147>

PECULIARITIES OF SHOOTER TRAINING FOR THE USE OF THE LATEST SMALL ARMS MODELS

A. Andriienko, B. Oliyarnyk, M. Chornyi

The article is dedicated to the analysis of modern small arms that combine innovative technologies, advanced ballistics principles, and complex electronic systems. Significant attention is paid to the peculiarities of shooter training, which combines physical, technical, tactical, and psychological components to ensure the effective use of weapons in combat conditions. In the context of modern armed conflicts, where technological superiority plays a key role, the relevance of the research is due to the need to improve the training systems for servicemen using high-tech small arms, as well as the search for effective methods to enhance their combat readiness. The aim of the article is to study the use of modern small arms and their technological features to formulate requirements for shooter training, as well as to identify key areas for improving fire training methodologies to ensure high shooting efficiency in combat conditions. The study employs methods of systemic and comparative analysis, generalization to assess the technological characteristics of weapons and the effectiveness of training methods, including simulation training and the use of electronic simulators. It is established that due to the integration of advanced materials, electronic systems, and specialized ammunition, the combat effectiveness of modern small arms is significantly increased. Along with this, it requires the shooter to have in-depth knowledge of ballistics, meteorology, and experience with digital technologies. It is revealed that comprehensive training, which includes physical exercises, tactical simulations, psychological training, and work with simulators, contributes to the formation of stable motor and reflex skills, reducing the impact of stress factors such as "shot anticipation." Problems of a formal nature in fire training within units and the need to improve the qualifications of instructors are identified. Further research should focus on the development of adaptive methods of individual shooter training, taking into account their psychophysiological characteristics, as well as improving training complexes for simulating real combat conditions.

Keywords: combat situation, fire training, training effectiveness, short-barreled small arms, preparation method, shot, shooting in a confined space, technology, ammunition type, simulator, short distance training, damage to the target, forms and methods, skills development.

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

Андрієнко А.М. (Andriienko A.)	194	Мащенко І.А. (Mashchenko I.)	34
Баган В.Р. (Bahan V.)	68	Мельник Ю.М. (Melnyk Yu.)	49
Білаш О.В. (Bilash O.)	169	Мількович І.Б. (Milkovych I.)	20, 115
Бубенщиков Р.В. (Bubenshchikov R.)	13	Мищенко Я.С. (Mishchenko Ya.)	34
Бударецький Ю.І. (Budaretskyi Yu.)	109	Настішин Ю.А. (Nastishin Yu.)	68
Васильєв М.І. (Vasyliiev M.)	55	Ніколюк В.Д. (Nikoliuk V.)	49
Величко Л.Д. (Velychko L.)	3, 169	Новак Д.А. (Novak D.)	141
Войтович М.І. (Voitovych M.)	3	Оліярник Б.О. (Oliarynyk B.)	194
Гузик Н.М. (Huzyk N.)	169	Пелехатий М.А. (Pelekhatyi M.)	34
Дзюба А.О. (Dzyuba A.)	109	Піскун С.В. (Piskun S.)	55
Заболотнюк В.І. (Zabolotniuk V.)	154	Похнатюк С.В. (Pokhnatiuk S.)	127
Заїка В.М. (Zaika V.)	90	Пустоваров В.В. (Pustovarov V.)	90
Залипка В.Д. (Zalypka V.)	100	Ратошнюк В.В. (Ratoshnyuk V.)	8
Зиков В.Г. (Zykov V.)	8	Рижов Є.В. (Ryzhov Ye.)	8, 161
Зубков А.М. (Zubkov A.)	13	Ріман О.О. (Riman O.)	146
Казан П.І. (Kazan P.)	115	Сакович Л.М. (Sakovych L.)	161
Каменцев С.Ю. (Kamencev S.)	13	Саницький М.А. (Sanytskyi M.)	176
Киричик С.М. (Kyrychuk S.)	34	Семеха С.М. (Semekha S.)	161
Киричук О.А. (Kyrychuk O.)	68	Серпухов О.В. (Serpukhov O.)	55
Королько С.В. (Korolko S.)	176	Сокульська Н.Б. (Sokulska N.)	169
Корольова О.В. (Korolova O.)	20, 115	Сорокатиий М.І. (Sorokatyi M.)	3
Красник Я.В. (Krasnik Y.)	13	Стах Т.М. (Stakh T.)	68
Красношапка Ю.В. (Krasnoshapka Yu.)	34	Тишко С.О. (Tyshko S.)	90
Кривцун В.І. (Kryvtsun V.)	34	Тлустий А.О. (Tlustiy A.)	27
Криховецький Г.Я. (Krykhoveretsky G.)	161	Фтемов Ю.О. (Ftemov Yu.)	185
Кропивницька Т.П. (Kropyvnytska T.)	176	Хаустов Д.Є. (Khaustov D.)	68
Кудимов С.М. (Kudymov S.)	127	Хаустов Я.Є. (Khaustov Ya.)	68
Кузавков В.В. (Kuzavkov V.)	27	Хахула В.В. (Khakhula V.)	115
Курята Я.Е. (Kuriata Ya.)	161	Чаган Ю.А. (Chahan Yu.)	8
Лаврут О.О. (Lavrut O.)	55, 90	Черняхівський І.В. (Cherniakhivskyi I.)	8
Левковський О.О. (Levkovskyi O.)	176	Чорний М.В. (Chornyi M.)	55, 194
Лунькова А.В. (Lunkova H.)	115	Шабатура Ю.В. (Shabatura Y.)	100
Макогон О.А. (Makogon H.)	34, 55	Шерихов І.В. (Sherykhov I.)	127
Мальков О.О. (Malkov O.)	127	Шостак Р.С. (Shostak R.)	146
Марцінко Н.М. (Martsinko N.)	154	Щигло В.О. (Shchyhlo V.)	13
Марченко О.В. (Marchenko O.)	55	Юнда В.А. (Yunda V.)	141
Матузко Б.П. (Matuzko B.)	55		

