

ТЕРТИШНИК Євген Михайлович,

Національний університет оборони України, Київ, Україна,

<https://orcid.org/0000-0003-3356-7639>

ОПЕРАТОРНИЙ МЕТОД АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Метою статті є розроблення операторного методу автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань озброєння та військової техніки, що спрямований на підвищення оперативності проведення випробувань і забезпечення ефективного використання наявних ресурсів.

Методи дослідження. Для досягнення мети використані такі методи: індукції – для формулювання визначення «параметричної інформації озброєння та військової техніки» в системі випробувань; формалізації – для перетворення процесу випробувань та автоматизації обробки інформації через послідовну композицію операторів й визначення етапів методу; математичного моделювання – для описання стану автоматизованої системи обробки параметричної інформації у вигляді кортежу; багатофакторного аналізу – як основа для розробки формалізованого порядку вибору аналітичного інструментарію; експертного оцінювання на етапі вибору аналітичного інструментарію – для визначення коефіцієнтів релевантності критеріїв.

Отримані результати дослідження. Отримано взаємопов'язані результати, які формують цілісну систему автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань озброєння та військової техніки. Розглянуто етапи проведення випробувань та визначено основні заходи, які виконуються. Сформовано визначення параметричної інформації у контексті випробувань озброєння та військової техніки. Проаналізовано національні та міжнародні керівні документи, що визначають основні категорії і організаційні ознаки проведення випробувань військової техніки. Розроблено та описано операторний метод автоматизації обробки параметричної інформації, який реалізується у чотири послідовні етапи: планування, що формалізує вхідні дані (завдання, користувачів, інфраструктуру), конфігурує систему через перетворення вхідних множин у вихідні матриці та здійснюється вибір аналітичного інструментарію; обробки, що передбачає автоматичний збір даних, їх первинну обробку (очищення, фільтрацію, нормалізацію, синхронізацію) та збереження в базі даних; аналізу і формування результатів, де застосовуються обрані аналітичні методи, проводиться інтерпретація та візуалізація результатів (звіти, дашборди) й формуються проекти рішень і рекомендацій; ітерації та адаптації, який виконує аналіз результатів експертами (human-in-the-loop), формування зворотного зв'язку та, за потреби, коригування моделі системи з поверненням на один із попередніх етапів. Розроблено порядок формування гібридної аналітичної моделі на основі багатофакторного аналізу за п'ятьма критеріями з розрахунком вагових коефіцієнтів і визначенням ролі методів через порогові значення. Процес автоматизації представлено комплексним виразом, що забезпечує наскрізну трансформацію від початкового стану системи через етапи обробки до кінцевого результату у вигляді множини аналітичних звітів, візуалізацій, оцінок відповідності тактико-технічним характеристикам та проектів рішень щодо випробуємого зразка.

Елементи наукової новизни. Розроблений метод використовує операторний підхід і формалізує процес випробувань у вигляді послідовної композиції чотирьох операторів планування, обробки, аналізу та ітерації, що трансформують стан системи; уточнює формалізований порядок вибору аналітичного інструментарію, який ґрунтується на багатофакторному аналізі та кількісному оцінюванні доцільності застосування методу. Крім того, уточнено поняття «параметрична інформація озброєння та військової техніки» в контексті випробувань, сформульоване методом індукції.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Теоретичне значення полягає у розробленні операторного методу автоматизації обробки параметричної інформації, яка створює наукову основу для формалізації та автоматизації процесів обробки даних під час випробувань озброєння та військової техніки. Практичне значення викладеного у статті операторного методу зводиться до: підвищення оперативності проведення випробувань, забезпечення ефективного використання наявних ресурсів, прискорення процесу прийняття рішень шляхом автоматизованого перетворення вхідних даних у кінцеві аналітичні продукти (звіти, протоколи, акти), що значно прискорює та підвищує якість роботи експертів.

Ключові слова: автоматизація, обробка, метод, автоматизована система, математична модель, аналіз, бази даних, алгоритм, візуалізація, системні застосунки.

Вступ

Постановка проблеми. Випробування є невід'ємною частиною процесів дослідження, проєктування, виготовлення та експлуатації озброєння та військової техніки (далі – ОВТ). Дослідні зразки ОВТ за рішенням державного замовника підлягають різним видам (категоріям) випробувань за основними ознаками, що визначені національними стандартами України. Випробування класифікуються за категоріями, що характеризуються організаційними ознаками їх проведення, а саме: рівнем проведення випробувань (державні, міжвідомчі, відомчі випробування), етапами розроблення зразка ОВТ (доводочні, попередні, приймальні), видами випробувань (кваліфікаційні, приймально-здавальні, типові та інші), згідно [1–2].

Випробування можуть мати дві та більше ознак, у такому разі за потреби найменування випробувань передбачає перерахування цих ознак видів випробувань, зокрема таких, як міжвідомчі періодичні стендові випробування на надійність тощо. За результатами зазначених випробувань проводиться оцінювання зразка ОВТ у цілому і приймається відповідне рішення про:

- можливість пред'явлення зразка ОВТ на приймальні випробування;
- встановлення виробу на виробництво;
- закінчення освоєння серійного виробництва;
- можливість продовження строку експлуатації;
- присвоєння виробу тієї чи іншої категорії якості тощо.

Порядок проведення випробувань має забезпечувати послідовну реалізацію функцій, визначених у [3]. У свою чергу, випробування кожної категорії зразків ОВТ можуть проводитися у декілька етапів [2]:

1. Підготовка документів, що передбачає збір та оформлення потрібної документації, зокрема рішення або спільне рішення Міноборони на проведення випробувань, наказ Замовника про призначення комісії з проведення випробувань, акт готовності зразка ОВТ, погодження та затвердження програми та методики випробувань тощо.

2. Формування комісії. На цьому етапі створюється комісія, відповідальна за проведення випробувань, що передбачає призначення голови комісії та його заступників, включення представників Замовника продукції, випробувальних (наукових) установ, структурних підрозділів (військових частин), що залучатимуться до підготовки та проведення випробувань, залучення фахівців від розробника зразка ОВТ.

3. Організація випробувань передбачає планування та безпосередню підготовку до перевірок, розподіл обсягу робіт, постановка завдання учасникам, координація їх діяльності, вибір вимірювального обладнання та робочих місць, які необхідно розгорнути, проведення інструктажів та розроблення заходів безпеки.

4. Проведення випробувань згідно із затвердженим планом передбачає виконання пунктів програми,

дотримання графіка, вимірювання та реєстрацію параметрів і характеристик зразка ОВТ, а також контроль за умовами випробувань.

5. Аналіз і документування результатів. На цьому етапі усі отримані під час випробувань дані ретельно фіксуються, складаються протоколи, оформлюється звітна документація, обробляються та фіксуються отримані дані, проводиться аналіз отриманих результатів, оцінювання відповідності характеристик техніки заявленим вимогам. На цьому етапі можуть бути припинені випробування за умов отримання позитивних результатів.

6. Прийняття рішення. На основі аналізу результатів приймається рішення про прийняття (не прийняття) випробувального зразка на озброєння (постачання) Збройних Сил України або його доопрацювання та оформлюється відповідний акт випробувань. Випробування вважають закінченими, якщо їх результати оформлені актом, який підтверджує виконання програми випробувань та містить оцінку результатів випробувань.

За результатами випробувань програми та методики можуть бути скориговані для проведення наступних циклів перевірок, що підкреслює циклічність та ітеративність процесу (рис. 1). Аналіз процесу випробувань ОВТ свідчить про те, що випробування проводяться для отримання параметричної інформації про зразок ОВТ, що має порівнюватися з вимогами до такого зразка, визначених Замовником із подальшим висновком про відповідність (не відповідність) висунутим вимогам. Слід зазначити, що окремо термін «параметрична інформація» у керівних документах, регламентуючих випробування в Збройних Силах України не наведено. Разом з тим, поняття «параметрична інформація» згадується у визначенні польотної інформації, що є параметричною і мовною інформацією бортових реєстраторів про політ повітряного судна доповнена інформацією занесеною екіпажем повітряного судна до носія польотної інформації [12]. Крім того, у визначенні «наземних засобів об'єктивного контролю польотів державної авіації» зазначено, що вони є системами автоматичної реєстрації параметричної інформації та потоків цифрової інформації, що циркулює на об'єкті [13]. Таким чином, у контексті наведеного вище, можна зробити висновок, про те що параметрична інформація – це інформація, що циркулює на повітряних суднах та реєструється бортовими реєстраторами та системами автоматизованої реєстрації засобів об'єктивного контролю. Використовуючи метод індукції сформулюємо, в системі випробувань, визначення *параметричної інформації ОВТ* – вимірювані та обчислювальні характеристики ОВТ, що отримуються під час випробувань і використовуються для оцінювання відповідності виробу встановленим технічним вимогам.

