

# Порівняння законів розподілу (моделей відмов) для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження на стадіях життєвого циклу “використання” та “підтримка”

## Comparison of distribution laws (failure models) for describing the processes occurring in the mathematical model of exploitation (storage) of weapons at the “use” and “maintenance” stages of the life cycle

**Тимур Куртсеітов**<sup>A</sup>

**Corresponding author:** д.т.н. професор, начальник кафедри, e-mail: kurttimur@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6478-6469

**Сергій Копашинський**<sup>A</sup>

к.т.н., старший науковий співробітник, начальник кафедри e-mail: kopashinskyas@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0117-0664

**Петро Яблонський**<sup>A</sup>

к.т.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: teyka1943@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2651-4299

**Tymur Kurtseitov**<sup>A</sup>

**Corresponding author:** Dr of technical sciences, professor, head of the department, e-mail: kurttimur@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6478-6469

**Serhiy Kopashynskii**<sup>A</sup>

Candidate of Technical Sciences, Senior Research, head of the department, e-mail: kopashinskyas@gmail.com, ORCID: 0000-0000-0002-0117-0664

**Petro Yablonskyi**<sup>A</sup>

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Docent of the Department, e-mail: teyka1943@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2651-4299

<sup>A</sup> Національна академія оборони України, м. Київ, Україна

<sup>A</sup> National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Received:** December 7, 2023 | **Revised:** December 25, 2023 | **Accepted:** December 31, 2023

**DOI:** 10.33445/sds.2023.13.6.8

**Мета роботи:** дослідити вплив параметрів моделей відмов на показник ефективності технічного обслуговування. Це дослідження може бути використано організаторами виробництва та науковим персоналом при виборі моделі відмов для проведення власних досліджень у сфері озброєння та військової техніки.

**Метод:** основними методами дослідження є: статистичного аналізу, чисельний метод, порівняльного аналізу.

**Результати дослідження:** запропоновані рекомендації щодо вибору моделі відмов дозволяють обґрунтувати вибір закону розподілу та, на відміну від відомих, базується на дослідженні впливу законів розподілу на комплексний показник надійності – коефіцієнт технічного використання, що дозволяє обґрунтувати доцільність використання дифузійних законів розподілу у якості моделі відмов відповідних зразків засобів ураження однократного застосування, які містять різномірні складові частини, а саме: радіоелектронні, електромеханічні, гідравлічні та гумо-технічні.

**Теоретична цінність дослідження:** в роботі представлено спосіб порівняння законів розподілу (моделей відмов) для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження на стадіях життєвого циклу “використання” та “підтримка”. При цьому для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі, застосовується напівмарковський випадковий процес. В якості комплексного показника надійності

**Purpose:** to investigate the influence of parameters of failure models on the indicator of maintenance efficiency. This study can be used by production managers and scientific personnel when choosing a failure model for conducting their own research in the field of armaments and military equipment.

**Method:** the main research methods are: statistical analysis, numerical method, comparative analysis.

**Findings:** the proposed recommendations for choosing a failure model allow you to justify the choice of a distribution law and different from the known ones, based on the study of the influence of distribution laws on the complex reliability indicator of the coefficient of technical use, which allows you to justify the feasibility of using diffusion laws of distribution as a model of failures of the corresponding samples of single-use weapons, which contain various components, namely: radio-electronic, electro-mechanical, hydraulic and rubber-technical.

**Theoretical implications:** the work presents a method of comparing distribution laws (failure models) to describe the processes occurring in the mathematical model of operation (storage) of weapons at the “use” and “maintenance” stages of the life cycle. At the same time, a semi-Markov random process is used to describe the processes occurring in the mathematical model. The coefficient of technical use was chosen as a comprehensive indicator of the reliability of the technical operation of aviation means of destruction, and the efficiency criteria were also determined. The performed

технічної експлуатації авіаційних засобів ураження обрано коефіцієнт технічного використання, а також визначено критерій ефективності. Проведенні розрахунки свідчать про перевагу дифузійних законів перед експоненціальним, що в свою чергу підвищує точність подальших розрахунків з використанням дифузійних розподілів.

**Тип статті:** науково-практична.

calculations indicate the superiority of diffusion laws over exponential laws, which in turn increases the accuracy of further calculations using diffusion distributions.