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Вимоги до підготовки і подання рукописів до «Військово-технічного збірника»

УДК (кегль – 12 пт)

← порожній рядок – 10 пт

А.В. Іщенко¹, О.М. Петров² (кегль – 12 пт)

← порожній рядок – 8 пт

¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів²Національний університет оборони України, Київ (кегль – 12 пт, курсив)

← порожній рядок – 12 пт

НАЗВА СТАТТІ (КЕГЛЬ – 12 ПТ; НАПІВЖИРНИЙ, ПО ЦЕНТРУ)

← порожній рядок – 12 пт

Анотація (мовою статті, обсяг – не менше 500 знаків): кегль – 10 пт; курсив, відступ першого рядка абзацу – 0,75 см; вирівнювання – за шириною).

← порожній рядок – 9 пт

Ключові слова: декілька ключових слів (кегль – 10 пт; курсив, вирівнювання – за шириною).

← порожній рядок – 12 пт

Вимоги до набору

Формат аркуша: А4.

Параметри сторінки (відступи від краю): зліва – 2,25 см; справа – 2,25 см; зверху – 2,5 см; знизу – 2 см.

Шрифт статті – Times New Roman; звичайний; кегль – 10 пт, міжрядковий інтервал (множник) – 1,1.

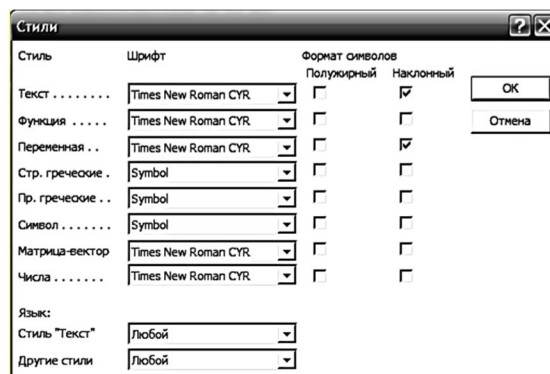
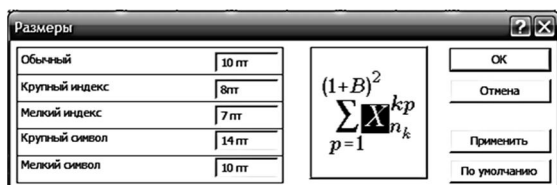
Текст статті розташовується у два стовпчики однакової ширини – 8 см, відстань між стовпчиками – 0,5 см; відступ першого рядка абзацу – 0,75 см; вирівнювання – за шириною.