В умовах повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну потреба у зразках озброєння та воєнного техніки зростає, тому постає проблема

підвищення оперативності проведення випробувань таких зразків. Це прямо залежить від зростаючого обсягу та складності даних про сучасні зразки ОВТ, недосконалості існуючого програмного забезпечення, відсутності систематизованих баз даних, наявного застарілого вимірювального обладнання, відсутності автоматизованих систем обробки та сучасних методик

проведення тестувань. Наслідком є значні часові та трудові витрати, зменшення достовірності результатів випробувань та уповільнення процесу прийняття рішень. Тому формалізація процесу автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань ОВТ є важливим науковим завданням.



Рисунок 1 – Етапи проведення випробувань

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань ОВТ перебуває на перетині декількох наукових напрямків та активно досліджується як у вітчизняній так і в міжнародній практиці. Національні стандарти України, зокрема ДСТУ 3021-95 [1] та ДСТУ В 15.210:2023 [2], визначають основні категорії та організаційні ознаки проведення випробувань військової техніки. ДСТУ ISO/IEC 17000:2021 [3] встановлює функційний підхід до оцінювання відповідності, що є основою для побудови сучасних систем випробувань. На міжнародному рівні Міністерство оборони США у грудні 2024 року оновило ключові документи DoDI 5000.98 [4] та DoDM 5000.100 [5], які регламентують використання науково обґрунтованих методів, цифрової інженерії та автоматизації у процесах випробувань та оцінювання. Ці документи наголошують на необхідності максимальної автоматизації конвеєрів даних, впровадження систем управління даними випробувань та використання штучного інтелекту для верифікації та валідації компонентів систем протягом їх життєвого циклу [4; 5]. Сучасні дослідження демонструють значний прогрес у автоматизації процесів випробувань: Arga of Engineers [6] обґрунтував можливість скорочення часу ручного тестування на 80% шляхом впровадження автоматизованих наборів тестів для наземних військових транспортних засобів, зокрема для бронемашин MRAP армії США, компанії Rohde & Schwarz [7] та IB-Lenhardt AG [8] розробили

комплексні рішення для автоматизованого тестування військових радіокомунікаційних систем згідно міжнародних стандартів, що забезпечують високу точність вимірювань та можливість паралельного тестування декількох радіостанцій одночасно, Eurofins MET Labs [9] впроваджує передові технології автоматизації програмного забезпечення для випробувань згідно MIL-STD специфікацій, що значно прискорює процес від розробки до експлуатації виробів, National Instruments [10] та Astronics Test Systems [11] пропонують програмно-визначене вимірювальне обладнання, що дозволяє користувачам самостійно налаштовувати функціональність систем на відміну від традиційного обладнання з фіксованими можливостями [10; 11].

Таким чином, незважаючи на активний розвиток технологій автоматизації випробувань, інтелектуального аналізу даних та систем підтримки прийняття рішень, залишається актуальною потреба у розробленні комплексного методу автоматизації обробки параметричної інформації, що інтегрує передові аналітичні підходи, забезпечує гнучкість та адаптивність процесу випробувань, формалізує процедури вибору оптимальних методів аналізу та підтримує прийняття обґрунтованих рішень щодо зразків ОВТ з дотриманням принципу людського контролю.

Метою статті є розроблення операторного методу автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань ОВТ для підвищення оперативності та забезпечення ефективного використання наявних ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Забезпечення ефективного використання наявних ресурсів для проведення випробувань та підвищення оперативності їх виконання потребує автоматизації обробки параметричної інформації, що передбачає перетворення вхідних даних випробувань у кінцеві

аналітичні продукти (звіти, протоколи, акти) потрібні для прийняття рішень стосовно зразка ОБТ [14]. Кожний етап проведення випробувань доцільно формалізувати послідовною композицією операторів (рис. 2), що трансформують стан автоматизованої системи обробки параметричної інформації (далі – АСОП).

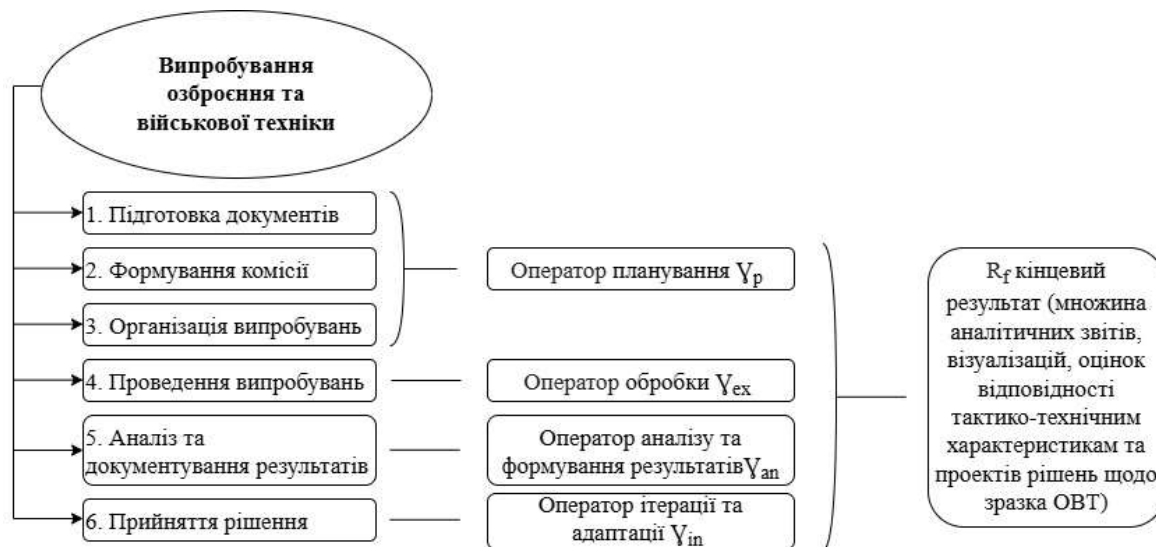


Рисунок 2 – Процес формалізації етапів випробувань

Процес випробувань можна представити композицією операторів, які описують кожний етап випробувань наступним виразом:

$$R_f = Y_p \circ Y_{ex} \circ Y_{an} \circ Y_{in}, \quad (1)$$

де R_f – множина аналітичних звітів, візуалізацій, оцінок відповідності тактико-технічним характеристикам та проектів рішень щодо зразка ОБТ;

Y_p – оператор планування, що визначає початкову конфігурацію системи на основі вхідних даних про конкретне випробування S_{iz} ;

Y_{ex} – оператор обробки реалізує процеси збору первинних даних їх попередню обробку (фільтрацію, нормалізацію) та завантаження в базу даних X .

Y_{an} – оператор аналізу та формування результатів, який застосовує обрані методи (байєсівські, нечіткої логіки, статистичні та ін.) для перетворення оброблених даних на аналітичні висновки [15].

Y_{in} – оператор ітерації та адаптації забезпечує циклічний зворотний зв'язок у системі, дозволяючи коригувати завдання, ініціювати повторний аналіз або адаптувати моделі на основі отриманих результатів [15].

◦ – знак композиції функцій, що означає їх послідовне застосування.

Для досягнення кінцевого результату у вигляді множини кінцевих аналітичних продуктів R_f потрібно забезпечити системний підхід до організації процесу випробувань. Цей результат не може бути отриманий без чіткої формалізації початкових умов та параметрів

функціонування автоматизованої системи обробки параметричної інформації.

