

Я. В. Павлов

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛІКУ І РАНЖУВАННЯ ЗА РІВНЕМ ОТРИМАНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЗРАЗКІВ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Обґрунтовано методичні підходи до створення моделі електронного обліку і ранжування пошкоджень зразків автобронетанкової техніки з використанням концепції цифрового двійника. Запропоновано структуру, яка містить модулі ідентифікації техніки, відображення технічного стану, фіксації пошкоджень на рівні кінцевих елементів заміни, розрахунку індексу боєздатності та контролю ремонтно-логістичних процесів. Показано, що інтеграція даних з різних джерел та автоматизація їх оброблення забезпечують підвищення оперативності прийняття рішень щодо евакуації та подальшого відновлювання техніки. Використання запропонованого підходу дасть змогу прогнозувати ресурс вузлів, планувати потреби у запасних частинах, оперативно приймати рішення щодо відновлення зразків озброєння, що зрештою підвищить ефективність технічного забезпечення військ.

Ключові слова: автобронетанкова техніка, пошкодження, електронний облік, цифровий двійник, індекс боєздатності, кінцевий елемент заміни, автоматизоване оброблення даних.

Постановка проблеми. Сучасні бойові дії характеризуються високою інтенсивністю застосування озброєння і військової техніки, що спричиняє значні втрати зразків автобронетанкової техніки (АБТТ). В умовах ведення бою необхідно максимально оперативно приймати рішення щодо евакуації та ремонту пошкоджених зразків техніки. Проте на практиці процеси обліку, класифікації та ранжування АБТТ за рівнем пошкоджень часто здійснюються із застосуванням фрагментарних методів, які базуються на суб'єктивних оцінках та паперовій документації. Це призводить до затримок у прийнятті рішень, нераціонального розподілу ремонтних ресурсів, втрат часу та зниження рівня боєздатності підрозділів.

Додатковим ускладненням є те, що у зоні бойових дій техніка зазнає пошкоджень різного характеру – від незначних «косметичних» до критичних, які роблять її не придатною до подальшого використання. У традиційних системах обліку бракує інтегрованих інструментів, здатних в автоматизованому режимі враховувати ступінь пошкодження зразка АБТТ на рівні окремих вузлів та кінцевих елементів заміни (КЕЗ), критичність кожного пошкодження для функціонування зразка, а також прогнозувати подальший технічний стан. Наявні рішення мають переважно описовий характер і не забезпечують системної оцінки боєздатності.

Крім того, сучасні тенденції в управлінні військовими ресурсами зумовлюють необхідність використання новітніх інформаційних технологій. Такі технології, як цифрові двійники, автоматизовані системи управління даними, методи прогнозування, довели свою ефективність у промисловості і цивільному секторі, однак їхня адаптація для потреб військової логістики і технічного забезпечення перебуває у початковому стані.

Використовувані моделі електронного обліку переважно орієнтовані на промислові процеси і не враховують специфіки бойових умов, особливостей відновлювання АБТТ, багатфакторності пошкоджень і потреби у швидкій категоризації техніки для прийняття рішень у реальному часі.

Отже, проблема полягає у тому, що бракує єдиної методології побудови електронного обліку і ранжування пошкоджених зразків АБТТ, яка б інтегрувала дані з різних джерел [безпілотні літальні апарати (БпЛА), екіпажі, технічна розвідка (ТхР) тощо], забезпечувала б автоматизовану ідентифікацію та класифікацію пошкоджень, розрахунок рівня боєздатності та процес прийняття управлінських рішень у режимі реального часу. Вирішення цієї проблеми має не лише науково-теоретичне, а й критичне практичне значення, оскільки безпосередньо впливає на ефективність використання матеріально-технічних ресурсів, темпи відновлення бойових машин та ефективність виконання службо-бойових завдань військовими підрозділами в умовах бойових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз проведених досліджень вітчизняними вченими засвідчив, що на цей час сформовані основи інфологічного та програмно-технічного забезпечення управління експлуатацією транспортних засобів військового призначення. Зокрема, показано

можливість побудови централізованих баз даних, регламентів збирання й оброблення експлуатаційних даних, а також первинних алгоритмів підтримки прийняття рішень щодо технічного обслуговування та ремонту (ТОiP) [1, 2]. Паралельно у статті [3] обґрунтовано, що оптимізація обліку й автоматизація процесів фіксації подій/простоїв/ремонтів безпосередньо впливають на оперативність управління зразками АБТТ та на економіку технічного забезпечення сил оборони. Ці здобутки є необхідною, але недостатньою базою для вирішення задач електронного обліку і ранжування пошкоджень, адже у бойових умовах потрібні моделі, здатні не лише зберігати факти, а й оцінювати боєздатність зразків АБТТ на рівні вузлів та КЕЗ у реальному часі, інтегруючи різноманітні джерела даних (БпЛА, екіпаж, ТхР, інформаційні системи). Саме тим, що бракує зазначених автоматизованих систем, зумовлюється актуальність розроблення методологічного підходу до побудови моделі електронного обліку і ранжування зразків АБТТ.

Останнім часом активно вивчається можливість використання концепції цифрового двійника [Digital Twin (DT)] для автоматизації процесів прийняття рішення. Серія стандартів ISO 23247 (частини 1–4 опубліковані у 2021 р.) унормовує терміни, архітектурні ролі, інтерфейси даних та сценарії застосування DT, первісно для виробництва, але з очевидним перенесенням на військову техніку [4–7].

Водночас наявні міжнародні підходи до DT не позбавлені недоліків. Вони орієнтовані переважно на промислові і виробничі процеси, де об'єкти функціонують у контрольованих середовищах. Це обмежує їх застосовність у бойових умовах, у яких техніка зазнає раптових і багатофакторних пошкоджень, а доступ до даних може бути обмеженим. Більшість використовуваних моделей DT також не враховує специфічних вимог до швидкості оброблення інформації в умовах тактичних операцій і не забезпечує достатньої гнучкості у масштабуванні для парків військової техніки різних типів. Саме ці обмеження й зумовлюють необхідність адаптації стандартів DT та розроблення спеціалізованих військово-технічних моделей.