Підзаголовок (кегль – 12 пт): напівжирний; відступів немає; вирівнювання – центроване; зверху та знизу відокремлюється 6 пунктами.

Набір формул: редактор формул MS Equation.

ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ використовувати для набору формул графічні об'єкти, кадри й таблиці.

Розмір та стиль формул:



Таблиці повинні мати назву (напівжирний, кегль – 9), яку розміщують над таблицею і друкують симетрично до тексту.

Рисунки обов'язково супроводжуються підписаними підписами (напівжирний, кегль – 9). Підписунокій повинен розміщуватися безпосередньо під рисунком та має бути вирівняним за шириною.

Кольорові рисунки публікуються в кольоровому форматі online, але у форматі сірого при друці на папері, а тому повинні забезпечувати належну якість після друку у формат сірого.

Допускається розташування великих рисунків, формул і таблиць в одну колонку (до 16,5 см).

Наводиться два списки літератури (виділяються підзаголовком та оформлюється (кегль – 9 пт, курсив)):

Список літератури: відповідно до ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання: загальні положення та правила складання".

References: англійською мовою та транслітерацією латиницею – Зразок оформлення наведено нижче.

References наводиться окремим блоком, після попереднього Списку літератури, повторюючи послідовність бібліографічних посилань на цитовані літературні джерела (надалі: посилання). Кожне посилання у блоці **References** оформлюється у відповідності до Harvard style BSI: British Standards Institution.

Список літератури (References) повинен включати:

- не менше 10 посилань;
- не менше 60% посилань з ідентифікатором цифрового об'єкта (**DOI** – Digital Object Identifier);
- не менше 40% посилань, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Список літератури (References) не може включати більше 20% самоцитовування авторів.

Структура рукопису

Текст рукопису статті розбивається на відповідні розділи із **підзаголовками** згідно зі структурою: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, на які спирається автор; **формулювання мети статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з цього дослідження та опис їхнього значення для подальшого розвитку досліджуваної наукової проблеми; **список літератури (References)**.

Отримані результати, які пропонуються до друку в науковій статті, повинні нести наукову новизну та практичне значення. Процедура отримання наукового результату повинна бути описана настільки детально, щоб Читач міг самостійно відтворити результат чи оцінити його достовірність. Якщо Читач не має можливості перевірити достовірність отриманого результату, то такий рукопис кваліфікується як інформаційне повідомлення. Рукописи, що не відповідають тематиці журналу, не несуть наукової новизни або мають характер інформаційного повідомлення, до розгляду не приймаються та відхиляються за рішенням головного редактора.

На останньому аркуші статті після Списку літератури (References) наводяться (9 кегль, міжрядковий інтервал – 1,0): назва статті, прізвища та ініціали авторів, анотація (де зазначається наукова проблематика, суть досліджень, використані методи, отримані результати і висновки), ключові слова.

Якщо основною мовою статті є українська, то анотація англійською мовою повинна бути розширеною та мати загальний обсяг не менш ніж 1800 знаків, включаючи ключові слова.

Якщо основною мовою статті є англійська, то анотація українською мовою повинна бути розширеною та мати загальний обсяг не менш ніж 1800 знаків, включаючи ключові слова.

Відомості про авторів (подаються українською та англійською мовами), які включають в себе:

- прізвище, ім'я та по батькові;
- назва установи, де працює автор, її місце розташування (місто, країна);
- посада, науковий ступінь, вчене звання;
- обліковий запис автора ORCID.
- контактний номер телефону, електрона адреса.

Подання матеріалів

Обсяг рукопису – від 3 до 13 сторінок українською або англійською мовами. Для запрошених статей – обсяг до 20 сторінок.

Статті, написані англійською мовою на високому професійному рівні, мають пріоритет під час розгляду та публікації. В разі подання статті англійською мовою обов'язково додавати повний переклад статті.