Початковою точкою для генерації кінцевих аналітичних продуктів R_f є формалізований опис стану АСОП на момент ініціювання випробувань. Саме тому виникає потреба у використанні математичної моделі S_{iz} , яка описує стан автоматизованої системи обробки у вигляді кортежу з одинадцяти компонентів і формалізує всі елементи етапів випробувань та взаємозв'язки між ними перед початком випробування. Ця модель встановлює вихідну конфігурацію системи, визначає склад ресурсів, розподіл завдань, інфраструктурні параметри та правила взаємодії компонентів, що є необхідною передумовою для коректного застосування послідовної композиції операторів обробки інформації та отримання достовірних результатів.

Отже, модель S_{iz} виступає як формалізована основа, що детермінує початковий стан системи і забезпечує можливість її цілеспрямованої трансформації через етапи планування, обробки, аналізу та ітерації до кінцевого результату у вигляді R_f . Стан автоматизованої системи обробки, що описується математичною моделлю, яка формалізує всі елементи етапів випробувань та взаємозв'язки між ними перед початком випробування описується виразом [16]:

$$S_{iz} = \{ \{K\}, \{X\}, \{C\}, \{I\}, \{ST, \Lambda, \{M_k\}, G, H, S \}, \quad (2)$$

де $\{K\}$ – множина завдань випробувань;

$\{X\}$ – множина сховищ даних;

$\{C\}$ – множина вузлів мережі;

$\{J\}$ – множина користувачів;
 $\{I\}$ – множина системних застосунків;
 ST – кортеж параметрів завдань (матриці N , R , D , W_k), що використовується для проведення випробування T та складається з наступних елементів:
 N – матриця потреби користувачів у виконанні завдань;
 R – матриця використання сховищ даних;
 D – матриця використання системних застосунків;

W_k – матриця послідовності використання застосунків;
 Λ – матриця інтенсивності потоку запитів;
 $\{M_k\}$ – множина обсягів даних;
 G – матриця розміщення системних застосунків;
 H – матриця розподілу користувачів;
 S – матриця розміщення сховищ даних.
Застосування операторного методу автоматизації здійснюється у чотири послідовні етапи, наведені на рис. 3.

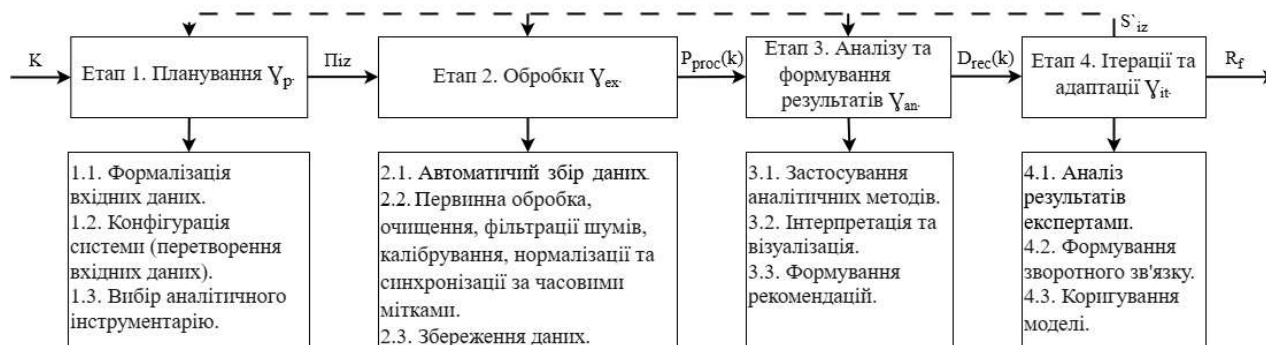


Рисунок 3 – Етапи операторного методу автоматизації випробувань

Етап 1. Планування Y_p .

На цьому етапі відбувається підготовка АСОП до конкретного випробування формуються програма і методики випробувань та виконуються наступні завдання:

1.1 Формалізація вхідних даних.

Відповідно від типу випробувань та виду озброєння чи військової техніки, які підлягають перевірці для формування програми випробувань визначаються елементи множин математичної моделі S_{iz} :

переліку завдань випробувань $\{K\}$;

склад випробувальної бригади та інших залучених фахівців $\{J\}$;

переліку програмних модулів $\{I\}$, що будуть використовуватись (модулі збору, обробки, аналізу тощо).

склад апаратної інфраструктури (вузлів) $\{C\}$ та баз даних $\{X\}$.

1.2 Конфігурація системи (перетворення вхідних даних).

На основі визначених вхідних множин з пункту 1.1 відбувається їх перетворення у вихідні матриці з булевими змінними. Враховуючи те, що кортеж параметрів завдань містить наступні величини:

$$ST = \langle N, R, D, \{W_k \mid k \in \overline{1, K}\} \rangle, \quad (3)$$

то їх функції формуються наступним чином:

1.2.1 Функція визначення кількості користувачів – ψ_2 . Вказує скільки користувачів з множини $\{J\}$ потрібно задіяти для виконання конкретних завдань з множини $\{K\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_1: \{J\} \times \{K\} \rightarrow N, \quad (4)$$

де N – потреби користувачів для виконання завдань випробувань;

1.2.2 Функція використання сховищ даних – ψ_3 . Визначає потребу задіяння сховищ даних (СД) з множини $\{X\}$ під час обробки інформації для виконання завдань з множини $\{K\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_2: \{K\} \times \{X\} \rightarrow R, \quad (5)$$

де R – потреби у сховищах даних, які використовуються при виконанні завдання випробувань;

1.2.3 Функція використання системних застосунків (СЗ) – ψ_4 . Визначає необхідну кількість СЗ з множини $\{I\}$ для обробки даних, пов'язаних із виконанням завдань з множини $\{K\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_3: \{K\} \times \{I\} \rightarrow D, \quad (6)$$

де D – потреби системних застосунків, які використовуються при виконанні завдання випробувань;

1.2.4 Функція формування послідовності запуску СЗ – ψ_5 . Визначає оптимальний порядок використання системних застосунків з множини $\{I\}$, пов'язаних із виконанням завдань з множини $\{K\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_4: \{I\} \times \{I\} \rightarrow W_k, \quad (7)$$

де W_k – послідовності використання системних застосунків для виконання завдань випробувань;

1.2.5 Функція формування потоку запитів – ψ_1 . Визначає кореляцію завдань випробувань з множини $\{K\}$ із запитом користувачів з множини $\{J\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_5: \{K\} \times \{J\} \rightarrow \Lambda, \quad (8)$$

де Λ – інтенсивності потоку запитів від користувачів на виконання завдань випробування;

1.2.6 Функція обміну даними між СЗ – ψ_6 . Регулює порядок передачі інформації між системними застосунками з множини $\{I\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_6: \{I\} \times \{I\} \rightarrow B_k, \quad (9)$$

де B_k – обсяг даних, яким обмінюються системні застосунки між собою;

1.2.7 Функція обміну даними між СЗ та СД – ψ_7 . Регулює порядок передачі інформації між сховищами даних з множини $\{X\}$ та системними застосунками з множини $\{I\}$ та визначається за виразом:

$$\psi_7: \{I\} \times \{X\} \rightarrow V_k, \quad (10)$$

де V_k – обсяг даних, яким обмінюються системні застосунки з сховищем даних;

M_k – обсяг даних, яким обмінюються системні застосунки між собою (B_k) та сховищами даних (V_k):

$$M_{ki} = \{v_{kix}, b_{kim}\} \quad (11)$$

1.2.8 Функція розміщення користувачів – ψ_8 . Визначає на яких обчислювальних вузлах (робочих місцях) з множини $\{C\}$ будуть розміщені користувачі з множини $\{J\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_8: \{J\} \times \{C\} \rightarrow H, \quad (12)$$

де H – розподілу користувачів між вузлами;

1.2.9 Функція розміщення сховищ даних – ψ_9 . Визначає на яких обчислювальних вузлах (робочих місцях) з множини $\{C\}$ будуть розміщені сховища даних з множини $\{X\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_9: \{X\} \times \{C\} \rightarrow S, \quad (13)$$

де S – розміщення сховищ даних на вузлах;

1.2.10 Функція розміщення системних застосунків – ψ_{10} . Призначає системні застосунки з множини $\{J\}$ до відповідних обчислювальних вузлів (робочих місць) з множини $\{C\}$ та описується наступною формулою:

$$\psi_{10}: \{I\} \times \{C\} \rightarrow G, \quad (14)$$

де G – розміщення системних застосунків на вузлах.