Першим кроком упровадження концепції DT у військову галузь є створення «цифрових двійників» поля бою – систем ситуаційної обізнаності, які розгортані в арміях НАТО і партнерів (кейс FBCB2/Blue Force Tracking) [8]. Українська ініціатива (ІКС «Пі Дельта») підтверджує можливість інтеграції бойових звітів, геопросторової аналітики та потоків від БпЛА у єдине інформаційне середовище [9]. Водночас і міжнародні, і національні приклади здебільшого фокусуються на командно-контрольних функціях та аналізі обстановки, тоді як формалізована модель саме технічного стану АБТТ із нормованими шкалами пошкоджень на рівні КЕЗ і прозорими порогоми категорій боєздатності залишалася поза увагою.

У науковій праці [10] деталізовано архітектуру DT, що орієнтована на оцінювання бойових пошкоджень та випробувань озброєння і техніки, підходи до агрегування сенсорних потоків, ієрархізації вузлів та прив'язки до КЕЗ.

Економіко-управлінські роботи з оцінювання ефективності управління активами надають методичний фундамент для «штрафної» інтерпретації пошкоджень (втрат корисності) через зважені суми та нормовані коефіцієнти, що дає змогу використати DT-модель для планування ресурсів і ремонту [11, 12].

У праці [13] показано, що автоматизація обліку моторесурсу та ТОiP підвищує керованість парком зразків АБТТ, а тому природно інтегрується з модулем контролю ремонту та взаємодії зі складами матеріально-технічного забезпечення.

Отже, проведений аналіз засвідчив, що інфраструктурні і методичні передумови для цифровізації обліку АБТТ уже створено, зроблено перші кроки щодо автоматизації процесів оцінювання і прогнозування їхнього технічного стану у реальному часі, але ці процеси потребують подальшого дослідження стосовно створення комплексного методичного підходу до розроблення та впровадження електронного обліку і ранжування за рівнем пошкодження зразків АБТТ. Це і визначає наукову новизну запропонованого підходу та його практичну значущість для підвищення темпів відновлення і збереження боєздатності підрозділів.

Метою статті є створення комплексного підходу до автоматизації сортування пошкоджених зразків після бою або збройного зіткнення для прийняття рішення щодо порядку і характеру відновлювання (ремонт, розбирання, списання), формування заявок на матеріали, запчастини і ремонтні потужності та оперативного контролю процесу відновлення.

Виклад основного матеріалу. Модель електронного обліку і ранжування за рівнем отриманих пошкоджень зразків АБТТ є складовою частиною загальної інформаційної системи управління

експлуатацією транспортних засобів військового призначення, яка висвітлена у статті [1].

В основу моделі електронного обліку і ранжування за рівнем отриманих пошкоджень зразків АБТТ покладено концепцію цифрового двійника об'єкта. Цифровий двійник (Digital Twin) – це комплексна цифрова модель середовища або системи, яка поєднує отримані дані в реальному часі, штучний інтелект та технології моделювання. Такі цифрові моделі динамічні, інтерактивні та здатні здійснювати моніторинг, аналіз, управління та оптимізацію своїх фізичних аналогів у режимі реального часу [14].

Концептуальна структура цифрового двійника стандартизована у серії стандартів ISO [5–8, 15, 16]. Класична п'ятивимірна універсальна модель цифрового двійника запропонована у [17] і наведена на рисунку 1. Зміна стану реального об'єкта відображується на віртуальному, у той час як інформація або керуючі сигнали віртуального об'єкта можуть впливати на реальний.



Рисунок 1 – Концептуальна модель цифрового двійника

Модель електронного обліку і ранжування за рівнем отриманих пошкоджень зразків АБТТ складатиметься з унікального цифрового профілю кожної одиниці техніки і матиме такі модулі:

- модуль 1 – загальна інформація про одиницю техніки;
- модуль 2 – цифровий двійник;
- модуль 3 – технічний стан і ресурси;
- модуль 4 – ідентифікація пошкоджень зразків АБТТ;
- модуль 5 – ранжування АБТТ за рівнем пошкоджень;
- модуль 6 – контроль ремонту (логістика і постачання), статус АБТТ.

Унікальний цифровий профіль кожної одиниці озброєння і військової техніки (ОВТ) – це динамічний документ, який має повну історію змін, дату та авторство внеску. На рисунку 2 подано варіант структури взаємозв'язків між основними інформаційними таблицями унікального цифрового профілю одиниці техніки. Програмне забезпечення реалізує доступ до цього цифрового профілю та управління даними за допомогою відповідних програмних засобів, використовуючи SQL-запити.

Розглянемо структуру наведеного профілю детальніше.

Модуль 1, який орієнтований на загальну інформацію про одиницю техніки, складається із трьох таблиць: «Військова_техніка», «ТТХ_військової_техніки» та «Історія_підпорядкування». У цих таблицях зберігається інформація про ідентифікацію військової техніки (назва, шифр, військовий номер, поточне місцезоположення тощо), тактико-технічні характеристики (ТТХ) та комплектацію озброєння і підпорядкування зразка АБТТ, який описується. Важливу роль при цьому матимуть елементи дистанційної ідентифікації зазначеного зразка АБТТ – QR-код або RFID-мітка, які потрібні для швидкого сканування з планшета або з іншого пристрою виявлення. Дальність виявлення активної RFID-мітки з власним джерелом живлення може становити від 10 см на низьких частотах (LF, 125 кГц) до 100 м на надвисоких (UHF, 860–960 МГц). Місцезоположення зразка техніки можливо визначати автоматично за допомогою GPS-трекерів або внесенням даних вручну.

Основним модулем запропонованого цифрового профілю зразка АБТТ (його ядром) є модуль цифрового двійника (модуль 2).

