

Моделювання подолання інженерних загороджень противника

Modelling the Overcoming of Enemy Engineering Barriers

Володимир Коцюруба ^A

Corresponding author: доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України, e-mail: kotcuru@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6565-9576

Олег Хоптій ^B

ад'юнкту кафедри інженерної підтримки, e-mail: olegkhoptii@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-9462-5559

Volodymyr Kotsyuruba ^A

Corresponding author: Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine, e-mail: kotcuru@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6565-9576

Oleg Khoptii ^B

PhD Student of the Department of Engineering Support, e-mail: olegkhoptii@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-9462-5559

^A Командування Сил підтримки Збройних Сил України, м. Київ, Україна

^B Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^A Support Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: November 23, 2025 | Revised: December 9, 2025 | Accepted: December 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.9>

Мета роботи. Удосконалення напівмарківської математичної моделі подолання інженерних загороджень противника, яка, на відміну від існуючих, враховує особливості виконання завдань з подолання інженерних загороджень противника, що розглядається як окремий варіант операції (бою).

Метод. Метод системного аналізу, математичний метод моделювання, теорія марківських процесів.

Результати дослідження. Удосконалена напівмарківська математична модель подолання загороджень противника, що на відміну від існуючих, враховує імовірнісні показники процесів пропуску загальновійськових підрозділів, передачі проходів та переїзд до запасних районів, здійснення об'єднаної вогневої підтримки, радіоелектронної підтримки підрозділів розгордження та ураження засобів пророблення проходів.

Теоретична цінність дослідження. Приділена увага особливостям виконання завдань з розмінування із використанням специфіки застосування безпілотних систем розмінування. Враховані часові параметри дистанційної ідентифікації вибухонебезпечних предметів та зміна порядку прийняття рішень із використанням системи підтримки прийняття рішень.

Тип статті. Описова та дослідницька.

Purpose. Improvement of the semi-Markov mathematical model for overcoming enemy engineering obstacles, which, unlike existing models, takes into account the specifics of performing tasks to overcome enemy engineering obstacles, which are considered as a separate variant of an operation (battle).

Method. System analysis method, mathematical modelling method, Markov process theory.

Findings. An improved semi-Markov mathematical model for overcoming enemy barriers, which, unlike existing models, takes into account the probability indicators of the processes of passing through general military units, transferring passages and moving to reserve areas, providing combined fire support, radio-electronic support for clearing units, and the destruction of passage-making means.

Theoretical implications. Attention is paid to the specifics of performing demining tasks using the specific features of unmanned demining systems. The time parameters of remote identification of explosive objects and changes in the decision-making process using a decision support system are taken into account.

Paper type. Descriptive and research.

Ключові слова: воєнний конфлікт, операції (бойові дії), озброєння, військова та спеціальна техніка, засоби інженерного озброєння, вибухонебезпечні предмети, розмінування, розгордження, інженерні загородження.

Key words: military conflict, operations (combat), weapons, military and special equipment, engineering weapons, explosives, demining, clearing, engineering barriers.

Вступ

Досвід воєнних конфліктів останніх десятиліть, проведення Операції об'єднаних сил (ООС), антитерористичної операції (АТО) та війни РФ проти України свідчить про суттєве зростання ролі мінної зброї на полі бою [1,2]. Відносна дешевизна боєприпасів різного призначення та достатньо висока їх ефективність призводить до широкомасштабного застосування мінно-вибухових загороджень (МВЗ), які суттєво перешкоджають веденню наступальних операцій та призводять до суттєвих втрат в бойовій та іншій техніці, а також особового складу. Так, за оцінкою загальних втрат як противника так і наших підрозділів втрати від підриву на мінах та інших вибухонебезпечних предметах (ВНП) складають близько 20%, що є вагомим аргументом ефективності таких загороджень. Окрім стандартних інженерних боєприпасів противник широко застосовує системи дистанційного мінування та імпровізовані вибухові пристрої.

