

# Формалізація показників ефективності процесів життєвого циклу військових наземних роботизованих комплексів

## Formalization of Efficiency Indicators in Life-Cycle Processes for Military Ground Robotic Complexes

**Андрій Дядечко<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** доктор філософії, начальник науково-дослідної лабораторії проблем технологічної підтримки інформаційних систем, e-mail: andrewvvs@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0191-8326

**Віталій Зуйко<sup>A</sup>**

кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри геопросторової підтримки та застосування космічних систем, e-mail: vitalikzu@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1439-9502

**Ігор Черних<sup>A</sup>**

кандидат військових наук, доцент, заступник начальника інституту логістики та підтримки військ (сил), e-mail: igor-chernuh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5144-6921

**Михайло Ракушев<sup>A</sup>**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри геопросторової підтримки та застосування космічних систем, e-mail: r16mu0977@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-7703-3287

**Andrii Diadechko<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** PhD, Head of the Research Laboratory for Problems of Information Systems Technological Support, e-mail: andrewvvs@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0191-8326

**Vitalii Zuiko<sup>A</sup>**

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Professor of the Geospatial Support and Space Systems Application Department, e-mail: vitalikzu@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1439-9502

**Ihor Chernykh<sup>A</sup>**

Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Logistics and Troops (Forces) Support Institute, e-mail: igor-chernuh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5144-6921

**Mykhailo Rakushev<sup>A</sup>**

Laureate of the National Prize of Ukraine named after Borys Paton, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Geospatial Support and Space Systems Application Department, e-mail: r16mu0977@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-7703-3287

<sup>A</sup> Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

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

Received: June 13, 2025 | Revised: August 23, 2025 | Accepted: August 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.15>

**Мета роботи.** Розробити науково обґрунтовану систему формалізованих показників для кількісного оцінювання ефективності процесів життєвого циклу військових наземних роботизованих комплексів.

**Метод дослідження.** Дослідження базується на багатокритерійному підході з використанням методу аналітичної ієрархії та апарату нечіткої логіки для поєднання кількісних показників та експертних якісних оцінок. Здійснено поетапну декомпозицію життєвого циклу військових наземних роботизованих комплексів і сформовано ієрархію показників, що охоплює технічні, експлуатаційні, кіберзахисні та економічні аспекти.

**Результати дослідження.** Визначено та математично формалізовано комплекс показників ефективності для кожного етапу життєвого циклу. Запропоновано концептуальну модель та алгоритм збору даних і зважування експертних оцінок, що забезпечує автоматизоване обчислення інтегральних індексів ефективності для процесів розроблення, випробувань, експлуатації, модернізації та виведення з експлуатації.

**Теоретична цінність дослідження.** Робота розширює теорію управління життєвим циклом кіберфізичних військових систем, запропонувавши уніфіковану методологію багатокритеріального оцінювання, адаптовану до автономних роботизованих платформ.

**Практична цінність дослідження.** Запропонована система показників може бути інтегрована в оборонні стандарти, процедури закупівель та цифрові платформи управління життєвим циклом, підвищуючи обґрунтованість рішень щодо розподілу ресурсів, планування модернізації та управління ризиками для військових наземних роботизованих комплексів.

**Цінність дослідження.** Вперше формалізовано повну ієрархію показників, спеціально розроблену для оцінювання ефективності життєвого циклу військових наземних роботизованих комплексів, з урахуванням їх кіберфізичної природи, частих оновлень програмного забезпечення та вимог кібербезпеки.

**Тип статті.** Методологічне дослідження.

**Purpose.** To develop a scientifically grounded system of formalized indicators for quantitative assessment of the efficiency of life-cycle processes of military ground robotic complexes.

**Method.** The study applies a multi-criteria decision-making framework combining analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy logic to capture both quantitative and expert qualitative assessments. The research integrates a stage-by-stage decomposition of the MGRC life cycle with a structured indicators hierarchy covering technical, operational, cybersecurity, and economic dimensions.

**Findings.** A comprehensive set of efficiency indicators for each life-cycle stage was defined and mathematically formalized. The approach enables consistent evaluation of development, testing, operation, modernization, and disposal processes. A conceptual model and algorithm for data collection and expert weighting were proposed, supporting automated calculation of integral efficiency indices.

**Theoretical implications.** The work extends the theory of life-cycle management of cyber-physical military systems by introducing a unified multi-criteria assessment methodology applicable to autonomous robotic platforms.