Для публікації необхідно надати статтю в електронній формі (формат Microsoft Word 2003) з роздрукованим екземпляром, підписаним усіма авторами статті.

Необхідно обрати відповідну рубрику Військово-технічного збірника та зазначити автора для листування.

Рубрики ВТЗ

1. Розроблення та модернізація ОВТ
2. Бойове застосування ОВТ
3. Виробництво ОВТ.
4. Експлуатація та відновлення ОВТ
5. Стандартизація та метрологічне забезпечення ОВТ
6. Утилізація ОВТ
7. Захист ОВТ від засобів виявлення та ураження
8. Підготовка військових фахівців
9. Повідомлення

До рукопису додаються:

- **акт експертизи про наявність або відсутність інформації з обмеженим доступом;**
- **витяг із протоколу засідання кафедри (підрозділу);**
- **супровідний лист (для авторів з інших установ та організацій).**

Матеріали, що оформлені неохайно і не відповідають зазначеним вимогам, редакцією не розглядаються. Рукописи, не прийняті до друку або відхилені редакцією, авторам не повертаються.

Відповідальність за якість і зміст статті несуть автор, кафедра (підрозділ) та рецензент.

Зразок оформлення списку бібліографічних посилань та References

Характеристика джерела	Бібліографічне посилання ДСТУ 8302:2015	References Harvard style BSI (British Standards Institution)
Книги	Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів : навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 160 с.	Vasilevskiy O.M. and Ihnatenko O.G. (2013), " <i>Normuvannia pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv</i> " [Standardization of reliability indicators of technical means]: Tutorial, VNTU, Vinnytsia, 160 p. [in Ukrainian].
Авто-реферати дисертацій	Башинська О.О. Інформаційна технологія оцінки якості безпілотних авіаційних комплексів за даними технічної діагностики : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: Чернівці: нац. технол. ун-т, 2020. 20 с.	Bashynska O.O. (2020), "Informatsiina tekhnolohiia otsinky yakosti bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv za danymy tekhnichnoi diahnostryky" [Information technology for assessing the quality of safe emergency systems based on the data of technical diagnostics]: Abstract of Ph.D. dissertation. Chernihivskiy natsionalnyi tekhnolohichnyi universytet, Chernihiv, 20 p. [in Ukrainian].
Законодавчі та нормативні документи	Про затвердження Вимог до оформлення дисертації: Наказ Міністерства освіти і науки від 12.01.2017 р. № 40. <i>Офіційний вісник України</i> . 2017. № 20. С. 136–141.	The order of the Ministry of Education and Science (2017), "Pro zatverdzhennia Vymoh do oformlennia dysertatsii: nakaz Ministerstva osvity i nauky vid 12.01.2017 p. № 40" [About the statement of Requirements to registration of the dissertation]. <i>Ofitsiyni visnyk Ukrainy</i> . Issue 20. pp. 136–141. [in Ukrainian].
Патенти	Спосіб виявлення та ураження цілі інженерними боєприпасами: пат. 115362 Україна: МПК G06G7/80, G01C21/00. № 201611560 ; заявл. 15.11.2016 ; опубл. 10.04.2017, Бюл. № 7. 4 с.	Patent of Ukraine (2017), "Sposib vyivlennia ta urazhennia tsili inzhenernymi boieprypasamy" [Method of detecting and hitting target with engineering ammunition]. Patent 115362 Ukraina, IPC G06G7/80, G01C21/00. № 201611560; stated 15.11.2016; published 10.04.2017, Bulletin № 7, 4 p. [in Ukrainian].
Стандарти	ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: <i>Держстандарт України</i> , 1994. 32 с.	State Standart of Ukraine (1994), "2862-94. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy" [2862-94. Methods of calculating reliability indicators. general requirements]. <i>Derzhstandart Ukrainy</i> , Kyiv, 32 p. [in Ukrainian].