**Paper type:** scientific and practical.

**Ключові слова:** засоби ураження, надійність, коефіцієнт технічного використання, відмова, математична модель, закон розподілу, критерій ефективності, оптимізація, технічне обслуговування, ремонт.

**Key words:** means of defeat, reliability, coefficient of technical use, failure, mathematical model, distribution law, efficiency criterion, optimization, technical maintenance, repair.

## 1. Вступ

Особливостями конструктивної побудови виробів військового призначення однократного застосування, до яких відносяться засоби ураження (ЗУ), полягає в тому, що на стадії життєвого циклу "використання" (під час зберігання) інформація про їх технічний стан не надходить, всю інформацію містить закон розподілу відмов. Таким чином, якщо вдало підібрані параметри закону розподілу, то можна побудувати якісну модель експлуатації (зберігання) відповідних зразків.

Вибір закону розподілу для моделювання процесу експлуатації (зберігання) ЗУ залежить від природи конкретного процесу, який ви аналізуєте та доступних вам даних. Загалом, вибір закону розподілу – це ітеративний процес, який включає аналіз, перевірку та коригування. Важливо бути обережним і контролювати контекст та особливості вашого експлуатаційного процесу.

Державним стандартом України [1] передбачено використання наступних законів розподілу відмов, а саме: експоненціального, дифузійно-монотонного, дифузійно-немонотонного, логарифмічно-нормального і закону Вейбулла. Серед цих законів розподілу тільки експоненціальний закон має лише один параметр – інтенсивність відмов розподілу, решта законів розподілу є двопараметричними, тобто вони мають параметр масштабу і параметр форми. Вважається, що параметр масштабу співпадає зі середньою швидкістю зміни визначального параметру, а параметр форми практично співпадає з коефіцієнтом варіації цієї швидкості. Для двопараметричних законів розподілу математичне сподівання називають параметром масштабу, а коефіцієнт форми – параметром форми. Для проведення досліджень використовується розроблена в роботі [2] модель експлуатації засобів ураження при тривалому зберіганні. В роботі проведено порівняння трьох рекомендованих [1] законів розподілу, а саме: експоненціального, дифузійно-монотонного, дифузійно-немонотонного закону розподілу.

## 2. Теоретичні основи дослідження

Вибір закону розподілу для опису процесів експлуатації озброєння та військової техніки на стадії життєвого циклу "використання" вимагає від дослідника проведення наступних заходів:

- збір та аналіз даних про експлуатацію (можуть включити час до відмови, час безвідмовної роботи, вартість ремонту тощо; в подальшому побудова графіків та гістограм для візуалізації розподілу даних);
- порівняння з типовими розподілами та використання статистичних методів для отримання точних результатів;
- залучення експертів у відповідній галузі, які можуть надати інформацію щодо природи експлуатаційного процесу;
- перевірка результатів на адекватність та відповідність наявним статистичним даним;
- вибір розподілу повинен бути апробованим у контексті конкретної задачі.

Вперше математичну модель технічної експлуатації виробів для напівмарковського

випадкового процесу розробив відомий вчений у галузі теорії надійності І.Б. Герцбах в роботі [3]. За модель відмов виробів, що зберігаються, він обрав гамма-розподіл, який досить добре описує зношення механічних виробів. У роботах [4, 5, 6] було обґрунтовано застосування дифузійно-монотонного закону розподілу для автомобільної та електрогазової техніки авіації Повітряних Сил, дифузійно-немонотонного закону розподілу для радіоелектронних засобів зенітного ракетного озброєння та часу безвідмовної роботи виробів у вигляді закону Вейбулла для зразків озброєння та військової техніки тривалого часу перебування в експлуатації. Водночас в цих роботах не було зроблено обґрунтування вибору за результатами порівняння інших законів розподілу для їх математичних моделей.

### 3. Постановка проблеми

Проведений аналіз свідчить, що незважаючи на наявність напрацювань, на даний час актуальним залишається питання вибору закону розподілу для математичної моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження, яка би враховувала зміни ефективності технічного обслуговування зразків ЗУ. В подальшому це може бути використано організаторами виробництва та персоналом, який безпосередньо займається експлуатацією та застосуванням ЗУ на стадіях життєвого циклу "використання" та "підтримка", для встановлення ефективності зберігання ЗУ на складах, коли інформація про їх технічний стан відсутня, а також науковим персоналом при виборі закону розподілу для проведення власних досліджень у сфері озброєння та військової техніки.