З метою усунення зазначеного проблемного питання розроблено ряд пропозицій щодо підвищення ефективності виконання завдань з розмінування за рахунок впровадження перспективної системи засобів розмінування основою якої є безпілотні системи розмінування.

Проведено аналіз відповідності існуючої системи розмінування сучасним умовам ведення збройної боротьби. Встановлено її невідповідність через відсутність комплексного підходу до процесу подолання інженерних загороджень противника. Для вирішення зазначеного проблемного питання запропоновано удосконалення математичної напівмарківської моделі подолання інженерних загороджень противника, що розглядається як окремий етап операції (бою).

Постановка проблеми

Необхідно зауважити, що традиційна тактика влаштування МВЗ передбачала щільність мінування перед переднім краєм оборони противника 1,0, що відповідало стандартному мінному полю глибиною до 100 м., що відповідало концепції розробки засобів (комплексів) розмінування (ЗКР) за класичним підходом [3-5]. Крім того, всі засоби механізованого подолання МВЗ були екіпажні. В першу чергу це пов'язано із недостатньо великими можливостями засобів ураження противника.

Проте, досвід ведення війни РФ проти України вказує на наявність тенденції щодо суттєвих змін щодо характеру та обсягів улаштування противником МВЗ. Так, щільність мінування перед переднім краєм оборони зросла в 2-2,5 рази, а точність ураження ЗКР вогневыми засобами противника, за рахунок високоточних боєприпасів та застосування ударних безпілотних літальних апаратів, збільшилась до 0-5 м. Наслідком чого збільшились втрати високовартісних ЗКР (типу WICENT-1, M-1150 тощо), які надані країнами партнерами. Темп наступу наших підрозділів знизився в 5-7 разів, а частка втрат техніки та особового складу інших підрозділів на інженерних боєприпасах в загальному вогневому ураженні збільшилась до 25%. Такий стан справ призвів ще до одного негативного наслідку – відмову або неякісне та несвоєчасне виконання завдань з розмінування. Отже, виникла нагальна проблема підвищення ефективності застосування ЗКР та забезпечення безпеки групам розмінування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У попередніх дослідженнях [6, 7] розглядалася напівмарківська модель розмінування і забезпечення інженерними боєприпасами (ІБП) адаптивної системи ЗКР. При цьому, авторами недостатньо уваги приділялось особливостям виконання завдань з розмінування із використанням специфіки застосування безпілотних ЗКР. Зокрема, не враховано часові параметри дистанційної ідентифікації ВВП на основі їх амплітудно-частотних характеристик та зміна порядку прийняття рішень із використанням системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Результати

Ефективність подолання інженерних загороджень противника будемо оцінювати за величиною ймовірності виконання комплексу завдань і заходів, що виконується за заданий час.

Для оцінки впливу на значення якісних показників функціонування угруповання військ в умовах ведення бойових дій за рахунок пророблення проходів у інженерних загородженнях можна скористатися підходом, запропонованим в [6].

Для цього, розглянемо розроблену в роботі [6] напівмарківську модель розмінування та забезпечення ІБП під час подолання інженерних загороджень противника. Орієнтований граф переходів системи $S = \{S1, S2, \dots, S14\}$ з одного стану в інший під час розмінування наведено на рисунку 1.

Представлений на рисунку 1 розмічений граф відображає всю кількість можливих

станів процесів подолання інженерних загороджень противника, характеристики кожного з яких істотно залежать від характеру та обсягів завдань з пророблення проходів у інженерних загородженнях [6].

Кінцевою метою аналізу такої НПМ є оцінка можливого впливу на обсяги завдань з подолання МВЗ та НВЗ противника, що виникають перед діючими угрупованнями військ.

Для завдання НПМ повинні бути відомі елементи матриці функцій розподілу випадкових інтервалів часу перебування системи в кожному стані $F(t)$ і матриці ймовірностей переходів її зі стану в стан P .