Формування функцій перетворення вхідних множин у вихідні матриці з булевими змінними в автоматизованій системі наведену на рис. 4.

1.3. Вибір аналітичного інструментарію.

На основі аналізу, проведеного в попередніх дослідженнях [17] та специфіки поточного завдання випробувань обирається оптимальний набір методів обробки, що формують методику випробувань M_{set} .

Розроблений формалізований порядок вибору аналітичного інструментарію, дозволить сформувати гібридну аналітичну модель для кожного конкретного завдання випробувань який ґрунтуватиметься на багатофакторному аналізі специфіки завдання випробувань та кількісному оцінюванні доцільності застосування методологічних підходів проаналізованих у попередніх дослідженнях з наступною послідовністю виконання:

Крок 1. Аналіз характеристик завдання випробувань

Експертна група до якої входять керівник випробувань спільно з провідними спеціалістами по

напрямам випробувань (з множини користувачів $\{J\}$) аналізує поточні завдання випробувань $k \in \{K\}$ та проводить декомпозицію за п'ятьма ключовими критеріями, що були ідентифіковані як визначальні в ході попереднього аналізу. Відбувається аналіз очікуваних даних, нормативних вимог та цілей перевірки. Результатом якої є заповнення протоколу аналізу, де фіксуються характеристики завдання за п'ятьма визначеними критеріями: невизначеність та обсяг вибірки (C_U) оцінює ступінь невизначеності даних та обмеженість вибірки, що є характерним для випробувань нових зразків ОБТ; характер вимог (C_Q) визначає частку якісних, лінгвістичних та експертних вимог у технічному завданні, які потребують формалізації; обсяг та швидкість даних (C_V) оцінює потенційний обсяг та швидкість надходження параметричної інформації (наприклад, від телеметричних систем); динаміка процесів (C_T) аналізує важливість часових залежностей, трендів та сезонності в даних, що відображають динамічні процеси; специфіка задачі (C_S) ідентифікує наявність специфічних завдань, таких як розпізнавання образів (обробка відео), аналіз звуку або інших неструктурованих даних.

Крок 2. Експертне оцінювання релевантності критеріїв

Для кожного критерію $c_i \in \{C_U, C_Q, C_V, C_T, C_S\}$ експерти встановлюють коефіцієнт релевантності $e_i(k) \in [0, 1]$, де 0 означає повну не важливість критерію для поточного завдання k , а 1 – максимальну важливість.

Крок 3. Розрахунок вагових коефіцієнтів застосування методів

На основі експертних оцінок здійснюється автоматизований розрахунок вагових коефіцієнтів $w_m(k)$, що забезпечує об'єктивність у процесі підбору аналітичних інструментів та перетворює експертні оцінки характеристик завдання на кількісні показники доцільності застосування кожного методу m з множини доступних методів

$$M_{set} = \{M_{Bayes}, M_{Fuzzy}, M_{BigData}, M_{TS}, M_{DL}\}, \quad (15)$$

Розрахунок базується на попередньо встановленій відповідності між критеріями та методами, коли для кожного методу система бере експертні оцінки тільки тих критеріїв, з якими цей метод корелюється (в матриці відповідності Φ стоїть 1), і підсумовує їх.

Крок 4. Формування гібридної аналітичної моделі

На основі розрахованих вагових коефіцієнтів $w_m(k)$ формується конфігурація аналітичної системи для обробки даних завдання k .

Експертним рішенням на етапі налаштування та впровадження автоматизованої системи обробки параметричної інформації визначаються значення порогу високої впевненості θ_{core} перевищення якого означає, що характеристики завдання випробувань відповідають ключовим перевагам даного аналітичного методу, а метод стає основою аналізу та поріг мінімальної доцільності θ_{aux} , що відсіює методи, які є нерелевантними для поточного завдання, щоб не витратити на них обчислювальні ресурси.

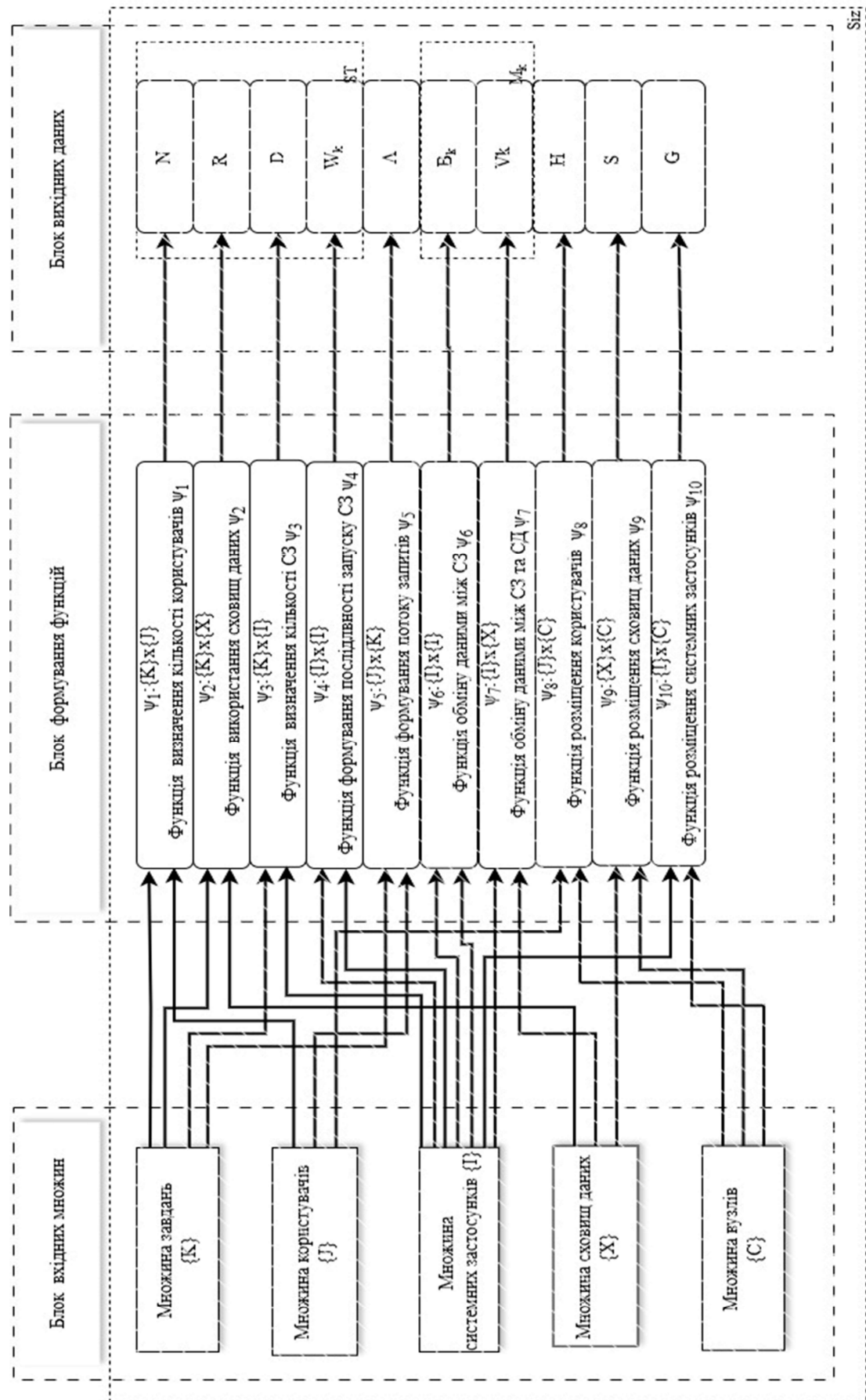


Рисунок 4 – Схема формування функцій перетворення вхідних множин у вихідні дані в автоматизованій системі обробки інформації

Методи з найвищими ваговими коефіцієнтами, що перевищують порогові значення θ_{core} , формують ядро аналітичної системи.