**Practical implications.** The proposed model can be used in the development of technical requirements, testing programs, life cycle documentation, and regulatory acts governing the adoption and logistical support of military ground robotic systems.

**Value.** This is the first study to formalize a complete indicators hierarchy specifically tailored to the life-cycle efficiency of military ground robotic complexes, accounting for their cyber-physical nature, frequent software updates, and cybersecurity requirements.

**Paper type.** Methodological study.

**Ключові слова:** управління життєвим циклом, оцінювання ефективності, багатокритеріальний аналіз, нечітка логіка, метод аналітичної ієрархії, військові наземні роботизовані комплекси, кіберфізичні системи, показники продуктивності.

**Key words:** life-cycle management, efficiency assessment, multi-criteria analysis, fuzzy logic, analytic hierarchy process, military ground robotic complexes, cyber-physical systems, performance metrics.

## **Вступ**

Швидкий розвиток технологій штучного інтелекту, автономного керування та сенсорних систем суттєво розширює можливості застосування військових наземних роботизованих комплексів (ВНРК) у сучасних операціях. Ці кіберфізичні системи (КФС) здатні виконувати розвідувальні, логістичні, ударні та інші завдання в умовах підвищеної небезпеки, зменшуючи ризики для особового складу та підвищуючи ефективність військових дій. Водночас складність технічної архітектури ВНРК, постійна модернізація апаратного й програмного забезпечення, а також високі вимоги до кіберзахисту обумовлюють необхідність системного підходу до управління їхнім життєвим циклом.

Традиційні методи оцінювання ефективності процесів життєвого циклу (ЖЦ) здебільшого були розроблені для класичних зразків озброєння та військової техніки (ОВТ). Вони не враховують специфічних особливостей ВНРК: інтеграції кібер- і фізичних компонентів, частих оновлень програмного забезпечення, потреби у швидкому реагуванні на вразливості та динамічні зміни середовища експлуатації. У результаті виникають труднощі у плануванні ресурсів, визначенні пріоритетів модернізації та обґрунтуванні управлінських рішень.

Сучасні підходи до управління ЖЦ КФС пропонують використання багато-критеріального аналізу, нечіткої логіки та методів експертного зважування для об'єктивного порівняння різних етапів ЖЦ і комплексного оцінювання їх ефективності. Проте відсутність стандартизованих, формалізованих показників для ВНРК унеможлиблює створення уніфікованих моделей та ускладнює впровадження автоматизованих систем моніторингу.

У зв'язку з цим постає науково-практичне завдання: розробити систему формалізованих показників, що дозволить кількісно й об'єктивно оцінювати ефективність процесів життєвого циклу ВНРК. Її реалізація сприятиме підвищенню прозорості управління, своєчасному виявленню слабких ланок, оптимізації ресурсного забезпечення та, в підсумку, покращенню бойової готовності та стійкості роботизованих комплексів до сучасних загроз.

## **Теоретичні основи дослідження**

Управління життєвим циклом складних технічних систем базується на стандартах системної інженерії та менеджменту якості, зокрема ISO/IEC 15288 [1] і національних стандартів ДСТУ В 15.003:2021 [2] та ДСТУ В 15.004:2022 [3]. Ці документи визначають загальні процеси та стадії ЖЦ ОВТ, проте не деталізують специфіку кіберфізичних комплексів, до яких належать ВНРК.

Сучасні дослідження управління ЖЦ КФС [4-6] акцентують на безперервному моніторингу стану, цифрових двійниках, інтеграції даних сенсорів і програмного забезпечення. Українські автори [7-10] пропонують адаптацію подібних підходів до військових роботизованих платформ, підкреслюючи важливість багатокритеріального оцінювання ефективності кожної фази ЖЦ.

У теорії багатокритеріального аналізу, що застосовується для оцінювання складних систем, найбільш поширеними є методи аналітичної ієрархії (АНР), нечіткої логіки та експертного зважування. Їх поєднання дозволяє враховувати як кількісні показники (технічні характеристики, витрати, час виконання процесів), так і якісні — наприклад, рівень кіберзахисту або адаптивність програмного забезпечення.

Таким чином, теоретичною основою цього дослідження є інтеграція стандартів управління ЖЦ ОВТ та підходів до оцінювання КФС з методами багатокритеріального аналізу. Така комбінація забезпечує формалізацію показників, здатних відобразити специфіку ВНРК і створити підґрунтя для їх об'єктивного оцінювання на всіх етапах життєвого циклу.