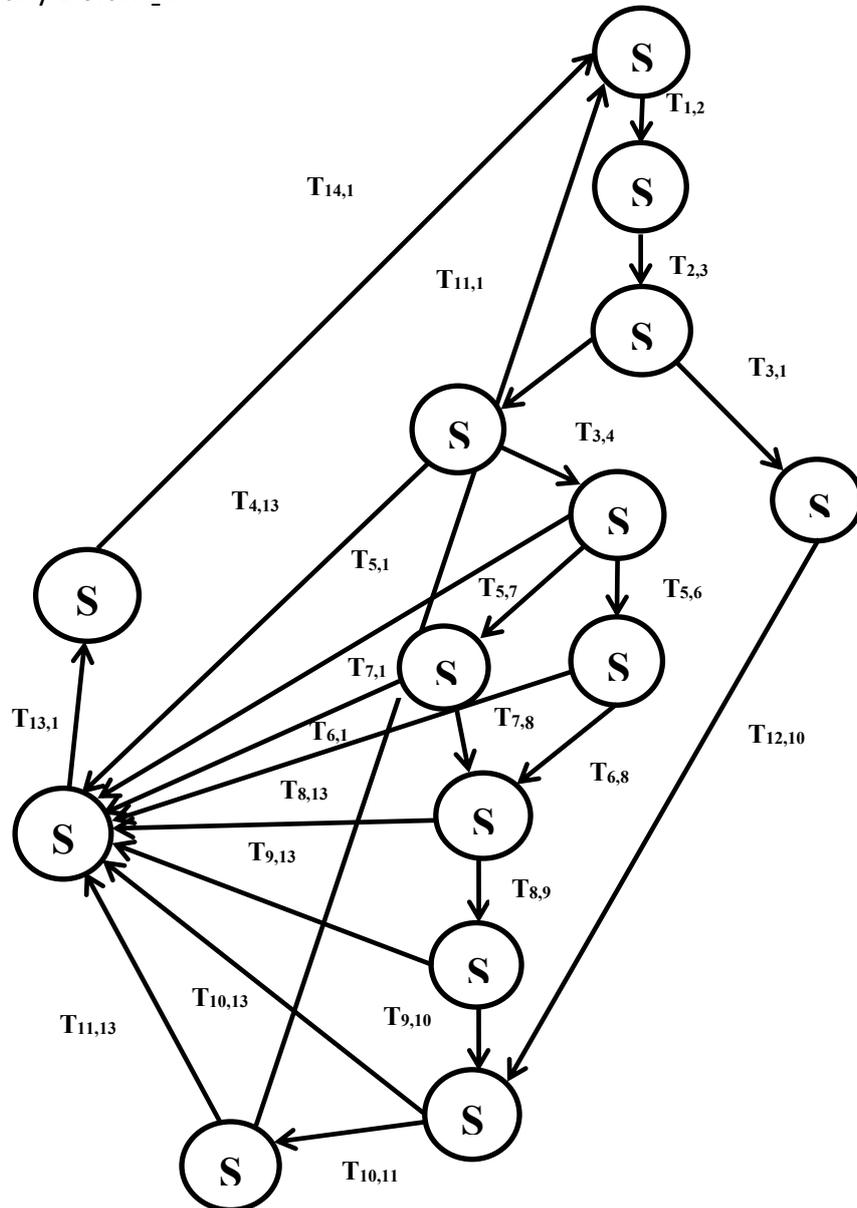


Рисунок 1 – Орієнтований граф станів процесу подолання інженерних загороджень противника

У загальному підході постановка задачі щодо моделювання подолання інженерних загороджень противника може бути здійснена у такий спосіб. Нехай система S може перебувати в одному зі станів:

- S_1 – отримання завдання на подолання інженерних загороджень;
- S_2 – прийняття рішення на подолання інженерних загороджень;
- S_3 – постановка завдання на подолання інженерних загороджень;
- S_4 – інженерна розвідка інженерних загороджень противника;

S_5 – висування засобів дистанційного розмінування (ЗДР) до замінованих ділянок місцевості;

S_6 – пророблення проходів у мінно-вибухових загородженнях (МВЗ);

S_7 – пророблення проходів у невибухових загородженнях (НВЗ);

S_8 – дорозвідка проходів у інженерних загородженнях;

S_9 – маркування проходів в інженерних загородженнях;

S_{10} – пропуск загальновійськових підрозділів по проходах;

S_{11} – передача проходів та переїзд до запасних районів;

S_{12} – здійснення об'єднаної вогневої підтримки (ОВП) та радіоелектронної підтримки (РЕП) підрозділів розгородження;

S_{13} – ураження засобів пророблення проходів;

S_{14} – відновлення (поповнення) втрат.

T_{ij} – значення часу перебування сил і засобів для подолання інженерних загороджень або її елементів (засобів для пророблення проходів) в стані i до переходу його в стан j ($i, j \in \overline{1, 14}$).

Для визначення показників ефективності застосування сил і засобів для подолання інженерних загороджень противника, як системи S , оцінимо ймовірність її перебування у момент часу t в одному із станів S_i при умові, що у початковий момент часу система перебувала у стані S_j , ($i = 1, 2, \dots, 14$).

Як відомо, подібна задача розглядалася у роботах [6-8], де моделювання функціонування воєнно-інженерних комплексів запропоновано проводити за допомогою марківського процесу із дискретною множиною станів та безперервним часом.

Для ПСЗР будемо вважати, що перехід системи S із одного стану в інший відбувається наступним чином:

1) у початковий момент часу $t = 0$ система перебуває у стані S_1 деякий випадковий час Q_1 (відлік часу починається з моменту початку розгортання сил і засобів для подолання інженерних загороджень). Тобто це час, який система S перебуває у стані S_1 до переходу у стан S_2 з довільною функцією розподілу $F_{12}(t)$;

2) перехід системи S зі стану S_i у стан S_j відбувається з ймовірністю $p_{ij} \geq 0$, $\sum_{j \in S} p_{ij} = 1$ для $j \in S$;

3) якщо зі стану S_i відбувся перехід у стан S_j , то в цьому стані система перебуває випадковий час Q_i із довільною функцією розподілу $F_{ij}(t)$ тощо.

Тоді згідно [6], математичною моделлю, яка описує процес подолання інженерних загороджень противника, є НПМ $\{v(t), t \geq 0\}$. Виходячи із [9], цей процес задамо конструктивно за допомогою початкового розподілу

$$p = \{p_i, i \in S\} \quad (i = 1, 2, \dots, 14), \quad (1)$$

і напівмарковської матриці

$$Q_{ij}(t) = p_{ij} F_{ij}(t) = P_i \{v(t) = S_j, Q_{ij} \leq t\}. \quad (2)$$

Тоді розв'язання задачі зводиться до визначення ймовірностей

$$P_{ij}(t) = P_i \{v(t) = S_j / v(0) = S_i\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, 14), \quad (3)$$

які згідно із [4] відповідають рівнянням

$$P_{ij}(t) = \delta_{ij} [1 - F_i(t)] + \sum_{k \in S} \int_0^t Q_{ik}(du) P_{kj}(t - u), \quad (4)$$

$$F_i(t) = \sum_j Q_{ij}(t) = \sum_j p_{ij} F_{ij}(t) = P_i(\theta_i < t),$$

де $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j, \\ 0, i \neq j. \end{cases}$; θ_i – час перебування системи S у стані S_i незалежно від переходу в наступний стан.

Приймаючи до уваги орієнтований граф переходів системи S (рис. 1), виникає можливість із використанням (2) визначити шукані ймовірності того, що НМП $v(t)$ перебуває у стані S_j за умови, що час перебування менший, ніж t .