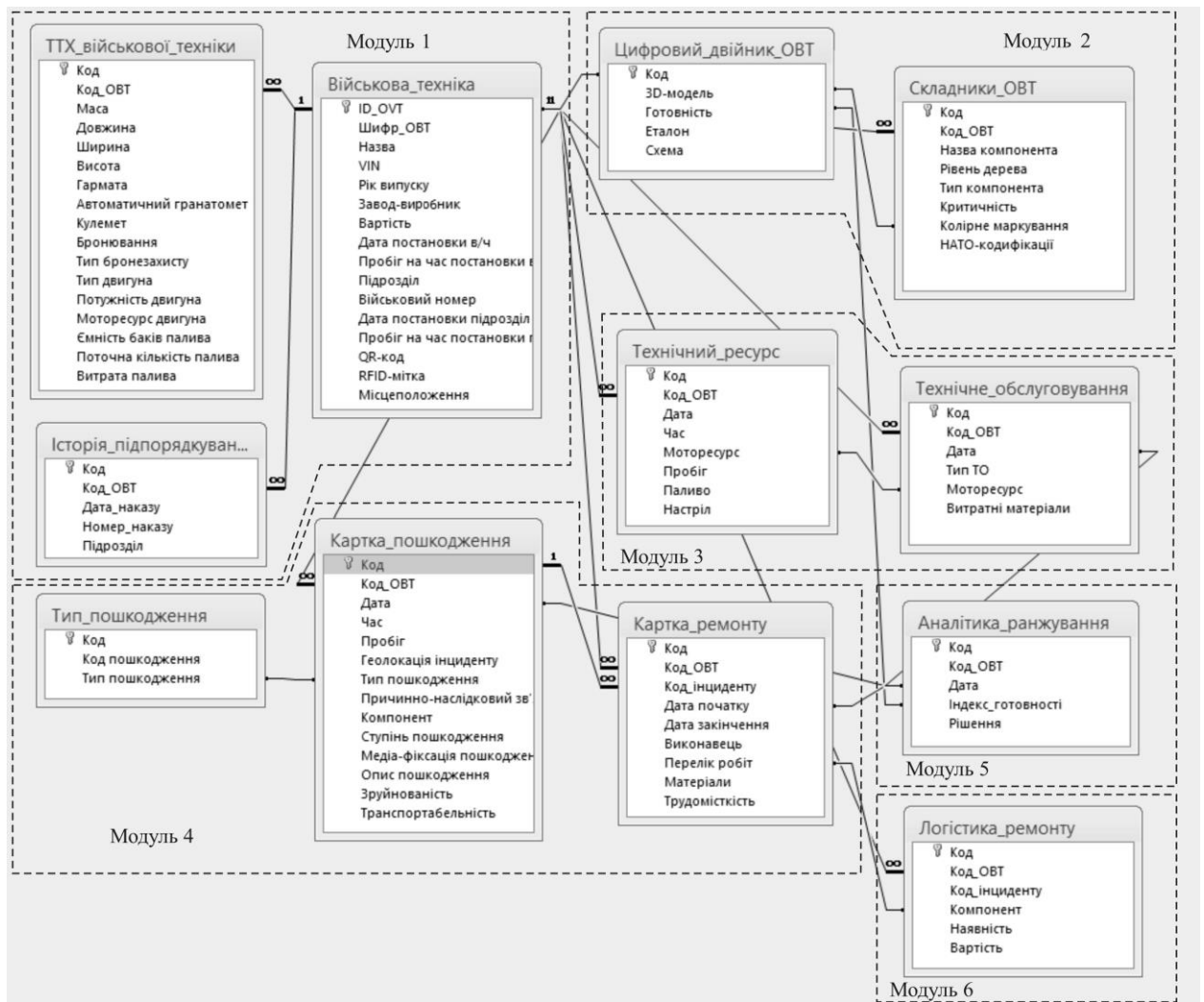


Рисунок 2 – Структура взаємозв'язків між основними інформаційними таблицями унікального цифрового профілю одиниці техніки

Модуль 2 складається з двох таблиць: «Цифровий двійник ОВТ» та «Складники ОВТ». Наведений модуль відповідає за функціонування інтерактивної 3D-моделі зразка ОВТ. Це високодеталізована модель, яка розбита на ієрархічну структуру вузлів і агрегатів. Деталізацію цифрового двійника необхідно провести до КЕЗ. У цьому дослідженні під КЕЗ будемо розуміти неподільний елемент зразка техніки, який підлягає заміні зі складу матеріально-технічного забезпечення.

Наприклад, можливо запропонувати таке дерево компонентів:

- рівень 1 – основні блоки АБТТ (корпус, башта, шасі та ін.);
- рівень 2 – вузли (двигун, трансмісія, зразки озброєння та ін.);
- рівень 3 – агрегати/деталі (турбокомпресор, блок циліндрів, приціл тощо).

Кожний компонент у дереві матиме посилання на номер за каталогом запчастин [військова версія SAP-коду, NATO Stock Number (NSN)].

Використання цифрового двійника дасть змогу оперативно відстежувати технічний стан зразка АБТТ, зокрема і після бойових дій. Кожний КЕЗ залежно від свого технічного стану буде динамічно змінювати колір (зелений колір відповідатиме справному стану, червоний – повністю пошкодженому). Крім того, кожний КЕЗ має ознаку критичності (таблиця «Складники ОВТ» на рисунку 2). Значення ознаки критичності перебуває у межах від 0 до 1. Це значення залежить від важливості впливу функціонала такого КЕЗ на боєздатність АБТТ.

Отже, технологія цифрового двійника дасть змогу оперативно і наочно відображувати технічний стан зразка АБТТ, а також проводити процес ранжування пошкодженої техніки.

Модуль 3 орієнтований на зберігання інформації про технічний стан одиниці техніки і складається

з двох таблиць: «Технічний_ресурс» та «Технічне_обслуговування». У цих таблицях є інформація про поточний моторесурс, пробіг та кількість палива. Також зберігається графік технічного обслуговування різних типів, плани заміни мастил, фільтрів тощо з прив'язкою до моторесурсу. Однією із функцій наведеного модуля є автоматичне формування запиту на проведення технічного обслуговування та розрахунок потрібних сил і засобів.