Матеріали конференцій (тези, доповіді)	Глухов С. І., Романенко В. П. Методика діагностування та прогнозування технічного стану об'єктів РЕТ при використанні автоматизованої системи технічного діагностування. <i>Сучасні інформаційні технології та кібербезпека</i> : зб. тез доп. наук.-практ. конф., Житомир. С. 195-196.	Hlukhov S.I. and Romanenko V.P. (2018), "Metodyka diahnostuvannia ta prohnozuvannia tekhnichnoho stanu obektiv RET pry vykorystanni avtomatyzovanoi systemy tekhnichnoho diahnostuvannia" [Methods of diagnosing and forecasting the technical condition of RET objects using an automated system of technical diagnostics]. <i>Modern information technologies and cybersecurity</i> : Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Zhytomyr. pp. 195-196.
Періодичні видання (статті)	Чорний М. В., Купріненко О. М., Матузко Б. П. Формалізація «еталонного» механіка-водія в системі оцінювання рівня базової підготовки з водіння бойових машин на тренажерах. <i>Військово-технічний збірник</i> . Львів, 2019. № 21. С. 78–86. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.78-86 . (дата звернення: 15.04.2020).	Chorny M.V., Kuprinenko O.M. and Matuzko B.P. (2019), "Formalizatsiia «etalonnoho» mekhanika-vodiia v systemi otsiniuvannia rivnia bazovoi pidhotovky z vodinnia boiovykh mashyn na trenazherakh" [Formalization of the "reference" driver-mechanic in the system of assessment of the level of basic training in driving combat vehicles on simulators]. <i>Military Technical Collection</i> . Lviv, 2019. Issue № 21. pp. 78–86. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.78-86 . (Accessed 15 April 2020). [in Ukrainian].
Електронні ресурси	Постанова КМУ від 11 грудня 1999 р. № 2294 «Про упорядкування робіт з виявлення, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів на території України та взаємодію під час їх виконання». URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2294-99-п . (дата звернення: 15.11.2019).	Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (1999), "Postanova KМУ vid 11 hrudnia 1999 r. № 2294 "Pro uporiadkuvannia robot z vyivlennia, zneshkodzhennia ta znyshchennia vybukhonebezpechnykh predmetiv na terytorii Ukrainy ta vzaiemodiiu pid chas yikh vykonannia" [Resolution of December 11, 1999 № 2294 "On streamlining the detection, disposal and destruction of explosives on the territory of Ukraine and interaction during their implementation"]. URL: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2294-99-п . (Accessed 15 November 2019). [in Ukrainian].
Бойовий статут	Бойовий статут Сухопутних військ Збройних Сил України. Частина III (взвод, відділення, екіпаж танка). Командування Сухопутних військ Збройних Сил України. Київ, 2010. 259 с.	The Armed Forces of Ukraine (2010), "Boiovyi statut Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy. Chastyna III (vzvod, viddilennia, ekipazh tanka)" [Combat Charter of the Land Forces of the Armed Forces of Ukraine. Part III (platoon, division, tank crew)]. Kyiv, 259 p. [in Ukrainian].
Техніч. опис інструкція з експл.	Бойова машина піхоти БМП-2. Технічний опис та інструкція з експлуатації. Частина 2 – Київ: <i>Видавництво</i> , 2001. 325 с.	Infantry fighting vehicle IFV-2. (2001), "Boiova mashyna pikhoty BMP-2. Tekhnichniy opys ta instrukciia z ekspluatatsii. Chastyna 2" [Technical description and operating instructions. Part 2]. <i>Vydavnytstvo</i> , Kyiv, 325 p. [in Ukrainian].