Таким чином, співвідношення (3) та напівмарковська матриця (1) дозволяють дати відповіді на цілу низку питань відносно подолання інженерних загороджень противника, зокрема щодо часу перебування у відповідній множині станів, часу функціонування до моменту переходу у наступний стан тощо. Відмітимо також, якщо час перебування системи S у кожному стані S_i , ($i = 1, 2, \dots, 14$) буде розподілено за показовим законом, тоді із розглянутих співвідношень витікають формули для розрахунку ймовірностей, які одержані в роботі [6].

Визначимось із законом розподілу часу перебування системи S у кожному із можливих станів S , ($i = 1, 2, \dots, 14$).

При прийнятих припущеннях та отриманих даних матриця $\underline{F}(t)$ має вигляд

$$F(t) = \begin{pmatrix} 0 & F_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{2,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{3,12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{4,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{4,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{5,6} & F_{5,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{5,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{6,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{6,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{7,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{8,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{9,10} & 0 & 0 & F_{9,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{10,11} & 0 & F_{10,13} & 0 \\ F_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{12,10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{13,14} \\ F_{14,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, t \geq 0$$

(5)

Елементи матриці розраховуються із співвідношень [9].

Значення елементів матриці \underline{P} :

$$P = \begin{pmatrix} 0 & P_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{2,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3,12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{4,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{4,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,6} & P_{5,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{8,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{9,10} & 0 & 0 & P_{9,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{10,11} & 0 & P_{10,13} & 0 \\ P_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{11,13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{12,10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{13,14} \\ P_{14,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

(6)

можуть бути отримані за формулою

$$P_{ij} = \frac{1/T_{ij}}{\sum_{j=1}^J 1/T_{ij}}, \quad (7)$$

де T_{ij} – це середній час переходу з одного стану до іншого.

При наявності даних про значення елементів матриць \underline{F} і \underline{P} можна визначити середнє значення часу перебування в одному із станів.

Такий підхід дозволить виділити конкретні напрямки удосконалення ПСЗР.

Висновки

Таким чином розглянута в статті удосконалена напівмарківська математична модель, на відміну від існуючих, враховує особливості виконання завдань з подолання інженерних загороджень противника, що розглядається як окремий етап операції (бою). Вона враховує, зокрема, імовірнісні показники процесів пропуску загальновійськових підрозділів, передачі проходів та переїзд до запасних районів, здійснення об'єднаної вогневої підтримки (ОВП), радіоелектронної підтримки (РЕП) підрозділів розгородження та ураження засобів пророблення проходів.

Погляди, що викладені в статті, ґрунтуються на усвідомленні необхідності зміни існуючих підходів щодо створення перспективної системи подолання інженерних загороджень для успішного вирішення завдань в нових умовах ведення збройної боротьби та мінімізації ризику втрат особового складу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Проблемні питання підтримки дій військ (сил) Збройних Сил України в ході відбиття широкомасштабної збройної агресії РФ проти України (операції Об'єднаних сил) та шляхи їх вирішення : матеріали наук.-практ. сем. (Київ, 28 жовт. 2022 р.). Київ, 2022. 198 с.
2. Проблемні питання організації виконання заходів щодо влаштування і подолання інженерних загороджень підрозділами інженерних військ та можливості шляхи їх вирішення з урахуванням досвіду російсько-української війни : матеріали наук.-практ. сем. (Київ, 30 квіт. 2025 р.). Київ, 2025.
3. Керівництво з улаштування інженерних загороджень підрозділами Міністерства оборони України та Збройних Сил України. Затв. наказом Міністра оборони України від 10.07.2015 № 330. Київ, 2015. 176 с.
4. Керівництво з подолання інженерних загороджень підрозділами Збройних Сил України. Затв. наказом Міністра оборони України від 19.10.2016 № 390. Київ, 2016. 111 с.
5. Настанова з подолання (маркування) інженерних загороджень. Київ : Командування Сил підтримки Збройних Сил України, 2020. 209 с.
6. Коцюруба В.І. Використання напівмарковського процесу для моделювання функціонування комплексу розмінування // Труды університету : зб. наук. праць / Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського. Київ : НУОУ, 2014. № 2(123). С. 178–180.
7. Дачковський В.О., Стрельбіцький М. А. Математична модель технічного функціонування системи відновлення озброєння та військової техніки // Сучасні інформаційні технології