Методи, вагові коефіцієнти яких не досягли рівня ядра, але перевищують мінімальний поріг значущості θ_{aux} , інтегруються як допоміжні спеціалізовані модулі.

Методи з вагою нижче θ_{aux} для поточного завдання не застосовуються.

Фактори, що впливають на вибір значень порогів залежать від кількох чинників:

1. Критичність випробувань, що визначається стратегічною важливістю зразків ОБТ та гарантує застосування перевірених та надійних методів з порогом θ_{core} вище 0.8;

2. Наявність ресурсів з обмеженими обчислювальними потужностями або часом та для скорочення кількості допоміжних аналізів поріг θ_{aux} може бути підвищено;

3. Накопиченого досвіду після проведення аналізу серії випробувань шляхом емпіричного коригування методів при яких значеннях $w_m(k)$ давали найбільш достовірні результати та відповідно уточнювали порогові значення θ_{core} та θ_{aux} .

У практиці впровадження подібних систем, початкові порогові значення θ_{core} та θ_{aux} встановлюються на основі загальноприйнятих практик:

θ_{core} встановлюється в діапазоні [0.7, 0.8], що відповідає 70-80% ключових вимог завдання, щоб вважатися основним;

θ_{aux} встановлюється в діапазоні [0.3, 0.4], дозволяє залучати методи, які мають часткову релевантність та відсікти ті, що є очевидно недоцільними.

Цей підхід дозволяє системі бути гнучкою та адаптувати вибір інструментів на основі параметрів, встановлених досвідченими фахівцями, що повністю відповідає ідеї гібридної архітектури.

Процес вибору оптимального набору аналітичних інструментів (A_{opt}) гібридної архітектури для завдання k можна формалізувати за виразами:

$$A_{opt}(k) = \{(m, R_m) \mid w_m(k) \geq \theta_{aux}, m \in M_{set}\}, \quad (16)$$

$$w_m(k) = \sum_{i=1}^{|C|} e_i(k) \times \Phi(m, c_i), \quad (17)$$

де $A_{opt}(k)$ – оптимальна конфігурація аналітичних інструментів для завдання k . Являє собою множину пар (m, R_m) , де m – обраний метод, а R_m – його роль у системі;

k – конкретне завдання випробувань з множини $\{K\}$;

M_{set} – множина доступних методологічних підходів $\{M_{Bayes}, M_{Fuzzy}, M_{BigData}, M_{TS}, M_{DL}\}$;

$w_m(k)$ – ваговий коефіцієнт застосовності методу m для завдання k ;

C – множина критеріїв оцінювання $\{C_U, C_Q, C_V, C_T, C_S\}$;

$e_i(k)$ – експертна оцінка релевантності i -го критерію для завдання k , $e_i(k) \in [0, 1]$;

$\Phi(m, c_i)$ – матриця відповідності з булевими змінними, що відображає зв'язок між методами та критеріями. $\Phi(m, c_i) = 1$, якщо метод m є пріоритетним

для вирішення задач, що характеризуються критерієм c_i , та $\Phi(m, c_i) = 0$ в іншому випадку. Ця матриця є формалізацією результатів порівняльного аналізу.

R_m – роль методу в гібридній системі визначається умовно:

$$R_m = \begin{cases} \text{Ядро системи, якщо } w_m(k) \geq \theta_{core} \\ \text{Допоміжний модуль, якщо } \theta_{aux} \leq w_m(k) < \theta_{aux}' \end{cases} \quad (18)$$

де $\theta_{core}, \theta_{aux}$ – порогові значення значущості для визначення ролі методу.

Система використовує введені експертні оцінки $e_i(k)$ та закладену в її базу знань матрицю відповідності $\Phi(m, c_i)$, що дає змогу зробити вибір об'єктивним і перейти від якісних міркувань до кількісно обгрунтованого рішення.

На основі порівняння отриманих вагових коефіцієнтів $w_m(k)$ з граничними значеннями θ_{core} та θ_{aux} система автоматично генерує рекомендовану аналітичну гібридну архітектуру.

Цей підхід забезпечує гнучкість, адаптивність та обгрунтованість вибору аналітичного інструментарію для кожного унікального завдання випробувань та формує методику випробувань.

Виконання першого етапу визначення оператора планування Υ_p дає змогу сформулювати програму і методику випробувань Π_{iz} , що формалізується виразом:

$$\Upsilon_p: S_{iz} \times M_{set} \rightarrow \Pi_{iz}. \quad (19)$$

Етап 2. Обробка Υ_{ex} .

На цьому етапі в Модулі збору та Модулі обробки АСОПІ реалізується автоматизований збір і підготовку даних та виконуються наступні завдання:

2.1. Автоматичний збір даних. Збір даних виконується завдяки активації системних застосунків з множини $\{I\}$, відповідальних за збір інформації. Первинні дані від різноманітних джерел (датчиків і сенсорів, телеметричних та вимірювальних систем, метеостанцій) автоматично отримуються та реєструються в Модулі збору для конкретного завдання випробування k з множини $\{K\}$ та використовує конфігурацію системи, визначену на етапі планування. Активация відповідних програмних засобів та реєстрація первинної інформації виконується послідовно та передбачає наступні кроки.

Крок 1. Ідентифікація потрібних системних застосунків

Після запуску завдання випробувань k , потрібно звернутися до матриці потреб у системних застосунках $D = \{d_{ki}\}$, елементами якої позначають:

$d_{ki} = 1$ – потрібно використовувати i -й СЗ, під час виконання завдання k ;

$d_{ki} = 0$ – СЗ не використовується.

Таким чином завдяки матриці D формується підмножина СЗ $I_k \subset I$, при цьому I_k містить всі СЗ $i \in I$ для яких елемент матриці $d_{ki} = 1$.

Крок 2. Визначення місця розташування СЗ

Для визначення розташування i -го СЗ з визначеної підмножини I_k потрібно звертається до матриці

розміщення СЗ $G=||g_{ic}||$, що дає змогу однозначно ідентифікувати апаратний вузол $c_i \in C$ (сервер, вимірювальний комплекс, АРМ), на якому встановлено потрібний програмний модуль для подальшого надсилання команд на активацію.

Крок 3. Активація СЗ та ініціалізація збору даних

Модуль збору автоматизованої системи обробки параметричної інформації надсилає команди активації α на відповідні вузли c_i для запуску СЗ $i \in I_k$. Активовані СЗ ініціюють з'єднання з відповідними джерелами даних:

- вбудовані датчики ОВТ;
- зовнішні вимірювальні комплекси;
- телеметричні системи;
- метеостанції;
- системи відео- та аудіо фіксації;
- та інші.

Крок 4. Реєстрація та передача даних

Після активації СЗ починають процес безперервного або періодичного збору даних. Кожен запис супроводжується синхронізованою часовою міткою та ідентифікатором джерела. Виконується первинна валідація (перевірка) даних для виявлення явних помилок (вихід значень за допустимі межі). Сформований потік необроблених параметричних даних $P_{raw}(k)$ передається на вхід Модуля обробки для подальшої фільтрації та нормалізації. Процес автоматизованого збору необроблених параметричних даних $P_{raw}(k)$ для завдання випробувань k можна формалізувати як результат застосування оператора збору $F_{collect}$:

$$P_{raw}(k) = F_{collect}(k, D, G) = \bigcup_{i \in I_k} \Delta(i, c_i), \quad (20)$$

де $P_{raw}(k)$ – множина необроблених параметричних даних, зібраних під час виконання завдання k .

$F_{collect}$ – оператор автоматизованого збору, що описує весь процес від ідентифікації до реєстрації даних.

k – ідентифікатор завдання випробувань з множини $\{K\}$.

D, G – матриці конфігурації з математичної моделі S_{iz} , що визначають, які СЗ з множини D потрібні для виконання завдання k і де вони розташовані у множині G .

I_k – підмножина системних застосунків, відповідальних за збір даних для виконання завдання k . Формально визначається як:

$I_k = \{i \in I | d_{ki} = 1\}$, де d_{ki} – елемент матриці D .

c_i – апаратний вузол на якому розміщено застосунок i . Формально визначається як:

$c_i = c \in C | g_{ic} = 1$, де g_{ic} – елемент матриці G .