ЗМІСТ / LIST

РОЗРОБЛЕННЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОВТ DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT	
Величко Л.Д., Войтович М.І., Сорокатий М.І.	ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ШВИДКОСТІ СНАРЯДА В МОМЕНТ ПЕРЕХОДУ ЙОГО РУХУ ВІД ПІДЗВУКОВОЇ ДО ДОЗВУКОВОЇ ШВИДКОСТЕЙ 3
Velychko L., Voitovych M., Sorokatyi M.	DETERMINING THE SPEED OF A PROJECTILE AT THE MOMENT OF ITS TRANSITION FROM SUBSONIC TO TRANSONIC SPEED
Зиков В.Г., Ратошнюк В.В., Чаган Ю.А., Черняхівський І.В., Рижов Є.В.	ОСОБЛИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ СИСТЕМ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ МАСАМИ ТА МЕТОДИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ 8
Zykov V., Ratoshnyuk V., Chahan Y., Cherniakhivskiy I., Ryzhov Ye.	SPECIFICS OF NONLINEAR VIBRATIONS IN SYSTEMS WITH CONCENTRATED MASSES AND METHODS OF THEIR STUDY
Зубков А.М., Красник Я.В., Каменцев С.Ю., Бубенщиков Р.В., Щигло В.О.	ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ І АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ 13
Zubkov A., Krasnik Y., Kamencev S., Bubenshchykov R., Shchyhlo V.	PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF DOMESTIC MISSILE COMPLEXES AND ARTILLERY SYSTEMS
Корольова О.В., Мількович І.Б.	ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОКРАЩЕННЯ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ НА ОЦІНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ 20
Korolova O., Milkovych I.	DETERMINATION THE IMPACT OF PARTIAL METRIC IMPROVEMENT ON THE EVALUATION OF UNMANNED GROUND VEHICLE COMPLEX APPLICATION EFFECTIVENESS
Кузавков В.В., Тлустий А.О.	ФОРМУВАННЯ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНИХ ЗМІН СТРУМУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ 27
Kuzavkov V., Tlustiy A.	GENERATION OF PSEUDORANDOM SEQUENCES BASED ON STOCHASTIC VARIATIONS IN THE CURRENT OF RADIOELECTRONIC DEVICES
Макогон О.А., Пелехатий М.А., Красношапка Ю.В., Киричик С.М., Машенко І.А., Кривцун В.І., Міщенко Я.С.	ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТАНКО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАНКОВОГО БАТАЛЬЙОНУ В УМОВАХ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ 34
Makogon H., Pelekhatyi M., Krasnoshapka Yu., Kyrychuk S., Mashchenko I., Kryvtsun V., Mishchenko Ya.	ADVANCED RELIABILITY INDICATORS OF THE OF TANK-TECHNICAL SUPPORT SYSTEM FUNCTIONALITY FOR A TANK BATTALION IN THE MINDS OF COMBAT ACTIVITIES
Мельник Ю.М., Ніколюк В.Д.	ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МОДЕЛЬНОМУ ПУЛЬСУЮЧОМУ ДЕТОНАЦІЙНОМУ ДВИГУНІ ДО БПЛА 49
Melnyk Yu., Nikoliuk V.	NUMERICAL STUDY OF THERMOGASDYNAMIC PROCESSES IN A MODEL PULSE DETONATION ENGINE
Серпухов О.В., Макогон О.А., Васильєв М.І., Піскун С.В., Марченко О.В., Лаврут О.О., Матузко Б.П., Чорний М.В.	ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ СИСТЕМИ АМАР-ADS ДЛЯ ЗРАЗКІВ БТОТ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ПЕРЕВІРКИ СТАТИСТИЧНИХ ГІПОТЕЗ 55
Serpukhov O., Makogon H., Vasyliiev M., Piskun S., Marchenko O., Lavrut O., Matuzko B., Chornyi M.	RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF ADAPTATION OF THE AMAP-ADS SYSTEM FOR BTOT SAMPLES BASED ON THE MATHEMATICAL APPARATUS FOR VERIFICATION OF STATISTICAL HYPOTHESES