### 4. Результати

Оскільки більшість законів розподілу мають два параметри, то бажано обрати такий параметр, який є типовим для всіх законів. Так, наприклад, при дифузійно-монотонному розподілі середній показник часу між відмовами, який дорівнює  $T_{\text{сер}} = \mu(1 + \frac{\nu^2}{2})$ , де  $\nu$  - параметр форми розподілу. Наприклад при  $\nu = 0,5$  та  $\mu = 1000$  середній час наробітку між відмовами  $T_{\text{сер}} = 1125$  год.

Для дифузійно-немонотонного закону розподілу параметр масштабу  $T_{\text{сер}} = \mu = 1000$  год. Тобто параметр масштабу для дифузійних законів не сильно відрізняється.

Порівняння законів розподілу для дослідження їх впливу на коефіцієнт технічного використання лише тоді має сенс, коли закони розподілу мають приблизно однакові параметри для їх порівняння. За такий параметр обрано середній наробіток між відмовами, який має прозорий фізичний сенс і чітко визначається для вказаних законів. Отже, для вирішення вказаної вище задачі оберемо параметр масштабу  $\mu = T_{\text{сер}} = 20$  років, який відповідає призначеному ресурсу зразка засобу ураження.

Параметр форми  $\nu$  – величина безрозмірна. Для дифузійно-немонотонного розподілу параметра масштабу  $\mu = T_{\text{сер}} = 20$  років, а параметр форми  $\nu = 1$ . Це базовий варіант розрахунків. Для коректного порівняння законів розподілу для деяких законів розподілу розмірність параметру форми має бути цілим числом. Тому було прийнято рішення параметр форми прийняти рівним 2.

Коефіцієнт технічного використання  $K_{\text{ТВ}}$  для розробленої в роботі моделі розраховувався за формулою [2]:

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{d_{\text{НГ}} \int_0^T (1-F(t)) dt}{d_{\text{НГ}} T + d_{\text{НГ}} (1-F(T))(t_{\text{К}} + t_{\text{Р}}) + F(T)(t_{\text{Р}} - d_{\text{НГ}} t_{\text{Р}} + t_{\text{К}}) + d_{\text{НГ}} F(T) t_{\text{В}} + (1 - d_{\text{НГ}}) F(T) T} \quad (1)$$

- де  $F(T)$  – функція розподілу часу безвідмовної роботи;  
 $t_K$  – тривалість контролю зразка засобу ураження засобами контролю;  
 $t_{\Pi}$  – тривалість проведення профілактичних робіт;  
 $t_B$  – тривалість повного відновлення зразка засобу ураження у разі його несправності;  
 $T$  – періодичність проведення технічного обслуговування зразка засобу ураження;  
 $d_{\text{НГ}}$  – достовірність контролю зразка засобу ураження засобами перевірки.

Після підстановки у формулу (1) конкретної функції розподілу можна отримати можливість розрахунку коефіцієнту технічного використання для цієї моделі відмов. Повторюючи таку процедуру для кожної функції розподілу, отримуємо можливість здійснити порівняння впливу функції розподілу на коефіцієнт технічного використання.

Далі наведено параметри кожної з функцій розподілу:

- для експоненціальної функції розподілу  $\lambda = \frac{1}{20 \text{ років}} = 0,05 \text{ 1/років}$ ;
- для дифузійно-немонотонного закону розподілу  $\mu = 20 \text{ років}, \nu = 1$ ;
- для дифузійно-монотонного закону розподілу  $\mu = 13,333 \text{ років}, \nu = 1$ .

Для вказаних вище констант і параметрах функції розподілу здійснені розрахунки для трьох моделей відмов за формулою (1). За результатами розрахунків побудовані графоаналітичні залежності коефіцієнту технічного використання  $K_{\text{ТВ}}$  від періодичності проведення технічного обслуговування  $T$  (у діапазоні зміни  $T = 0 \dots 10$  років) при різних законах розподілу виробів між відмовами (параметри моделі  $T_{\text{сер}} = 20$  років,  $t_K = 10$  хв,  $t_{\Pi} = 12$  год,  $t_B = 50$  год,  $d_{\text{НГ}} = 0,96$ ).