Важливою частиною є *модуль 4*, який відповідає за опис, формалізацію та ідентифікацію пошкоджень одиниці АБТТ. Зазначена інформація збирається з різних джерел, які або підтверджують цю інформацію, або ні. Наприклад, можливими джерелами можуть бути дані від повітряного і наземного пошуку (аерофотознімки, відеопотоки, фіксація пошкоджень оператором FPV-дрона, опис фахівців тощо), інформаційних ресурсів (ІКС «ІП Дельта» або засоби ISTAR) та отримання інформації безпосередньо від екіпажу чи командування. Наведений модуль складається із трьох таблиць: «Картка_пошкодження», «Картка_ремонту», «Тип_пошкодження».

Для кожного пошкодження фіксуються місцеположення зразка, тип пошкодження, причинно-наслідкові зв'язки цього пошкодження, перелік компонентів та КЕЗ, які могли бути пошкоджені, та встановлюється ступінь пошкодження (від 0 до 4). Також обов'язково констатується стан зруйнованості і транспортабельності самого зразка АБТТ.

Класифікацію ступеня пошкодження на рівні КЕЗ (K^{cn}) наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація пошкоджень на рівні КЕЗ

Ступінь K^{cn}	Тип пошкоджень	Опис типу пошкоджень	Приклад
0	Без пошкоджень	Пошкоджень немає. КЕЗ функціонує нормально	
1	Легкі (помірні)	Поверхневі пошкодження, що не впливають на функціональність	Вм'ятина на корпусі, пошкоджена фара тощо
2	Середні	Пошкодження, що обмежують функціональність, але вузол ще працює	Пошкоджений приціл (ускладнене прицілювання), невелика пробоїна в корпусі тощо
3	Важкі	Вузол повністю виведений з ладу, але можливий ремонт на місці або у майстерні	Перебита гусениця, зім'ятий і заклинений люк, пробитий радіатор двигуна
4	Критичні (незворотні)	Вузол знищений або пошкоджений, не підлягає відновленню. Потрібна заміна	Детонація боєкомплекту, пробиття броні з руйнуванням двигуна, відрив бойового модуля

Відповідно до отриманих пошкоджень формується картка ремонту, в якій зберігаються дані про потрібні сили і засоби, формується перелік робіт, матеріалів та визначається трудомісткість усунення пошкодження. Приклад можливої структури таблиці «Картка_пошкодження» та «Картка_ремонту» з визначеними полями наведено на рисунку 3.

Картка_пошкодження		
Назва поля	Тип даних	
Код	Лічильник	унікальний код
Код_ОВТ	Числовий	унікальний код зв'язку
Дата	Дата/час	дата інциденту
Час	Дата/час	час інциденту
Пробіг	Числовий	кількість кілометрів на час інциденту
Геолокація інциденту	Поле об'єкта OLE	геотег інциденту
Тип пошкодження	Числовий	код пошкодження ОВТ
Причинно-наслідковий зв'язок	Текстовий	опис наслідків інциденту
Компонент	Текстовий	назва компоненту
Ступінь пошкодження	Числовий	код ступеня пошкодження (від 0 до 4)
Медіа-фіксація пошкодження	Поле об'єкта OLE	фотографії, відеозапис, 3D-скан
Опис пошкодження	Текстовий	опис екіпажу, інспектора
Зруйнованість	Логічний	стан зруйнованості (так - зруйнований, ні - не зруйнований)
Транспортабельність	Логічний	стан транспортабельності (так - транспортабельний, ні - не транспортабельний)

а

Картка_ремонту		
Назва поля	Тип даних	
Код	Лічильник	унікальний код
Код_ОВТ	Числовий	унікальний код зв'язку
Код_інциденту	Числовий	унікальний код пошкодження після інциденту
Дата початку	Дата/час	дата початку ремонтних робіт
Дата закінчення	Дата/час	дата завершення ремонтних робіт
Виконавець	Текстовий	назва ремонтного підрозділу
Перелік робіт	Текстовий	опис необхідних робіт
Матеріали	Текстовий	список запчастин з їх кодами, кількістю, вартістю
Трудомісткість	Числовий	кількість людино-годин для виконання ремонту

б

Рисунок 3 – Можлива структура таблиць:
а – «Картка_пошкодження»; б – «Картка_ремонту»

Модуль 4 тісно пов'язаний з модулями 5 і 6. Інформація із цього модуля є вхідною для розрахунку індексу боєздатності зразка АБТТ ($K^{\text{бз}}$) та формування заявок на необхідні КЕЗ.

У модулі 5 зберігається результат розрахунку індексу боєздатності ($K^{\text{бз}}$) усього зразка АБТТ на основі сукупності ступенів пошкоджень кожного КЕЗ із урахуванням таких властивостей, як важливість і критичність кожного вузла для життєздатності всієї машини. Крім того, у модулі можуть зберігатися зміни $K^{\text{бз}}$ за весь час експлуатації. Відповідно до встановлених критеріїв відносно значень $K^{\text{бз}}$ визначаються рівні боєздатності RS усього зразка АБТТ.

Розглянемо алгоритм розрахунку індексу боєздатності $K^{\text{бз}}$ зразка АБТТ. Із використанням [18] запропонуємо чотири рівні боєздатності зразка АБТТ RS на основі сукупності $K^{\text{сн}}$ кожного КЕЗ (таблиця 2).

Таблиця 2 – Рівні боєздатності зразка АБТТ

Рівень RS	Колір	Назва	Опис стану зразка АБТТ
A	Зелений	Боєздатний	Пошкоджень або немає, або вони суто косметичні і не впливають на функціональність
B	Жовтий	Обмежено боєздатний	Зразок може виконувати свої функції (рухатися і/або стріляти), але з обмеженнями
C	Помаранчевий	Пошкоджений	Боєздатність втрачена. Потребує евакуації та ремонту в майстерні
D	Червоний	Критично пошкоджений	Відновлення неможливе або економічно не доцільне

Визначимо ключові принципи розрахунку рівнів боєздатності зразка АБТТ:

- необхідність урахувати не тільки наявність та тип пошкодження КЕЗ (таблиця 1), а і його критичність для життєздатності всієї машини;
- наявність кумулятивного ефекту, який полягає в тому, що кілька пошкоджень середнього типу на різних системах можуть знизити загальну боєздатність так само, як одне важке пошкодження на одній системі;
- застосування логіки «найслабшої ланки», тобто стан найкритичнішого пошкодженого вузла визначає мінімальний рівень боєздатності.