$\Delta(i, c_i)$ – функція збору даних, що виконується застосунком i на вузлі c_i . Функція збору даних активує процес з'єднання джерела реєстрації даних з часовими мітками та їх первинна валідації.

$\bigcup$ – операція об'єднання, що символізує агрегацію всіх потоків даних від усіх задіяних застосунків у єдиний масив необроблених даних $P_{raw}(k)$.

2.2. Первинна обробка. В Модулі обробки над первинними (необробленими) даними виконуються

процедури очищення, фільтрації шумів, калібрування, нормалізації та синхронізації за часовими мітками.

Після отримання масиву первинних даних $P_{raw}(k)$ від Модуля збору, Модуль обробки послідовно застосовує перелік засобів для перетворення необробленої інформації у структурований, достовірний та готовий для аналізу набір даних. Порядок виконання процедур очищення, фільтрації шумів, калібрування, нормалізації та синхронізації за часовими мітками наступний:

Крок 1. Синхронізація за часовими мітками

Система узгоджує всі часові мітки даних, що надходять від різномірних, розміщених на різних вузлах розподілених джерел (датчиків, телеметричних вимірювальних систем, метеостанцій) за єдиним еталонним часом. Цей крок дозволяє коректно порівнювати та аналізувати взаємозв'язки між різними параметрами, які вимірюються одночасно.

Крок 2. Калібрування даних

На цьому кроці необроблені дані, часто представлені у вигляді електричних сигналів (наприклад, напруги або струму), перетворюються у фізичні величини (температура, тиск, прискорення тощо). Система автоматично застосовує до кожного потоку даних відповідні калібрувальні коефіцієнти або функції, які зберігаються у нормативно-довідковій базі даних. Це забезпечує відповідність вимірюваних значень реальним фізичним параметрам.

Крок 3. Фільтрація шумів

Дані, отримані в реальних умовах випробувань, неминує містити шуми та спотворення, спричинені електромагнітними завадами, вібраціями або недосконалістю вимірювальної апаратури. Модуль обробки застосовує цифрові методи фільтрації (наприклад, фільтри низьких частот, ковзне середнє, вейвлет-перетворення) для усунення високочастотного шуму та виділення корисного сигналу.

Крок 4. Очищення та обробка аномалій

Після фільтрації шуму система проводить пошук та обробку аномальних значень – різких викидів або пропущених даних. Застосовуються статистичні методи для ідентифікації значень, що виходять за межі очікуваного діапазону. Виявлені аномалії можуть бути видалені або скориговані за допомогою методів інтерполяції, що підвищує загальну достовірність даних.

Крок 5. Нормалізація даних

На завершальному етапі первинної обробки очищені та відкалібровані дані приводяться до єдиного стандартного діапазону (наприклад, від 0 до 1). Нормалізація є необхідною для коректної роботи багатьох алгоритмів аналізу та дає змогу порівнювати параметри, що мають різні одиниці вимірювання та масштаби значень.

Процес первинної обробки можна представити як композицію функцій, що послідовно застосовуються до вхідного масиву необроблених даних $P_{raw}(k)$. Результатом є масив оброблених даних $P_{proc}(k)$, готовий для передачі до Модуля аналізу.

$$P_{proc}(k) = F_{sync}(P_{raw}(k)) \circ F_{cal} \circ F_{filter} \circ F_{clean} \circ F_{norm}, \quad (21)$$

де $P_{proc}(k)$ – вихідний масив оброблених даних для завдання k . Це структуровані, очищені та готові до аналізу дані, що є вихідним продуктом Модуля обробки;

$P_{raw}(k)$ – вхідний масив первинних (необроблених) даних, отриманих від Модуля збору;

◦ – знак композиції функцій означає їх послідовне застосування (результат однієї операції є вхідними даними для наступної);

F_{sync} – оператор синхронізації приймає набір даних з різними часовими мітками та повертає часово-узгоджений набір;

F_{cal} – оператор калібрування застосовує до кожного значення відповідну калібрувальну функцію $f_{cal}(s)$ на основі ідентифікатора джерела s ;

F_{filter} – оператор фільтрації застосовує до даних цифрові фільтри для усунення шумів;

F_{clean} – оператор очищення ідентифікує та обробляє аномальні значення (викиди, пропуски) у відфільтрованих даних;

F_{norm} – оператор нормалізації масштабує очищені дані до заданого стандартного діапазону.

Розроблений порядок та його формалізований вираз безпосередньо впливають із завдань Модуля обробки і забезпечують логічний перехід від етапу збору даних до етапу аналізу.

2.3 Збереження даних. Очищені та структуровані дані завантажуються до Модуля баз даних для забезпечення їх цілісності, доступності та безпеки. Порядок збереження виконується наступними кроками:

Крок 1. Приймання та валідація (перевірка) даних

Модуль бази даних отримує пакет оброблених даних $P_{proc}(k)$ перевіряє повноту пакету, коректність структури та відсутність явних помилок, що могли виникнути під час передачі.

Крок 2. Збагачення метаданими

Кожен набір даних, що зберігається $P_{proc}(k)$ збагачується метаданими для полегшення їх подальшого пошуку та аналізу. До основних метаданих належать:

ідентифікатор випробування та завдання (наприклад, ID_test_001, task_k);

тип та шифр зразка ОБТ;

дата та точний час проведення випробування;

умови випробувань (метеорологічні, географічні тощо);

версія застосованих методик обробки.

Крок 3. Транзакційне збереження даних

Дані разом з метаданими записуються до відповідних сховищ ідентифікованих у матриці $S=|s_{xc}|$ з математичної моделі. Процес збереження відбувається в рамках транзакції. Це означає, що весь пакет даних або зберігається повністю, або, у випадку збою, операція повністю скасовується, що гарантує цілісність та несуперечність даних у базі.

Крок 4. Індексція та забезпечення доступності

Після успішного збереження, система створює або оновлює індекси для записаних даних. Індексція дозволяє значно прискорити майбутні запити до бази даних під час виконання аналітичних завдань. Модуль бази даних забезпечує авторизований доступ до цієї інформації для визначеного кола користувачів: від аналітиків та інженерів до керівництва випробувань та представників замовника.

Крок 5. Резервне копіювання та безпека

Для забезпечення довготривалого зберігання та захисту від втрати даних, система автоматично виконує процедури резервного копіювання. Крім того, застосовуються механізми контролю доступу та шифрування для забезпечення безпеки та конфіденційності інформації. Процес збереження даних можна представити як застосування оператора збереження F_{store} до масиву оброблених даних, результатом якого є оновлений стан бази даних DB_{state} .

$$DB_{statenew} = F_{store}(P_{proc}(k), MD_k, X_k); \quad (22)$$

$$F_{store} = F_{val} \circ F_{meta} \circ T_{commit}, \quad (23)$$

де $DB_{statenew}$ – новий стан бази даних після успішного збереження інформації по завданню k ;

F_{store} – комплексний оператор збереження, що являє собою композицію (послідовне виконання) функцій валідації (перевірки), збагачення метаданими та транзакційного збереження;

$P_{proc}(k)$ – вхідний масив оброблених даних отриманий від Модуля обробки;

MD_k – набір метаданих асоційованих із завданням k (тип зразка, умови, час тощо);

X_k – цільове сховище даних з множини $\{X\}$, де будуть збережені дані;

F_{val} – оператор валідації (перевірки) перевіряє цілісність та коректність формату $P_{proc}(k)$;

F_{meta} – оператор збагачення метаданими об'єднує дані $P_{proc}(k)$ з їх контекстом MD_k ;

T_{commit} – оператор транзакційного збереження, що виконує запис збагачених даних до сховища X_k та гарантує, що дані будуть або повністю збережені, або операцію буде скасована.