На побудованих графіках, наведених на рис. 1, 2 по осі ординат відкладені значення коефіцієнту технічного використання для різних законів, по осі абсцис – відповідний час  $T$ . Оптимальний період проведення технічного обслуговування знаходиться в межах від 0,4 років до 1,5 року. Зі збільшенням часу  $T$  коефіцієнт технічного використання для всіх законів зменшувався. Найменші значення коефіцієнта технічного використання спостерігаються при застосуванні експоненціального закону розподілу, що є цілком прогнозованим. Це відповідає рекомендаціям [1], що експоненціальний закон є найбільш грубою моделлю відмов.

З рис. 1-2 стає зрозуміло, що при існуючій періодичності проведення технічного обслуговування  $T = 4$  роки, найменше відрізняються від експоненціального розподілу результати розрахунку показника  $K_{\text{ТВ}}$  для дифузійно-монотонного закону, а найбільше відрізняються відповідно для дифузійно-немонотонного закону. При цьому, якщо проводити технічне обслуговування з великою періодичністю, наприклад, з періодом  $T = 20$  років, то різниця у розрахунках між експоненціальним та іншими законами розподілу зростає і становить відповідно:

- для дифузійно-немонотонного закону розподілу – 5%;
- для дифузійно-монотонного закону розподілу – 3,5%.

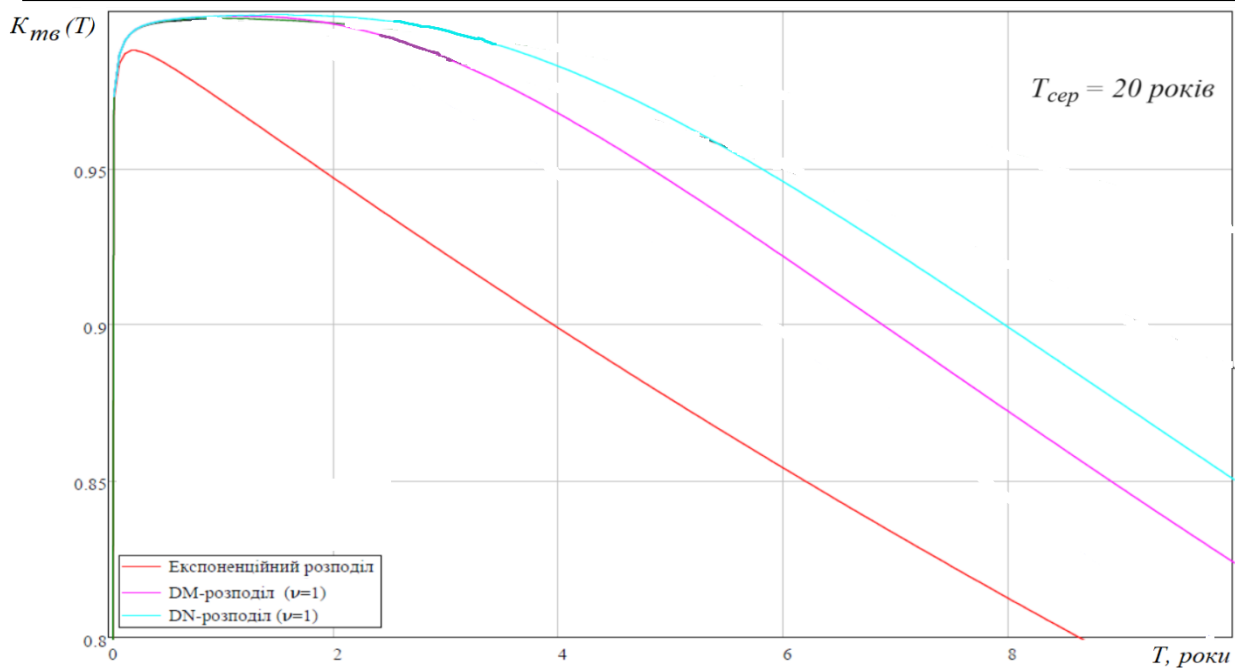


Рисунок 1 – Залежності коефіцієнту технічного використання від періодичності проведення технічного обслуговування ( $T = 0 \dots 10$  років) при різних законах розподілу наробітку виробів на відмову