Для створення гнучкого й адекватного методу розрахунку індексу боєздатності $K^{\text{бз}}$ зразка АБТТ будемо використовувати такі характеристики, як важливість і критичність КЕЗ.

Важливість КЕЗ – це статистична характеристика, яка визначається за конструкцією. Важливість КЕЗ характеризується таким показником, як коефіцієнт важливості W , значення якого може бути від 0 до 1. Це константа, що залежить від типу техніки і ролі КЕЗ для функціонування всього зразка АБТТ. Наприклад, двигун матиме дуже високу важливість ($W = 0,18$), гусениця – високу важливість, але нижчу, ніж у двигуна ($W = 0,12$) тощо. Сума коефіцієнтів важливості всіх КЕЗ зразка АБТТ повинна дорівнювати 1 (або 100 %):

$$\sum_{i=1}^M W_i = 1, \quad (1)$$

де W_i – коефіцієнт важливості i -го КЕЗ;

M – кількість усіх КЕЗ, із яких складається зразок АБТТ.

Критичність КЕЗ – це динамічна характеристика, що визначається за типом і ступенем пошкоджень КЕЗ. Як показник виберемо коефіцієнт критичності C , який також має значення від 0 до 1. Це змінне значення, що залежить від наслідків пошкодження КЕЗ і характеризує, наскільки таке пошкодження є небезпечним для всього зразка АБТТ. Наприклад, розглянемо КЕЗ – паливний бак. Якщо пошкодження паливного бака – подряпина, то $K^{\text{сн}} = 0,1$ (що не критично), а відповідний йому коефіцієнт $C = 0,05$. За наявності вм'ятини $K^{\text{сн}} = 2$ (потенційна небезпека), $C = 0,2$; у випадку отримання пробоїни або витоку палива $K^{\text{сн}} = 3$ (дуже критично), $C = 0,85$; у разі детонації $K^{\text{сн}} = 4$ (катастрофічно), $C = 1$.

Значення коефіцієнта критичності визначається на основі статистичних даних ремонтів різних КЕЗ та аналізу наслідків пошкодження елемента, який розглядається, щодо забезпечення життєздатності всієї машини сукупно з методом експертної оцінки.

Індекс боєздатності $K^{\bar{\sigma}}$ зразка АБТТ будемо розраховувати за виразом

$$K^{\bar{\sigma}} = \left(1 - \sum_{i=1}^N \frac{K_i^{cn}}{K^{cnD}} \cdot W_i \cdot C_i \right) \cdot 100, \quad (2)$$

де N – кількість пошкоджених КЕЗ після бойових дій;

$\frac{K_i^{cn}}{K^{cnD}}$ – нормований коефіцієнт ступеня пошкодження КЕЗ відносно ступеня пошкодження на

рівні D, $K^{cnD} = 4$ (0 – 0; 1 – 0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75; 4 – 1,0);

C_i – показник критичності i -го КЕЗ.

Рівні боєздатності RS, як наведено вище, залежать від індексу боєздатності $K^{\bar{\sigma}}$ зразка АБТТ. Проте важливим питанням є визначення границь рівнів RS, які базуються на числових значеннях показника $K^{\bar{\sigma}}$.

Для переведення показника $K^{\bar{\sigma}}$ у категоричну оцінку стану техніки, зрозумілу для прийняття рішень, використовувався такий комплексний методичний підхід.

По-перше, проводилося початкове налаштування границь за допомогою експертного методу, що складався з чотирьох етапів:

- 1) формування експертної групи з досвідчених фахівців з ремонту, офіцерів зі стажем експлуатації АБТТ, викладачів кафедр АБТТ;
- 2) розгляд сценаріїв;
- 3) категоризація сценаріїв;
- 4) аналіз результатів математичного моделювання і визначення границь (границі визначалися як діапазони $K^{\bar{\sigma}}$, де частка згоди експертів є найвищою).

По-друге, здійснювалися валідація й уточнення границь категорій статистичними методами на базі реальних даних.

Остаточним було проведення тестування граничних випадків за допомогою математичного моделювання.

На жаль, універсальних границь для всіх зразків АБТТ немає. Границі рівнів RS мають бути різними для різних типів машин, що пов'язано з особливостями конструкцій, складністю та кількістю систем і КЕЗ, призначенням.

Так, для АБТТ типу БТР-4Е були отримані границі, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Границі категорій RS БТР-4Е

Рівні RS	Діапазон $K^{\bar{\sigma}}$, %	Опис критерію
A	85–100	Усі пошкодження КЕЗ $K^{cn} = 0$ або 1
B	60–84	Переважають пошкодження КЕЗ $K^{cn} = 2$
C	20–59	Є один або кілька компонентів з $K^{cn} = 3$
D	0–19	Є хоча б один компонент з $K^{cn} = 4$ у критичному вузлі (зокрема двигун)

Можливо визначити границі рівнів RS за допомогою графічного відображення. Наприклад, розглянемо зразок АБТТ, який складається із 8 КЕЗ. Властивості цих КЕЗ подано у таблиці 4.

Таблиця 4 – Приклад властивостей КЕЗ зразка АБТТ

КЕЗ	W_i	RS				RS			
		A	B	C	D	A (0,25)	B (0,5)	C (0,75)	D (1,0)
		C_i	C_i	C_i	C_i	$W_i \cdot C_i$	$W_i \cdot C_i$	$W_i \cdot C_i$	$W_i \cdot C_i$
1	0,23	0,2	0,5	0,8	1	0,0115	0,0575	0,1380	0,23
2	0,12	0,2	0,5	0,8	1	0,0060	0,0300	0,0720	0,12
3	0,15	0,1	0,3	0,5	1	0,0038	0,0225	0,0563	0,15
4	0,14	0,1	0,4	0,7	1	0,0035	0,028	0,0735	0,14
5	0,11	0,1	0,3	0,5	1	0,0028	0,0165	0,0413	0,11
6	0,10	0,1	0,4	0,6	1	0,0025	0,0200	0,0450	0,10
7	0,08	0,1	0,3	0,5	1	0,0020	0,012	0,0300	0,08
8	0,07	0,1	0,3	0,5	1	0,0018	0,0105	0,0263	0,07
	1,00								

Графічне відображення у вигляді зон рівнів RS подано на рисунку 4.