Результатом виконання етапу обробки є збереження F_{store} оброблених первинних параметричних даних про результати випробувань $P_{proc}(k)$ синхронізованих за часом F_{sync} , відкаліброваних з допомогою функцій у реальні фізичні величини F_{cal} , відфільтрованих від шумів та завад, які виникли під дією різних засобів використовуючи цифрові засоби фільтрації F_{filter} , очищених від аномальних викидів та доповнених втраченими значеннями параметрів F_{clean} , нормалізованих до єдиного стандартного діапазону даних з однаковими одиницями вимірювання та масштабами значень F_{norm} та збагачених інформацією для полегшення пошуку та каталогізації до бази даних, що формалізовано виразом:

$$Y_{ex} = F_{sync} \circ F_{cal} \circ F_{filter} \circ F_{clean} \circ F_{norm} \circ F_{store} \rightarrow P_{proc}(k) \quad (24)$$

Етап 3. Аналіз і формування результатів Y_{an} .

На цьому етапі реалізуються функції Модуля аналізу і Модуля прийняття рішення АСОПІ та виконуються наступні завдання.

3.1 Застосування аналітичних методів.

Після первинної обробки та збереження розпочинається процес перетворення даних на знання в Модулі аналізу використовуючи конфігурацію аналітичних інструментів $A_{opt}(k)$ обрану на етапі планування у наступній послідовності:

Крок 1. Вибірка даних та контексту

Модуль аналізу надсилає запит до Модуля бази даних для отримання необхідної інформації:

1. Оброблений набір даних $P_{proc}(k)$ для поточного завдання k ;

2. Контекстні та довідкові дані DB_{ref} , що включають:

нормативні вимоги та тактико-технічні характеристики (далі – ТТХ) для зразка ОБТ;
історичні дані з попередніх випробувань аналогічних зразків;
експертні знання.

Крок 2. Застосування основного аналітичного ядра

Система активує методи, визначені як «Ядро системи» в конфігурації $A_{opt}(k)$ відповідно п.1.3:

Байєсівський аналіз M_{bayes} застосовується для роботи в умовах невизначеності та з обмеженими вибірками даних. Модель оновлює ймовірнісні оцінки параметрів ОБТ на основі отриманих даних $P_{proc}(k)$ та надає кількісну оцінку невпевненості у висновках;

Аналіз на основі нечіткої логіки M_{fuzzy} використовується для формалізації та оцінки відповідності якісним, лінгвістичним вимогам з ТТХ (наприклад, "задовільна маневреність", "висока надійність"). Система перетворює числові дані в лінгвістичні оцінки і робить висновок про ступінь відповідності.

Крок 3. Застосування допоміжних аналітичних модулів

Паралельно або послідовно з ядром, система залучає допоміжні модулі, якщо вони обрані в $A_{opt}(k)$:

Аналіз часових рядів M_{TS} досліджує динамічні параметри з $P_{proc}(k)$ для виявлення трендів, періодичних коливань та аномалій у поведінці систем ОБТ;

Обробка великих даних $M_{BIGDATA}$ використовується, якщо обсяг даних надвеликий цей модуль виконує розподілені обчислення для агрегації та виявлення патернів (невідповідностей);

Глибоке навчання M_{DL} застосовується для специфічних завдань (аналіз відеоданих для розпізнавання цілей або обробка аудіосигналів для діагностики несправностей двигуна).

Крок 4. Синтез та інтеграція результатів

На цьому кроці результати, отримані від різних аналітичних методів, інтегруються в єдину картину. Спеціальний оператор синтезу S порівнює висновки, виявляє можливі розбіжності та формує комплексний, узагальнений результат.

Процес застосування аналітичних методів можна формалізувати як дію комплексного оператора аналізу

$F_{analyze}$ на оброблені дані, результатом якої є набір аналітичних висновків $R_{anal}(k)$.

$$R_{anal}(k) = F_{analyze}(P_{proc}(k), A_{opt}(k), DB_{ref}) = S(U_{m \in A_{opt}(k)} m(P_{proc}(k), DB_{ref})), \quad (25)$$

де $R_{anal}(k)$ – множина аналітичних результатів для завдання k , що включає кількісні оцінки параметрів, їхні ймовірнісні розподіли, виявлені тенденції, аномалії та оцінки відповідності ТТХ;

$F_{analyze}$ – комплексний оператор аналізу, що описує весь процес від вибірки даних до синтезу результатів;

$P_{proc}(k)$ – масив оброблених даних, що є основним об'єктом аналізу;

$A_{opt}(k)$ – оптимальна конфігурація аналітичних методів, визначена на етапі планування. Кожен елемент m у цій множині є функцією-методом.

DB_{ref} – контекстні та довідкові дані з бази даних, що використовуються як основа для порівняння та оцінки (ТТХ, історичні дані);

S – оператор синтезу інтегрує та узагальнює розрізнені аналітичні висновки в єдиний, узгоджений результат;

U_m – функція об'єднання, що характеризує збір результатів від усіх задіяних аналітичних модулів;

$m(P_{proc}(k), DB_{ref})$ – застосування конкретного аналітичного методу m до оброблених даних з урахуванням довідкової інформації.

Цей порядок забезпечує гнучке та методологічно обґрунтоване застосування аналітичних інструментів для кожного конкретного завдання випробувань, спираючись на висновки.

3.2 Інтерпретація та візуалізація. Результати аналізу (виявлені тенденції, аномалії, кореляції) перетворюються на дієві візуальні продукти: аналітичні звіти, графіки, діаграми, інформаційні панелі (дашборд – це інформаційна панель, яка збирає та візуально представляє важливі дані в одному місці).

Після отримання масиву аналітичних результатів $R_{anal}(k)$, система ініціює процес їх перетворення у людино-зрозумілу форму для ефективного використання результатів випробувань різними категоріями користувачів $\{J\}$ – від інженерів-випробувачів до керівного складу, відповідального за прийняття рішення по результатам проведеного випробування у наступній послідовності:

Крок 1. Сегментація аналітичних результатів

Система автоматично класифікує та сегментує отримані аналітичні дані $R_{anal}(k)$ за їхнім типом та призначенням:

кількісні показники (статистичні метрики, ймовірнісні оцінки, розраховані значення параметрів);
динамічні патерни (виявлені тенденції, тренди, сезонні коливання в часових рядах);

кореляційні залежності, зв'язки між різними параметрами;

аномалії та сповіщення (ідентифіковані викиди, критичні відхилення від норми);

оцінки відповідності (результати роботи систем нечіткої логіки, що показують ступінь відповідності ТТХ).

Крок 2. Вибір оптимальних форм візуалізації

Для кожного сегменту даних система, на основі закладеної бази правил V_{rules} , обирає найбільш інформативний та наочний спосіб візуалізації, що ґрунтується на практиках представлення даних:

часові діаграми (графіки) для відображення динамічних патернів;

гістограми та діаграми розмаху для аналізу розподілу кількісних показників;

діаграми розсіювання для візуалізації кореляційних залежностей;

індикатори (світлофори, шкали) для наочного представлення оцінок відповідності;

теплові карти для відображення інтенсивності подій або значень на площині.

Крок 3. Автоматична генерація візуальних елементів та звітів

Активується модуль генерації, яка створює візуальні елементи згідно з вибором, зробленим на попередньому кроці. Одночасно формуються текстові протоколи, що автоматично описують ключові висновки (наприклад, «Виявлено статистично значуще зростання температури двигуна на 15% вище норми»).

Крок 4. Компонування інтерактивних інформаційних панелей (дашбордів)

Згенеровані візуальні елементи та текстові протоколи компонуються у фінальні продукти, адаптовані до потреб різних користувачів $\{J\}$:

для інженерів та аналітиків створюються деталізовані аналітичні звіти з повним набором графіків, таблиць та статистичних викладок;

для керівників випробувань та представників замовника формуються інтерактивні інформаційні панелі (дашборди), що відображають показники відповідності ТТХ та сповіщення про критичні аномалії, з можливістю ознайомлення з детальними даними за потреби.