## **Постановка проблеми**

Наземні роботизовані комплекси дедалі активніше впроваджуються у військову сферу як ключові елементи КФС. Вони виконують завдання розвідки, логістики, вогневої підтримки та технічного забезпечення. Ефективність їх застосування безпосередньо залежить від якості управління ЖЦ — від ініціації, розроблення до модернізації та виведення з експлуатації.

Наявні нормативні документи й методики оцінювання ефективності процесів ЖЦ переважно орієнтовані на класичні зразки ОВТ. Вони не враховують специфічних чинників НРК, серед яких:

поєднання апаратної, програмної та мережевої складових;

потреба в регулярному оновленні програмного забезпечення та алгоритмів штучного інтелекту;

високий темп технологічного старіння й потреба в гнучкій модернізації;

взаємодія з іншими елементами кіберфізичних і мережево-центричних систем.

У науковій літературі наявні дослідження, що частково торкаються питань оцінювання ефективності роботизованих систем. Так, у роботі [11] проаналізовано механіку й керованість НРК у складних умовах, що дозволяє визначити технічні показники продуктивності й надійності. Праця [12] розглядає підходи до оцінювання ефективності роботизованих систем у виробничому середовищі, результати якої можуть бути адаптовані для ВНРК. Дослідження [10] пропонує показники оцінювання ефективності безпілотних авіаційних комплексів, що є корисним аналогом для розроблення показників для наземних роботизованих платформ. Крім того, в статті [13] демонструється застосування методів теорії масового обслуговування для оцінювання бойової ефективності мобільних роботів, а в роботі [14] узагальнюється сучасний стан і перспективи розвитку наземних мобільних робототехнічних комплексів ЗСУ.

Попри наявність цих напрацювань, жодна з досліджених праць не формує цілісного підходу до формалізації показників оцінювання ефективності саме процесів ЖЦ ВНРК, що включають проектування, виробництво, експлуатацію, модернізацію та виведення з експлуатації. Відсутність такої інтегрованої системи ускладнює обґрунтування управлінських рішень і планування ресурсів протягом усього ЖЦ.

Отже, наукова проблема полягає у розробленні та формалізації системи показників оцінювання ефективності процесів ЖЦ ВНРК з урахуванням їх кіберфізичної природи, потреби в постійній цифровій підтримці та динамічності умов застосування. Її вирішення дозволить підвищити обґрунтованість рішень щодо розроблення, експлуатації, модернізації та виведення з експлуатації ВНРК і сприятиме вдосконаленню нормативної бази у сфері військових роботизованих систем.

## **Методологія дослідження**

Методологія ґрунтується на системному підході та структурно-функціональному аналізі ЖЦ ВНРК, які розглядаються як складні КФС. Дослідження спрямоване на формалізацію показників оцінювання ефективності кожного етапу ЖЦ, що забезпечує кількісне й якісне порівняння процесів та підтримку управлінських рішень.

### **А. Ключові етапи життєвого циклу**

В основу роботи покладено оновлену нормативну модель ЖЦ, запропоновану у [15]. Вона відображає замкненість циклу та особливості ВНРК:

#### **Ініціація потреби**

аналіз оперативних задач;

ідентифікація функціональних прогалін;

формування тактико-технічного завдання.

#### **Концептуальне проектування**

побудова цифрової концептуальної моделі;  
аналіз життєздатності у симульованому середовищі;  
попередній аналіз ризиків і вразливостей.

#### **Розроблення дослідного зразка**

створення фізичного прототипу НРК;  
розроблення модульних версій програмного забезпечення;  
розгортання цифрового двійника.

#### **Випробування і сертифікація**

функціональні випробування;  
кіберзахисна перевірка (пентести, статичний/динамічний аналіз ПЗ);  
верифікація відповідності конфігурації цифровому двійнику.

#### **Постачання і впровадження**

адаптація до оперативного середовища;  
навчання операторів;  
імплементация системи моніторингу в реальному часі.

#### **Експлуатація з динамічним супроводженням**

постійний зворотний зв'язок (лог-файли, телеметрія);  
впровадження оновлень ПЗ через захищені канали;  
автоматичне керування конфігурацією.

#### **Модернізація / Відновлення / Виведення з експлуатації**

інтеграція з новими технологіями (edge-AI, нові сенсори);  
аналіз рентабельності модернізації;  
цифрова фіксація утилізації та ініціація нової потреби.