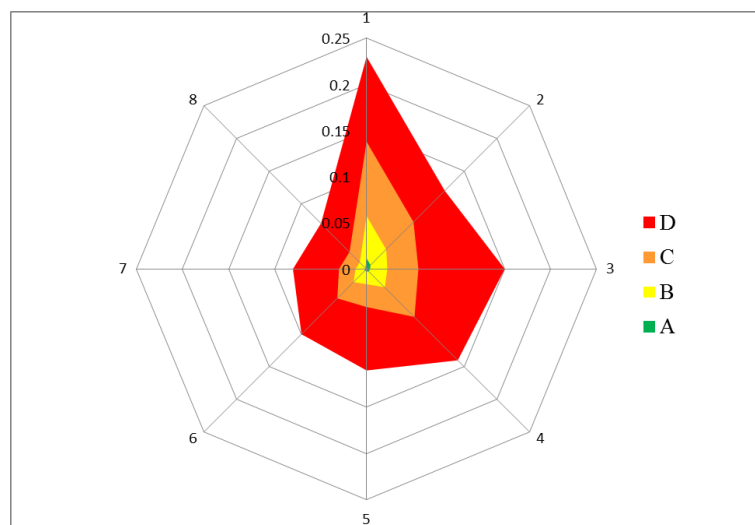


Рисунок 4 – Графічне відображення границь зон рівнів RS

Далі відповідно до отриманих значень $K^{\text{бз}}$ усіх пошкоджених зразків АБТТ на полі бою проводиться ранжування за заданим критерієм, наприклад від більшого до меншого.

Сума, яка знаходиться у правій частині виразу (2), розраховує величину втрат боєздатності від пошкоджених КЕЗ (сума «штрафів» за пошкодження). Спочатку зразок АБТТ складається із непошкоджених КЕЗ і його технічний стан приймається як початковий стан системи ($K^{\text{бз}} = 100\%$), до якого додаються лише негативні штрафи. Модель зосереджена на оцінюванні збитків, а не на переліку того, що залишилося цілим. Це стандартний і ефективний підхід у системах управління активами та оцінюванні збитків [11, 12].

Викладений вище матеріал складає базу розробленого методу ранжування за рівнем отриманих пошкоджень зразків АБТТ на полі бою. Алгоритм запропонованого ранжування наведено на рисунку 5.

Основна особливість розробленого алгоритму (рисунк 5) полягає у тому, що він є алгоритмом комбінованого типу. У ньому поєднуються логічний підхід (блок 9) та математичний (блоки 10, 11) під час розрахунку коефіцієнта боєздатності.