у сфері безпеки та оборони. Київ, 2020. Т. 38, № 2. С. 87–94.
<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-38-2-87-94>.

8. Мірненко В.І., Кітік С.В. Напівмарківська математична модель технічного обслуговування радіоелектронних засобів зенітного ракетного озброєння // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ, 2019. Т. 36, № 3. С. 29–34.
<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-29-34>.
9. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев : Наукова думка, 1976. 184 с.

References

1. National Defence University of Ukraine. (2022). *Problemni pytannia pidtrymky dii viisk (syl) Zbroinykh Syl Ukrainy v khodi vidbyttia shyrokomasshtabnoi zbroinoi agresii RF proty Ukrainy (operatsii Obiednanykh syl) ta shliakhy yikh vyrishennia: Materialy naukovo-praktychnoho seminaru (Kyiv, 28 zhovtnia 2022 r.)* [Materials of the scientific and practical seminar]. Kyiv.
2. National Defence University of Ukraine. (2025). *Problemni pytannia orhanizatsii vykonannia zakhodiv shchodo vlashtuvannia i podolannia inzhenernykh zahorodzen pidrozdilamy inzhenernykh viisk ta mozhlyvi shliakhy yikh vyrishennia z urakhuvanniam dosvidu rosiisko-ukrainskoi viiny: Materialy naukovo-praktychnoho seminaru (Kyiv, 30 kvitnia 2025 r.)* [Materials of the scientific and practical seminar]. Kyiv.
3. Ministry of Defence of Ukraine. (2015). *Kerivnytstvo z vlashtuvannia inzhenernykh zahorodzen pidrozdilamy Ministerstva oborony Ukrainy ta Zbroinykh Syl Ukrainy (Order No. 330, July 10, 2015)*. Kyiv.
4. Ministry of Defence of Ukraine. (2016). *Kerivnytstvo z podolannia inzhenernykh zahorodzen pidrozdilamy Zbroinykh Syl Ukrainy (Order No. 390, October 19, 2016)*. Kyiv.
5. Support Forces Command of the Armed Forces of Ukraine. (2020). *Nastanova z podolannia (markuvannia) inzhenernykh zahorodzen*. Kyiv.
6. Kotsiuruba, V. I. (2014). *Vykorystannia napivmarkovskoho protsesu dlia modeliuvannia funktsionuvannia kompleksu rozminuvannia* [Using a semi-Markov process to model the functioning of a demining system]. *Trudy universytetu*, 2(123), 178–180.
7. Dachkovskiy, V. O., & Strelbitskiy, M. A. (2020). *Matematychna model tekhnichnoho funktsionuvannia systemy vidnovlennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki* [Mathematical model of the technical functioning of the armament and military equipment recovery system]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 38(2), 87–94.
<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-38-2-87-94>.
8. Mirnenko, V. I., & Kitik, S. V. (2019). *Napivmarkivska matematychna model tekhnichnoho obsluhovuvannia radioelektronnykh zasobiv zenitnoho ракетного озброєння* [Semi-Markov mathematical model of maintenance of radioelectronic means of air defense missile systems]. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 36(3), 29–34.
<https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-29-34>.
9. Korolyuk, V. S., & Turbin, A. F. (1976). *Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniia* [Semi-Markov processes and their applications]. Naukova dumka.