#### **Б. Підхід до формалізації показників**

Для кожного етапу визначено групи показників: технічні (надійність, відповідність стандартам), організаційні (часові витрати, координація підрозділів), економічні (вартість розроблення та утримання), а також експлуатаційні (готовність, інтенсивність відмов). Застосовано багатокритеріальний аналіз та експертні оцінки для отримання інтегральних індикаторів ефективності.

#### **В. Нормативна та методична база**

Робота спирається на чинні національні стандарти України (ДСТУ В 15.003:2021, ДСТУ В 15.004:2022) та міжнародні підходи до управління ЖЦ КФС, адаптовані до специфіки військових роботизованих комплексів.

Застосування зазначених методів забезпечує комплексне бачення проблеми: від аналізу нормативної та технічної бази — до формування кількісних показників і перевірки їх придатності для управління всіма етапами ЖЦ ВНРК.

*Engineering and Technology*

### **Результати**

У ході роботи визначено сукупність показників ефективності для кожного з семи етапів нормативної моделі ЖЦ ВНРК – від ініціації потреби до модернізації чи виведення з експлуатації. Для кожного етапу сформовано групи показників і відповідних індикаторів (див. таблицю).

В статті для формалізації показників ефективності запропоновано метод багатокритеріального аналізу, який перетворює сукупність показників у єдиний інтегральний індикатор для кожного етапу ЖЦ. Це забезпечує порівнянність різних комплексів і дає змогу виявляти “вузькі місця” у процесах. Кожен показник ефективності подано у вигляді безрозмірного показника  $k_i$ , нормованого до інтервалу  $[0;1]$  за лінійною шкалою. Приведемо приклади нормування показників:

Таблиця 1 – Сукупність показників ефективності

№ з/п	Етап ЖЦ ВНРК	Група показників ефективності	Приклади індикаторів
1.	Ініціація потреби	Організаційні	Час погодження тактико-технічного завдання; кількість узгоджень/доопрацювань; рівень відповідності потребам ЗС.
2.	Концептуальне проектування	Технічні, експлуатаційні	Точність цифрової концептуальної моделі; відсоток виявлених критичних ризиків на ранньому етапі; час моделювання.
3.	Розроблення дослідного зразка	Технічні, економічні	Відсоток повторно використаних модулів; середня вартість прототипу; кількість збоїв під час випробувань прототипу.
4.	Випробування і сертифікація	Технічні, експлуатаційні	Середній час безвідмовної роботи; результати кіберзахисного тестування (покриття тестами, виявлені вразливості); відповідність цифровому двійнику.
5.	Постачання і впровадження	Організаційні, економічні	Витрати на підготовку персоналу; відсоток виконання графіка постачань; коефіцієнт готовності до використання у військах.
6.	Експлуатація з динамічним супроводженням	Експлуатаційні, економічні	Середній час відновлення після відмови (MTTR); коефіцієнт готовності ( $A_0$ ); частота оновлень ПЗ; витрати на техобслуговування.
7.	Модернізація / Відновлення / Виведення з експлуатації	Економічні, технічні	Рентабельність модернізації (ROI); час інтеграції нових технологій; коефіцієнт утилізації та повторного використання компонентів.

Коефіцієнт готовності :

$$k_{A_0} = \frac{T_{роб}}{T_{роб} + T_{відн}}$$

де  $T_{роб}$  – час безвідмовної роботи;  
 $T_{відн}$  – час відновлення.

Показник кіберстійкості:

$$k_{кібер} = 1 - \frac{N_{враз}}{N_{тест}}$$

де  $N_{враз}$  – кількість виявлених критичних вразливостей;  
 $N_{тест}$  – загальна кількість тестів.

Енергетична автономність:

$$k_{енерг.} = \frac{t_{роб}}{t_{норм}}$$

де  $t_{роб}$  – фактичний час роботи від одного заряду;  
 $t_{норм}$  – нормативне значення часу роботи від одного заряду.

Для кожного етапу життєвого циклу сформовано власний інтегральний показник ефективності  $K_e$ :

$$K_e = \sum_{i=1}^n \omega_i k_i$$

де  $k_i$  – нормований показник;  
 $\omega_i$  – його ваговий коефіцієнт ( $\sum \omega_i = 1$ ).

Ваговий коефіцієнт визначається методом аналітичної ієрархії та експертного ранжування.

Для оцінки загальної ефективності ЖЦ ВНРК інтегральні оцінки етапів також агреговано:

$$K_{ЖЦ} = \sum_{j=1}^m \nu_j K_{e_j}$$

де  $K_{e_j}$  – інтегральний показник  $j$ -го етапу;  
 $\nu_j$  – його ваговий коефіцієнт ( $\sum \nu_i = 1$ ).