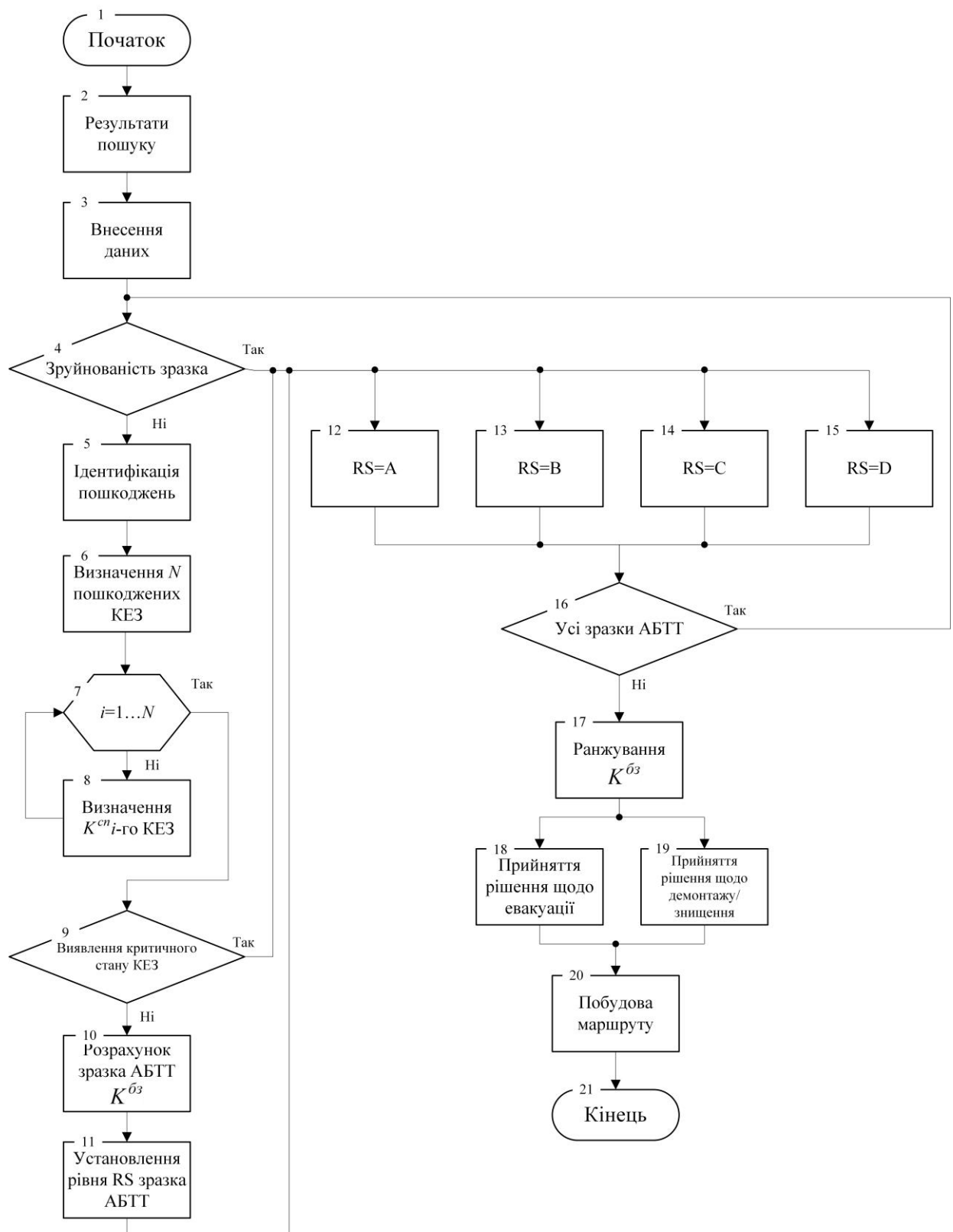


Рисунок 5 – Алгоритм ранжування за рівнем отриманих пошкоджень

Логічний підхід полягає у перевірці наявності критичного стану ($K_i^{cn} = 4$) будь-якого КЕЗ та складанні їхнього списку. Після цього перевіряється важливість зазначених КЕЗ і у разі перевищення наведеним показником установленого значення ($W_i \geq W_{nor}$) миттєво надається всьому зразку АБТТ рівень $RS = D$.

Якщо логічний підхід не виявив критичних ситуацій у зразку АБТТ, то далі проводиться розрахунок $K^{бз}$ відповідно до виразу (2) у блоках 10 і 11 (приклад подано у таблиці 3).

У блоці 17 проводиться ранжування за заданим критерієм усіх зразків АБТТ відповідно до значення $K^{бз}$. Пропонується проводити ранжування окремо для зразків, які мають рівень RS від А до С, та для зразків, які мають рівень RS – D. Далі проводиться ранжування зразків за рівнем від А до С і приймається рішення щодо порядку поточного ремонту на полі бою або евакуації (блок 18), а для зразків за рівнем D – рішення на демонтаж обладнання і знищення або на евакуацію з подальшим комплексом наведених процедур.

У блоці 20 за допомогою програмних додатків на основі технології ГІС (ІКС «Дельта», ГІС НГУ «Інструмент» та ін.) будується кілька раціональних маршрутів для виконання поставлених завдань.

Модуль 6 (див. рисунок 2) визначає взаємозв'язок зі складськими запасами. У разі призначення ремонту модуль автоматично перевіряє наявність необхідних запчастин на найближчому складі матеріально-технічного забезпечення, а у випадку, коли їх бракує або не вистачає, автоматично формує заявку. У цьому модулі зберігається поточна балансова вартість техніки з урахуванням зносу і проведених капітальних ремонтів, а також вартість усіх відновлювальних ремонтів за весь час.

Агрегована інформація від модулів 4, 5 та 6 виступає у ролі датчиків фізичного об'єкта і формує вплив на віртуальний об'єкт, відображуючи його поточний стан. Модуль 2 – цифровий двійник, володіючи повною інформацією про стан кожного КЕЗ, проводитиме: прогнозування закінчення ресурсу ключових вузлів (на основі статистики відмов для зазначеної моделі техніки); планування потреби у запасних частинах (на основі історичних даних); оцінювання вартості майбутнього ремонту (на основі історії та актуальних цін на запчастини). Крім того, можливо виконати моделювання майбутніх вогневих зіткнень на полі бою і на базі статистичних даних спрогнозувати найімовірніші бойові пошкодження, провести їх аналіз, а також оптимізацію розташування засобів захисту щодо підвищення життєздатності всієї машини. Це створює зворотний зв'язок цифрового двійника на фізичний об'єкт.

У процесі реалізації наведеного проєкту необхідно забезпечити такі вимоги:

- єдина центральна база даних та електронне сховище неструктурованої інформації;
- захист від несанкціонованого втручання до функцій програмного додатка;
- робота у реальному масштабі часу;
- зручний і простий в адмініструванні та користуванні інтуїтивно-зрозумілий інтерфейс;
- можливість нарощування кількості цифрових двійників та обсягу їх функцій;
- можливість резервування критично важливих компонентів і даних, які дають змогу провести відновлення баз даних після аварійних ситуацій без порушення цілісності інформації;
- контроль доступу до функцій програмного додатка;
- можливість інтеграції (інформаційної взаємодії) з іншими системами.

Однак зазначена модель коректно працюватиме тільки у тому випадку, якщо дані про фізичні об'єкти постійно відстежуватимуть – як автоматично, так і за допомогою операторів. У цьому разі необхідно визначити не менше ніж три вертикальних рівні допуску до внесення змін у модель за категоріями: «підрозділ – регіональне управління – головне управління». Це означає, що процедуру внесення змін і доповнень у дані можливо реалізовувати зверху донизу [12]. На горизонтальному рівні підрозділів ролі користувачів можливо поділити так:

- 1) БпЛА – здійснює фото- і відеофіксацію пошкоджень з різних висот та ракурсів;
- 2) склад екіпажу – може додавати фото, відео пошкоджень, детальний опис;
- 3) фахівець групи технічної розвідки (інженер-інспектор) – має право офіційно класифікувати пошкодження КЕЗ;
- 4) начальник ремонтної служби – формує плани ремонтів, заявки;
- 5) логістик – здійснює перегляд аналітики заявок на ремонт, формування запасу запчастин на складі МТЗ.

Отже, запропонований у статті підхід на основі комбінованого алгоритму, що поєднує логічні правила «найслабшої ланки» з ваговим агрегуванням пошкоджень і критичності у єдиний індекс боездатності, дає можливість оперативно відстежувати технічний стан зразків АБТТ, зокрема і після бойового зіткнення.

Висновки

Сучасні бойові дії характеризуються високою інтенсивністю застосування озброєння і військової техніки, що спричиняє значні втрати зразків автобронетанкової техніки. В умовах ведення бою необхідно максимально оперативно приймати рішення щодо евакуації та ремонту пошкоджених зразків техніки.