Стах Т.М., Хаустов Д.Є., Баган В.Р., Хаустов Я.Є., Киричук О.А., Настішин Ю.А.	МЕТОД ОЦІНКИ ЙМОВІРНОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛЕЙ ЗА ЇХНІМИ ПРИКМЕТНИМИ РОЗМІРНИМИ ОЗНАКАМИ НА ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ З ПРИЦІЛЬНО-СПОСТЕРЕЖНОГО КОМПЛЕКСУ ЗРАЗКІВ БРОНЕТАНКОВОГО ОЗБРОЄННЯ 68
Stakh T., Khaustov D., Bahar V., Khaustov Ya., Kyrychuk O., Nastishin Yu.	METHOD FOR ESTIMATING PROBABILITIES OF TARGET DETECTION AND RECOGNITION BY THEIR DIMENSIONAL SIGNATURES IN DIGITAL IMAGES FROM THE SIGHTSEEING COMPLEX OF ARMoured VEHICLE WEAPON SYSTEMS
Тишко С.О., Лаврут О.О., Заїка В.М., Пустоваров В.В.	МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ШКАЛ ЧАСУ СТАНЦІЙ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ БЕЗПЛОТНИХ КОМПЛЕКСІВ 90
Tyshko S., Lavrut O., Zaika V., Pustovarov V.	SYNTHESIS OF A LOCAL NETWORK FOR NAVIGATION SUPPORT OF GROUND UNMANNED COMPLEXES BASED ON A CODE PSEUDOREMOTE METHOD
Шабатура Ю.В., Залипка В.Д.	ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ З БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ В КРОКУЮЧОМУ РЕЖИМІ 100
Shabatura Y., Zalyпка V.	THEORETICAL ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF GROUND ROBOTIC COMPLEXES WITH MULTIFUNCTIONAL MANIPULATORS IN THE STEPPING MODE

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ COMBAT EMPLOYMENT OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Дзюба А.О., Бударецький Ю.І.	МЕТОД І ЗАСОБИ ВСТАНОВЛЕННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ БОЄПРИПАСІВ НА ГАРМАТАХ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ 109
Dzyuba A., Budaretskyi Yu.	THE METHOD AND MEANS OF INSTALLING RADAR MEASURING DEVICES ON ARTILLERY SYSTEMS FOR THE PARAMETERS OF AMMUNITION MOTION
Корольова О.В., Казан П.І., Хахула В.В., Лунькова А.В., Мількович І.Б.	ВАРІАНТ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДРОЗДІЛУ БЕЗЕКІПАЖНИХ НАЗЕМНИХ КОМПЛЕКСІВ 115
Korolova O., Kazan P., Khakhula V., Lunkova H., Milkovych I.	A VARIANT FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF UNMANNED GROUND VEHICLE UNIT APPLICATION
Мальков О.О., Похнатюк С.В., Кудимов С.М., Шерихов І.В.	ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ВІЙСЬК АРМІЙСЬКОЮ АВІАЦІЄЮ ЗА ДОСВІДОМ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ТА МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ 127
Malkov O., Pokhnatiuk S., Kudymov S., Sherykhov I.	PROBLEM ISSUES OF CLOSE AVIATION SUPPORT OF TROOPS BY ARMY AVIATION IN THE CONTEXT OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR AND POSSIBLE WAYS TO SOLUTION THEM
Новак Д.А., Юнда В.А.	ПОГЛЯДИ НА МОЖЛИВІСТЬ ОСНАЩЕННЯ ЧАСТИН І ПІДРОЗДІЛІВ РАКЕТНИХ ВІЙСЬК ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ БЕЗПЛОТНИМИ ЗАСОБАМИ УРАЖЕННЯ ВЕЛИКОЇ ДАЛЬНОСТІ 141
Novak D., Yunda V.	VIEWS ON THE POSSIBILITY OF EQUIPPING UNITS AND SUB-UNITS OF THE MISSILE FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE WITH UNMANNED LONG-RANGE
Шостак Р.С., Ріман О.О.	МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ВОГНЕВОЇ ПІДТРИМКИ РАКЕТНИМИ ВІЙСЬКАМИ І АРТИЛЕРІЄЮ 146
Shostak R., Riman O.	METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF FIRE SUPPORT BY MISSILE FORCES AND ARTILLERY

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ОВТ MAINTENANCE AND RECOVERY OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Заболотнюк В.І., Марцінко Н.М.	МАЛІ МАШИНИ ВЕЛИКОЇ ВІЙНИ: ТЕХНІЧНА РЕВОЛЮЦІЯ, FPV-ДРОНИ ТА МОБІЛЬНІ ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ У ТРАНСФОРМАЦІЇ ОБОРОННОЇ ТАКТИКИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ 154
Zabolotniuk V., Martsinko N.	SMALL MACHINES OF A GREAT WAR: THE TECHNICAL REVOLUTION OF FPV-DRONES AND THE TRANSFORMATION OF DEFENSIVE TACTICS IN RESOURCE-LIMITED CONDITIONS