Щоб визначити вплив кожного показника на підсумкову ефективність, проводиться чутливісний аналіз. Для кожного показника обчислюється коефіцієнт еластичності  $E_i$ :

$$E_i = \frac{\Delta \omega_i / \omega_i}{\Delta K_{ЖЦ} / K_{ЖЦ}}$$

де  $\Delta \omega_i$  – варіація ваги  $i$ -го показника;  
 $\Delta K_{ЖЦ}$  – відповідна зміна інтегральної оцінки ефективності етапів ЖЦ.

Визначення коефіцієнту еластичності дозволяє з'ясувати на скільки відсотків зміниться інтегральний показник  $K_{ЖЦ}$ , якщо вага окремого показника  $\omega_i$  зміниться на 1%. Тобто, якщо  $E_i > 1$  – інтегральний показник дуже чутливий до цього показника, якщо  $E_i < 1$  – вплив показника відносно невеликий, якщо  $E_i \approx 0$  – показник практично не впливає.

З метою практичної реалізації запропонованої системи показників пропонується концептуальна модель збору та обробки даних (рис. 1), що поєднує автоматизовані джерела інформації (телеметрія, логи програмного забезпечення, результати випробувань) із експертними оцінками. Модель складається з трьох взаємопов'язаних підсистем:

1. Підсистема первинного збору даних;
2. Підсистема експертного оцінювання;
3. Підсистема інтеграції даних.

Підсистема первинного збору даних забезпечує автоматичне надходження вимірюваних параметрів із прототипів і діючих НРК (наприклад, дані сенсорів, журнали роботи, результати випробувальних стендів).

Підсистема експертного оцінювання формує групу експертів за напрямками: інженерно-технічний, експлуатаційний, кіберзахисний та економічний. Для збирання думок використовується модифікований метод Делфі.

Метод Делфі – це процедура багатоетапного анонімного опитування групи експертів з подальшим узгодженням їхніх оцінок. У статті використано модифіковану версію, що складається з таких етапів:

#### 1. Визначення цілей і складу експертної групи

Формується пул із 15 експертів – представників промисловості, науковців, військових операторів та фахівців з кібербезпеки.

Для кожного визначено вагу компетентності  $c_j$  (0–1) на підставі досвіду та публікацій.