У статті запропоновано методичний підхід до створення моделі електронного обліку і ранжування пошкоджень зразків автобронетанкової техніки з використанням концепції цифрового двійника. Подано структуру, яка містить модулі ідентифікації техніки, відображення технічного стану, фіксації пошкоджень на рівні кінцевих елементів заміни, розрахунку індексу боєздатності та контролю ремонтно-логістичних процесів.

Сутність методу ранжування зразків автобронетанкової техніки після бойових зіткнень полягає у розрахунку величини втрат боєздатності від пошкоджених кінцевих елементів заміни (сума «штрафів» за пошкодження) після влучання та оцінювання остаточного рівня боєздатності.

Автором запропоновано чотири рівні боєздатності і розроблено критерії визначення границь рівнів боєздатності зразків автобронетанкової техніки.

Упровадження електронного обліку і ранжування надасть значний потенціал для оптимізації військових операцій і планування ресурсів у довгостроковій перспективі, забезпечуючи стійкість техніки та зниження витрат на її ремонт.

Напрямом подальших досліджень є інтеграція запропонованої моделі електронного обліку і ранжування з нейронними мережами, які використовуватимуться для дистанційної ідентифікації пошкоджень, що дасть змогу оптимізувати процес прийняття рішень, підвищуючи ефективність управління технічними ресурсами.

Перелік джерел посилання

1. Сівак В. А. Інфологічна модель інформаційної системи управління експлуатацією транспортних засобів військового призначення. *Озброєння та військова техніка*. 2016. № 2 (10). С. 38–42.
2. Сівак В. А. Експериментальна реалізація прототипу інформаційної системи управління експлуатацією транспортних засобів військового призначення. *Збірник наукових праць ВІ КНУ імені Тараса Шевченка*. 2017. № 56. С. 154–165.
3. Партика С. Оптимізація обліку експлуатації машин Державної прикордонної служби України. *Збірник наукових праць НА ДПСУ*. № 3 (88). 2022. С. 301–315. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v88i3>.
4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1. 2021.
5. ISO 23247-2:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 2. 2021.
6. ISO 23247-3:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 3. 2021.
7. ISO 23247-4:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 4. 2021.
8. Conatser J. L., Grizio V. E. Force XXI Battle Command Brigade and Below – Blue Force Tracking (FBCB2-BFT): A Case Study MBA Professional Report. 2005.
9. Delta Digital Handbook. Development & Implementation Department. 2024. 85 p.
10. Song M., Shi Q., Hu Q., You Z., Chen L. On the Architecture and Key Technology for Digital Twin Oriented to Equipment Battle Damage Test Assessment. *Electronics*. 2023. 12 (1):128. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12010128>.
11. Пігуль Н. Г., Бондаренко Є. К., Кириченко А. В. Методичні засади оцінки ефективності управління активами підприємства. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 33. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-20>.
12. Михайличенко М. С. Особливості управління активами та пасивами банку. *Наукові записки. Економічні науки*. 2021. Т. 94. С. 65–74.
13. Методика удосконалення контролю технічного стану автомобільної та бронетанкової техніки за рахунок автоматизації обліку витрати її моторесурсу / В. А. Сівак та ін. *Збірник наукових праць ДНДІ ВіС ОБТ*. 2021. № 4 (10). С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.10.2021.15>.

14. Marco Giberna, Holger Voos, Paulo Tavares, João Nunes, Tobias Sorg, Andrea Masini, and Jose Luis Sanchez-Lopez. On Digital Twins in Defence: Overview and Applications. Report Issue for Selection. License: CC BY 4.0. arXiv:2508.05717v1 [cs.CR] 07 Aug 2025. URL: <https://surl.li/anzzve> (дата звернення: 25.08.2025).

15. ISO/CD 23247-5 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. URL: <https://surl.li/ononke> (дата звернення: 01.09.2025).

16. ISO/CD 23247-6 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. URL: <https://surl.li/iltevc> (дата звернення: 01.09.2025).

17. Про затвердження Інструкції про організацію та проведення інспекційних заходів у Національній гвардії України : наказ Міністерства внутрішніх справ України № 312 від 15.06.2017 р.

Стаття надійшла до редакції 03.09.2025 р.

UDC 623.442:004.9:620.179+53.082

Ya. Pavlov

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC ACCOUNTING AND RANKING MODEL FOR ASSESSING DAMAGE LEVELS OF ARMORED VEHICLES

The article substantiates methodological approaches to the development of an electronic accounting and ranking model for assessing damage to armored vehicles using the digital twin concept. The relevance of the study is determined by the high intensity of modern combat operations, which leads to significant losses and damage to military equipment, as well as the urgent need for rapid and well-founded decisions regarding evacuation and subsequent repair. Traditional accounting methods are based mainly on paper documentation and subjective assessments, which prevents timely classification of damage and effective management of repair resources.

The proposed model structure provides for the creation of a unique digital profile of each vehicle, which includes modules for identification, visualization of technical condition, description of damage at the level of replaceable end elements, calculation of the combat readiness index, and control of repair and logistic processes. Integration of data from various sources, combined with automated processing, ensures the capability to promptly classify damage, determine combat readiness levels, and generate recommendations for further actions.

Special attention is paid to the use of digital twins as dynamic interactive models that reflect the current technical state of each armored vehicle and enable forecasting of component life, modeling of damage consequences, and planning of spare parts requirements. This approach allows optimization of repair and maintenance processes, reduction of decision-making time, improvement of logistic support efficiency, and overall enhancement of unit combat readiness.

The developed model is defined as a strategically important tool for the modern Armed Forces and security structures, including the National Guard of Ukraine, as it ensures long-term sustainability of the military vehicle fleet. The direction of further research involves integrating the proposed electronic accounting and ranking model with neural networks for remote identification of damage, which will optimize decision-making processes and enhance the effectiveness of technical resource management.

Keywords: *armored vehicles, damage, electronic accounting, digital twin, combat readiness index, replaceable end element, automated data processing.*

Павлов Ярослав Володимирович – кандидат педагогічних наук, доцент, начальник навчально-наукового інституту логістики, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0002-0852-5659>