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОВТ STANDARTIZATION AND METROLOGICAL SUPPORT OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT	
Сакович Л.М., Рижов Є.В., Криховецький Г.Я., Семеха С.М., Курята Я.Е. Sakovych L., Ryzhov Ye., Krykhovetsky G., Semekha S., Kuriata Ya.	УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ 161 IMPROVED TECHNIQUE FOR IMPLEMENTING CONDITION-BASED MAINTENANCE OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT
ЗАХИСТ ОВТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ PROTECTION OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT FROM DETECTION MEANS AND ENGAGEMENT	
Величко Л.Д., Гузик Н.М., Сокульська Н.Б., Білаш О.В. Velychko L., Huzuk N., Sokulska N., Bilash O.	ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ УБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ВІД ПОВІТРЯНИХ ЗАГРОЗ 169 ENGINEERING SOLUTIONS FOR PROTECTING STRUCTURES FROM AERIAL THREATS
Королько С.В., Левковський О.О., Саницький М.А., Кропивницька Т.П. Korolko S., Levkovskyi O., Sanytskyi M., Kropyvnytska T. Фтемов Ю.О. Ftemov Yu.	ЗАХИСНІ УКРИТТЯ З ПІДВИЩЕНОЮ УДАРНОЮ МІЦНІСТЮ НА ОСНОВІ ФІБРОБЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ 176 PROTECTIVE COVERINGS WITH INCREASED IMPACT STRENGTH BASED ON NEW GENERATION FIBER-REINFORCED CONCRETES АНТИДРОНОВИЙ ЗАХИСТ ЯК КЛЮЧОВИЙ ЕЛЕМЕНТ ІНЖЕНЕРНОЇ ПІДТРИМКИ МОБІЛЬНОСТІ ВІЙСЬК (СИЛ) В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ВІЙНИ 185 ANTI-DRONE DEFENSE AS A KEY ELEMENT OF ENGINEERING SUPPORT FOR MILITARY (FORCES) MOBILITY IN THE CONTEXT OF MODERN WARFARE
ПІДГОТОВКА ВІЙСЬКОВИХ ФАХІВЦІВ TRAINING OF MILITARY SPECIALISTS	
Андрієнко А.М., Оліярник Б.О., Чорний М.В. Andriienko A., Oliarnyk B., Chornyi M.	ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ СТІЛЬЦЯ ДО ВИКОРИСТАННЯ НОВІТНІХ ЗРАЗКІВ СТІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ 194 PECULIARITIES OF SHOOTER TRAINING FOR THE USE OF THE LATEST SMALL ARMS MODELS
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	203
Index of Names	
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	204
To the Authors	

ВІЙСЬКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Military Technical Collection

Том 33 № 2, 2025

Vol. 33 No. 2, 2025

Відповідальний за випуск *Є. Рижов*
Редактори: *Л. Актімова, Т. Животова,*
Н. Хмелюк
Коректори: *О. Мінеєва, Н. Іщук*
Комп'ютерний набір і верстка: *О. Корольова,*
І. Кметь, А. Патрушева

Person Responsible for Publication: *Ye. Ryzhov*
Editors: *L. Aktiamova, T. Zhyvotova,*
N. Khmeliuk
Proofreaders: *O. Minieieva*
Computer Typesetting and Layout:
O. Koroliova, I. Kmet, A. Patrusheva

Підписано до друку 15.12.2025 р.
Формат 60х90/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк.
Ум. друк. арк. 26,25
Наклад 100 прим.
Замовлення № 67

Approved for printing on December 15 2025
Format 60×90/8. Offset paper.
Typeface: Times New Roman. Offset printing.
Conventional printed sheets: 26,25
Print run: 100 copies
Order No. 67

Видавець та виготовлювач – Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32
тел.: (032) 258-44-12

Publisher and Manufacturer – National Army Academy
32 Heroiv Maidanu Street, Lviv, 79026, Ukraine
Tel.: +38 (032) 258-44-12

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 3939 від 14.12.2010 р.

Certificate of registration of the publishing entity in the State Register of Publishers,
Manufacturers and Distributors of Publishing Products DK No. 3939 dated December 14, 2010.



**Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, Україна
м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32**