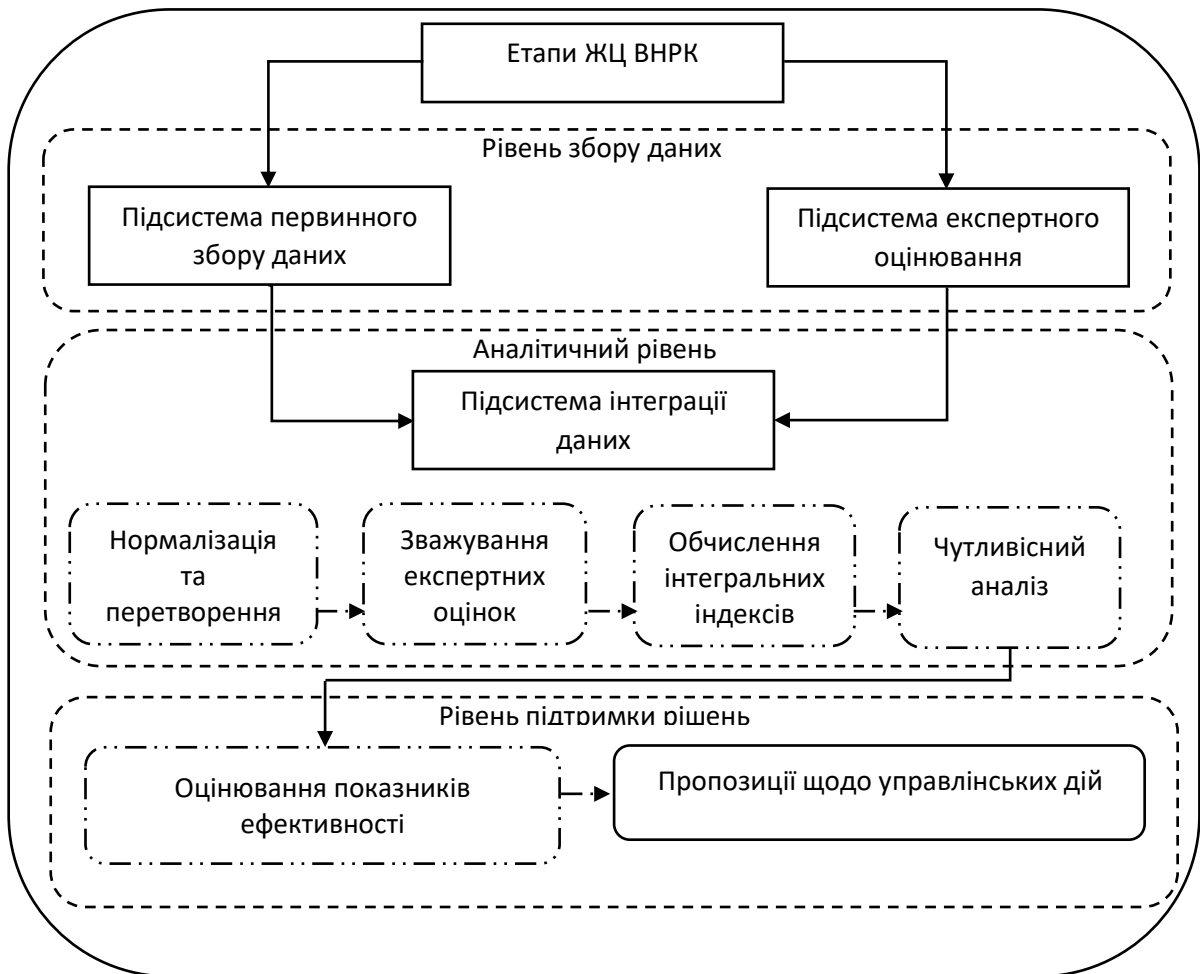


Рисунок 1. Концептуальна модель збору та обробки даних

## 2. Перший раунд опитування

Експерти індивідуально оцінюють значущість кожного показника ефективності (за шкалою від 1 до 9).

Дані збираються анонімно, що виключає вплив авторитету окремих учасників.

## 3. Аналіз та зворотний зв'язок

Обчислюються середні значення, медіани та коефіцієнт варіації для кожного показника.

Учасникам надсилається узагальнений результат без розкриття персональних відповідей.

## 4. Другий раунд уточнень

Експерти переглядають свої відповіді, враховуючи статистику попереднього раунду.

Можливе аргументоване коригування власних оцінок.

## 5. Фіналізація та зважування

За результатами двох раундів обчислюються остаточні ваги показників:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^m c_j \tau_{ij}}{\sum_{j=1}^m c_j}$$

де  $\tau_{ij}$  – оцінка  $i$ -го показника  $j$ -м експертом;  
 $c_j$  – коефіцієнт компетентності експерта.

### 6. Перевірка узгодженості

Для кожної групи показників розраховується коефіцієнт конкордації Кендалла,  $W$ .

Якщо  $W \geq 0.7$ , результати вважаються узгодженими. У разі нижчих значень можливий додатковий раунд.

Особливістю модифікації методу Делфі є скорочення кількості раундів до двох за рахунок попереднього тренінгу експертів, запровадження вагових коефіцієнтів компетентності  $c_j$ , що підвищує об'єктивність, інтеграція результатів безпосередньо у формулу обчислення інтегрального показника ефективності для кожного етапу ЖЦ ВНРК.

В свою чергу підсистема інтеграції даних поєднує автоматизовані дані з експертними оцінками шляхом нормалізації та агрегування.

Зазначена модель складається з трьох інтегрованих рівнів (рис.1): рівень збору даних, рівень аналітичної обробки та рівень прийняття рішень. На першому рівні моделі потокові дані збираються сенсорними мережами та каналами захищеної передачі, а експертні оцінки надходять у вигляді стандартизованих анкет. Аналітичний рівень забезпечує нормалізацію та перетворення показників ефективності, зважування експертних оцінок, обчислення інтегральних показників ефективності для кожного етапу ЖЦ ВНРК та чутливий аналіз отриманих показників. На рівні підтримки рішень проводиться формування дашбордів для керівництва: індекси ефективності, графіки тенденцій тощо. За потреби ініціюється перегляд планів модернізації, додаткові випробування чи технічне обслуговування ВНРК.

Ключова особливість моделі – замкнений цикл, тобто зміни конфігурації або модернізації ВНРК автоматично запускають новий цикл збору й оцінювання, ваги й нормативи оновлюються при появі нових даних або експертних висновків. Система дозволяє накопичувати історичні ряди для трендів та машинного навчання.