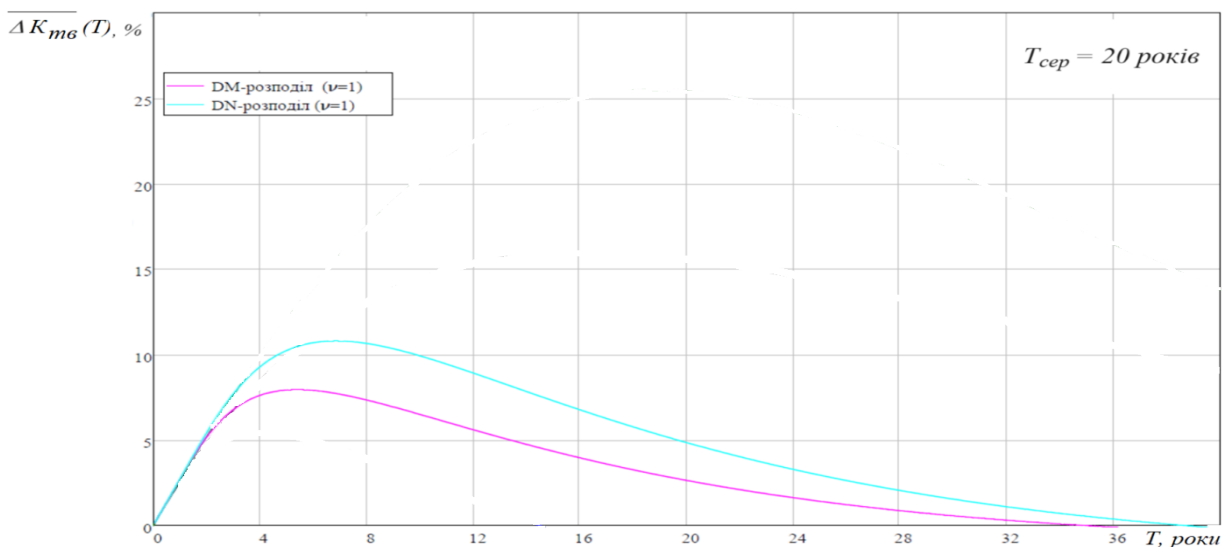


Рисунок 2 – Залежності зміни  $\overline{\Delta K_{TB}}(T)$  від періодичності проведення технічного обслуговування (у діапазоні зміни  $T = 0 \dots 40$  років) при різних законах розподілу наробітку виробів на відмову відносно значення  $K_{TB}$  при експоненційному розподілі, який прийнято за "базу"

Проведений аналіз отриманих результатів свідчить, що перевагою виконаних розрахунків є доказ, наскільки кількісно експоненціальна модель відмов поступається двопараметричним розподілам. Це означає, що при обранні експоненціального закону розподілу за модель відмов отримаємо суттєву занижену оцінку ефективності технічного обслуговування, що не відповідає інтересам стейкхолдерів. Це дослідження може бути використано організаторами виробництва та науковим персоналом при виборі моделі відмов для проведення власних досліджень у сфері озброєння та військової техніки.

## 5. Висновки

Таким чином, в роботі проведено порівняння законів розподілу (моделей відмов) для опису процесів, що відбуваються у математичній моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження на стадіях життєвого циклу “використання” та “підтримка” для математичної моделі експлуатації (зберігання) засобів ураження, яка дозволяє кількісно підтвердити рекомендації [1], що свідчить про адекватність математичної моделі та вдало підібрані параметри моделі, а також за допомогою графо-аналітичного методу підтвердити доцільність використання дифузійно-немонотонного розподілу у моделі відмов таких об’єктів, як зразки засобів ураження, які містять електромеханічні, радіоелектронні, гідравлічні та гумо-технічні вироби. Для таких різномірних технічних об’єктів дифузійно-немонотонний розподіл є найкращою математичною моделлю відмов.