#### Переваги моделі:

поєднання об'єктивних сенсорних даних та суб'єктивних експертних суджень;

прозоре зважування та перевірка узгодженості оцінок;

можливість масштабування на різні типи ВНРК та інтеграція з цифровими двійниками.

Модель працює як єдина платформа моніторингу ефективності процесів ЖЦ ВНРК, забезпечуючи автоматичний збір, аналітичну обробку й обґрунтоване прийняття рішень на кожному етапі – від ініціації потреби до модернізації чи виведення з експлуатації.

В результаті дослідження сформовано систему показників ефективності для кожного етапу ЖЦ ВНРК, що дозволило забезпечити їхню математичну формалізацію у вигляді інтегральних індексів. Запропоновано концептуальну модель збору та обробки даних, яка поєднує експертні оцінки, вагові коефіцієнти та автоматизовану агрегацію показників у єдиний інструмент оцінювання. Використання цієї моделі забезпечує об'єктивність і прозорість аналізу, а також створює основу для реалізації системи підтримки управлінських рішень щодо модернізації, експлуатації та подальшого розвитку ВНРК.

### Висновки

У ході дослідження розроблено науково-методичний підхід до оцінювання ефективності процесів ЖЦ ВНРК, що базується на формалізації показників та використанні методу багатокритеріального аналізу.

Сформовано систему показників ефективності, що охоплює всі етапи ЖЦ ВНРК – від ініціації потреби до модернізації та виведення з експлуатації. Для кожного етапу визначено групи показників та приклади їх індикаторів, що дозволяє отримати кількісну оцінку складних процесів.

Запропоновано концептуальну модель збору та обробки даних, яка передбачає використання експертних оцінок, вагових коефіцієнтів та інтеграційних формул для розрахунку узагальнених індексів ефективності. Це забезпечує системність та прозорість підходу, а також можливість його автоматизації.

Проведено чутливий аналіз, який довів адекватність запропонованої системи показників і стійкість результатів до зміни вагових коефіцієнтів та варіацій вхідних даних. Це підвищує достовірність отриманих оцінок і придатність методики для практичного використання.

Результати дослідження створюють підґрунтя для розробки систем підтримки прийняття рішень щодо управління ЖЦ ВПК, оптимізації їх експлуатації та своєчасної модернізації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку програмно-алгоритмічного забезпечення, що дозволить інтегрувати запропоновані результати у цифрові двійники та автоматизовані системи управління життєвим циклом військової техніки.

### **Фінансування**

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

### **Конкуруючі інтереси**

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

### **Список використаних джерел**

1. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016. Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем. Дійсний з 01.01.2018. ДП «УкрНДНЦ», 2016.
2. ДСТУ В 15.003:2021 Система керування життєвим циклом озброєння та військової техніки. Процеси життєвого циклу озброєння та військової техніки. Дійсний з 01.09.2022. ДП «УкрНДНЦ», 2021.
3. ДСТУ В 15.004:2022. Система розроблення і поставлення на виробництво озброєння та військової техніки. Стадії життєвого циклу озброєння та військової техніки. Дійсний з 01.10.2023. ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0 – Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, Vol. 3, 2015, p. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
5. Tsega Y. Melesse, Valentina Di Pasquale, Stefano Riema. Digital Twin Models in Industrial Operations: State-of-the-art and Future Research Directions. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*. Vol. 3, 2021, p. 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1049/cim2.12010>.
6. Yang Lu. Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 6, 2017, p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>.
7. Залипка В.Д. Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*, № 32 (4), 2022, с. 60-65. DOI: <https://doi.org/10.36930/40320410>.
8. Миколайчук В.Р. Використання функціонального поля для оцінювання ефективності роботизованої системи моніторингу місцевості. *Зв'язок*, № 1, 2021, с. 62-65. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.0162-68>.
9. Струтинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні роботизовані комплекси: монографія. ПП «Рута», Житомир, 2023, 497 с.

10. Zhyvotovskiy, R., Gorobets, Yu., Momit. O. Indicators and Criteria of Efficiency Evaluation of Safety Aviation Complexes Application. Системи управління, навігації та зв'язку, № 5 (51), 2018, с. 8-12. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.008>.
11. Довгополий А.С., Загірський А.В.. Механіка та керованість безпілотних наземних роботизованих комплексів в умовах складного рельєфу. Механіка гіроскопічних систем, № 46, 2023, с. 5-21. <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678>.
12. Зарубін І.С., Сотник С.В. Ефективність використання роботизованих систем у виробництві. Матеріали І-ї Всеукраїнської конференції «Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (CITAR-24)», 16-17 травня 2024 року, Харків, ХНУРЕ, с. 150-153.
13. Зінько Р.В., Казан П.І., Черевко Ю.М., Білик О.С. Оцінка ефективності дій мобільних бойових роботів методом теорії масового обслуговування. Військово-технічний збірник, № 22, 2020, с. 37-43. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.37-43>.
14. Мирончук Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку наземних мобільних робототехнічних комплексів для Сухопутних військ Збройних Сил України. Військово-технічний збірник, № 14, 2016, с. 31-35. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.31-35>.
15. Дядечко, А., & Зуйко, В. (2025). Формування нормативної моделі життєвого циклу військових наземних роботизованих комплексів. *Social Development and Security*, 15(4), 95-105. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.9>

## References

1. DSTU ISO/IEC/IEEE 15288:2016. Inzheneriia system i prohramnoho zabezpechennia. Protsesy zhyttievoho tsykladu system. Diisnyi z 01.01.2018. [Engineering of systems and software. System life cycle processes. Effective from 01.01.2018]. DP "UkrNDNTs", 2016.
2. DSTU V 15.003:2021. Systema keruvannia zhyttievoho tsykladu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Protsesy zhyttievoho tsykladu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Diisnyi z 01.09.2022. DP "UkrNDNTs", 2021.
3. DSTU V 15.004:2022. Systema rozroblennia i postavlennia na vyrobnytstvo ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Stadii zhyttievoho tsykladu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky. Diisnyi z 01.10.2023. DP "UkrNDNTs", 2022.
4. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
5. Melesse, T. Y., Di Pasquale, V., & Riema, S. (2021). Digital twin models in industrial operations: State-of-the-art and future research directions. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 3, 37–47. <https://doi.org/10.1049/cim2.12010>
6. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
7. Zalyпка, V. D. (2022). Osoblyvosti stvorennia ta zastosuvannia nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv u providnykh krainakh svitu ta Ukraini [Features of creation and use of ground robotic systems in leading countries and Ukraine]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 32(4), 60–65. <https://doi.org/10.36930/40320410>
8. Mykolaichuk, V. R. (2021). Vykorystannia funktsionalnogo polia dlia otsiniuvannia efektyvnosti robotyzovanoi systemy monitorynhu mistsevosti [Using a functional field to evaluate the efficiency of a robotic terrain monitoring system]. *Zviazok*, 1, 62–65. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.0162-68>

9. Strutynskiy, V. B., & Hurzhii, A. M. (2023). *Nazemni robotyzovani komplekсы: monohrafiia* [Ground robotic systems: A monograph]. Zhytomyr: Ruta. 497 p.
10. Zhyvotovskiy, R., Gorobets, Yu., & Momit, O. (2018). Indicators and criteria of efficiency evaluation of safety aviation complexes application. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, 5(51), 8–12. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.008>
11. Dovhopolyi, A. S., & Zahirskiy, A. V. (2023). Mekhanika ta kerovanist bezpilotnykh nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv v umovakh skladnoho reliefu [Mechanics and controllability of unmanned ground robotic systems in complex terrain]. *Mekhanika hiroskopichnykh system*, 46, 5–21. <https://doi.org/10.20535/0203-3771462023302678>
12. Zarubin, I. S., & Sotnyk, S. V. (2024). Efektyvnist vykorystannia robotyzovanykh system u vyrobnytstvi [Effectiveness of robotic systems in production]. In *Proceedings of the 1st All-Ukrainian Conference on Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics (CITAR-24)* (pp. 150–153). Kharkiv: KhNURE.
13. Zinko, R. V., Kazan, P. I., Cherevko, Yu. M., & Bilyk, O. S. (2020). Otsinka efektyvnosti dii mobilnykh boiovykh robotiv metodom teorii masovoho obsluhovuvannia [Evaluation of the effectiveness of mobile combat robots using queuing theory]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 22, 37–43. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.37-43>
14. Myronchuk, Yu. V. (2016). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku nazemnykh mobilnykh robototekhnichnykh kompleksiv dlia Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy [Current state and development prospects of mobile terrestrial robotic systems for the Ukrainian Ground Forces]. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 14, 31–35. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.31-35>
15. Diadechko, A., & Zuiko, V. (2025). Forming a Regulatory Model of the Life Cycle for Military Ground Robotic Systems. *Social Development and Security*, 15(4), 95-105. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.9>