## 6. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## 7. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

### Список використаних джерел

1. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення: ДСТУ 3433-96. – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 42 с. – (Національний стандарт України).
2. П’явчук О.О. Математична модель зберігання авіаційних засобів ураження із застосуванням дифузійно-немонотонного розподілу їх відмов / О.О. П’явчук, П.В. Опенько, П.М. Яблонський, В.П. Диптан // науковий журнал “Честь і закон”, випуск X.: НАНГУ, 2022, №3 (82), С. 99 – 107.
3. Герцбах И.Б. Модели профилактики / И.Б. Герцбах // Советское радио. – М., 1969. – 214 с.
4. Мірненко В.І. Порівняння ефективності технічного обслуговування виробів авіаційної техніки, що експлуатуються за технічним станом, для моделей дифузійно-монотонного і дифузійно-немонотонного розподілів відмов / [В.І. Мірненко, П.М. Яблонський, С.О. Пустовий, О.В. Авраменко] – К: НУОУ, Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, 2015. – № 2 (23) – с. 88-93.

### References

1. Nadiynist' tekhniky. Modeli vidmov. Osnovni polozhennya: DSTU 3433-96. – Kyiv: Derzhspozhyv standart Ukrayiny, 1996. – 42 s. – (Natsional'nyy standart Ukrayiny).
2. P'yavchuk, O.O. (2022). Matematychna model' zberihannya aviatsiynykh zasobiv urazhennya iz zastosuvannyam dyfuziyno-nemonotonnoho rozpodilu yikh vidmov / O.O. P'yavchuk, P.V. Open'ko, P.M. Yablons'kyy, V.P. Dyptan // naukovyy zhurnal “Chest' i zakon”, vypusk KH.: NANHU, 2022, №3 (82), S. 99 – 107.
3. Hertsbakh, Y.B. (1969). Modely profylaktyky / Y.B. Hertsbakh // Sovet-skoe radio. – Moscow, 1969. – 214 s.
4. Mirnenko V.I. (2015). Porivnyannya efektyvnosti tekhnichnoho obsluhovuvannya vyrobiv aviatsiynoyi tekhniky, shcho ekspluatuyut'sya za tekhnichnym stanom, dlya modeley dyfuziyno-monotonnoho i dyfuziyno-nemonotonnoho rozpodiliv vidmov / [V.I. Mirnenko, P.M. Yablons'kyy, S.O. Pustovyy, O.V. Avramenko] – Kyiv: NUOU, Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony, 2015. – № 2 (23) – s. 88-93.

5. Кітік С.В., Мірненко В.І., Яблонський П.М. Застосування дифузійно-немонотонного розподілу для моделювання процесу експлуатації радіоелектронної техніки // *Journal of Scientific Papers: Social development & Security: електронне наукове фахове видання. ГО "Українська наукова спільнота"*. – Київ. – 2019. – Вип. 9(6). – С. 102-111
5. Kitik S.V., Mirnenko V.I., Yablons'kyi P.M. (2019). Zastosuvannya dyfuziyno-nemonotonnoho rozpodilu dlya modelyuvannya protsesu ekspluatatsiyi radioelektronnoyi tekhniky // *Journal of Scientific Papers: Social development & Security: elektronne naukove fakhove vydannya. HO "Ukrayins'ka naukova spil'nota"*. – Kyiv. – 2019. – Vyp. 9(6). – S. 102-111
6. Опенько П.В., П'явчук О.О., Яблонський П.М., Миронюк М.Ю., Козир А.Г. Математична модель технічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки з використанням розподілу часу безвідмовної роботи виробів у вигляді закону Вейбулла ДНДІ ВС ОВТ, м. Чернігів. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки / ДНДІ ВС ОВТ. – Чернігів: Євенок О.О., 2022. – Вип. № 2(12). – 93-108– ISSN 2706-7386
6. Open'ko P.V., P'yavchuk O.O., Yablons'kyi P.M., Myronyuk M.YU., Kozyr A.H. (2022). Matematychna model' tekhnichnoho obsluhovuvannya zrazkiv ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniky z vykorystanniam rozpodilu chasu bezvidmovnoyi roboty vyrobiv u vyhlyadi zakonu Veybulla DNDI VS OVT, m. Chernihiv. Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroyennya ta viys'kovoyi tekhniky / DNDI VS OVT. – Chernihiv: Yevenok O.O., 2022. – Vyp. № 2(12). – 93-108– ISSN 2706-7386