Процес перетворення аналітичних результатів $R_{anal}(k)$ у фінальні візуальні продукти $O_{final}(k)$ можна описати як дію комплексного оператора візуалізації F_{viz} :

$$O_{final}(k) = F_{viz}(R_{anal}(k), J, V_{rules}) = \bigcup_{j \in J} C_j (U_{r \in R_{anal}(k)} \mathcal{G}(V_{select}(r, V_{rules}))), \quad (26)$$

де $O_{final}(k)$ – множина фінальних вихідних продуктів (набір згенерованих аналітичних звітів та інформаційних панелей) для завдання k ;

$R_{anal}(k)$ – вхідна множина аналітичних результатів отримана на попередньому кроці;

J – множина користувачів для яких адаптуються вихідні продукти;

V_{rules} – база правил візуалізації, що встановлює відповідність між типом аналітичних даних та оптимальним способом їх відображення;

r – окремий елемент аналітичного результату з множини $R_{anal}(k)$ (наприклад, конкретна тенденція або аномалія);

$V_{select}(r, V_{rules})$ – оператор вибору візуалізації, який на основі правил V_{rules} обирає найбільш доцільний тип візуалізації для елемента r ;

U_j – функція об'єднання, що символізує збір усіх фінальних продуктів (звітів або дашбордів) для конкретної ролі користувача $j \in J$;

$\mathcal{G}$ – оператор генерації, що створює конкретний візуальний елемент (графік, діаграму) на основі даних та обраного типу візуалізації;

U_r – функція об'єднання, що символізує збір усіх згенерованих візуальних елементів;

C_j – оператор компонування, що збирає візуальні елементи у фінальний продукт (звіт або дашборд), адаптований для конкретної ролі користувача $j \in J$.

Результат роботи аналітичних алгоритмів перетворюються на кінцевий продукт, що слугує вихідною інформацією для Модуля прийняття рішення, забезпечуючи таким чином наскрізний та послідовний процес обробки інформації.

3.3. Формування рекомендацій. На основі аналітичних висновків Модуль прийняття рішення генерує проекти рішень та рекомендації щодо перевірки воєнно-технічного рівня зразка ОВТ та можливості його прийняття на озброєння та допуск до експлуатації у ЗС України. Після проведення аналізу і представлених результатів у вигляді звітів та інформаційних панелей $O_{final}(k)$ Модуль прийняття рішення формує проект рішення щодо зразка ОВТ за наступними кроками:

Крок 1. Комплексна оцінка відповідності ТТХ

Виконується автоматизоване зіставлення результатів випробувань, представлених у $O_{final}(k)$, з нормативними вимогами, що зберігаються в базі даних (DB_{ref}). Оцінка проводиться за трьома напрямками:

1. Кількісна відповідність має на меті пряме порівняння вимірених числових параметрів (швидкість, точність, дальність) із заданими у ТТХ значеннями.

2. Якісна відповідність, як результат оцінки виконання якісних критеріїв ("надійність", "ергономічність").

3. Ймовірнісна оцінка для визначення ступеня впевненості у отриманих результатах та оцінки ризиків.

Крок 2. Розрахунок інтегрального показника якості

Для узагальнення результатів по десятках або сотнях параметрів, система розраховує інтегральний показник якості Q_{score} , що відображає загальний воєнно-технічний рівень зразка. Показник розраховується як зважена сума оцінок відповідності по кожному ключовому параметру, де вага параметра визначає його критичність для бойової ефективності.

Крок 3. Застосування дерева рішень

На основі розрахованого інтегрального показника Q_{score} та наявності критичних невідповідностей, система застосовує заздалегідь визначену базу правил (D_{rules}) або дерево рішень для формування основного проекту рекомендації. Типові правила якої мають вигляд:

ЯКЩО $(Q_{score} \geq \tau_{прийн})$ ТА (Критичні невідповідності = 0) ТОДІ Рекомендація = «Прийняти на озброєння».

ЯКЩО $(Q_{score} < \tau_{відх})$ АБО (Критичні невідповідності > 0) ТОДІ Рекомендація = «Відхилити (використання недоцільне)».

ЯКЩО $(\tau_{відх} \leq Q_{score} < \tau_{прийн})$ ТОДІ Рекомендація = «Направити на доопрацювання».

$\tau_{прийн}$ – поріг прийняття (верхня межа) мінімально допустиме значення Q_{score} при якому зразок вважається таким, що повністю відповідає вимогам і може бути рекомендований до прийняття на озброєння та допущений до експлуатації у ЗС України. Умова $Q_{score} < \tau_{прийн}$ означає, що зразок не дотягнув до цього рівня і має певні недоліки.

$\tau_{відх}$ – поріг відхилення (нижня межа) критичне значення Q_{score} нижче якого зразок вважається таким, що не виконав основних завдань, а його подальша модернізація є недоцільною. Умова $\tau_{відх} \leq Q_{score}$ означає, що зразок не є провальним і продемонстрував достатній потенціал, щоб уникнути повної відмови. Коли інтегральний показник якості Q_{score} потрапляє в цей діапазон, це свідчить про те, що зразок ОБТ:

має базову функціональність та відповідає мінімально прийнятному рівню;

має один або кілька суттєвих, але не критичних недоліків, які не дозволяють прийняти його на озброєння;

для цього випадку система генерує рекомендацію: «Направити на доопрацювання».

Крок 4. Генерація обґрунтування та проєктів документів

Разом з рекомендацією автоматично формується перелік конкретних параметрів та вузлів, які не відповідали вимогам і потребують покращення з боку розробника та створюються проєкти офіційних документів – актів та протоколів випробувань з даними, отриманими протягом всього процесу обробки.

Процес формування рекомендацій можна описати як дію оператора $F_{recommend}$, який на основі візуалізованих результатів та бази правил генерує фінальний об'єкт рішення $D_{rec}(k)$.

$$F_{decision} = \begin{cases} \text{Прийняти на озброєння} & \text{якщо } Q_{score} \geq \tau_{прийн} \\ \text{Направити на доопрацювання якщо} & \tau_{відхилення} \leq Q_{score} \leq \tau_{прийн} \\ \text{Відхилити якщо} & Q_{score} < \tau_{відх} \end{cases} \quad (30)$$

Результатом виконання етапу аналізу і формування результатів є:

1. Аналіз оброблених даних F_{anal} використовуючи оптимальну конфігурацію аналітичних методів, контекстні та довідкові дані з бази даних, які використовуються для порівняння та оцінки, що можна формалізувати за виразом:

$$F_{analyze} : P_{proc}(k) \times A_{opt}(k) \times DB_{ref} \rightarrow R_{anal}(k). \quad (31)$$

2. Вибір оптимальних форм візуалізації F_{viz} в залежності від класифікації, сегментації аналітичних даних і категорії користувача відповідального за прийняття рішення по результатам проведеного

$$D_{rec}(k) = F_{recommend}(O_{final}(k), DB_{ref}, D_{rules}) \quad (27)$$

де $D_{rec}(k)$ – фінальний об'єкт (структурований) висновок для завдання k , що містить основну рекомендацію «Прийняти», «Відхилити», «Доопрацювати», інтегральну оцінку Q_{score} та текстове обґрунтування з переліком невідповідностей.

$F_{recommend}$ – комплексний оператор формування рекомендацій, що моделює роботу "Модуля прийняття рішення";

$O_{final}(k)$ – вхідний набір звітів та інформаційних панелей отриманий на етапі візуалізації;

DB_{ref} – довідкові дані (нормативні вимоги з тактико-технічних характеристик), які є еталонами для порівняння;

D_{rules} – база правил прийняття рішень, що формалізує логіку на основі числових та якісних оцінок.

Внутрішня логіка оператора $F_{recommend}$ передбачає визначення інтегрального показника:

$$Q_{score} = \sum_{p \in P_{key}} w_p \times AssessCompliance(p, DB_{ref}) \quad (28)$$

де Q_{score} – інтегральний показник якості;

P_{key} – множина ключових параметрів зразка ОБТ;

w_p – ваговий коефіцієнт, що визначає важливість параметра p ;

$AssessCompliance(p, DB_{ref})$ – функція, яка визначає та нормалізує відхилення вимірюного під час випробувань параметра p від його цільового (еталонного) значення, що зберігається у базі довідкових даних DB_{ref} , що дозволяє кількісно оцінити рівень досягнення заданої тактико-технічної характеристики, де 0 означає повне невиконання вимоги, а 1 – повну або надлишкову відповідність.

Внутрішня логіка оператора $F_{recommend}$ реалізується через функцію дерева рішень $F_{decision}$ яка є ядром Модуля прийняття рішення:

$$Recommendation = F_{decision}(Q_{score}, \tau_{прийн}, \tau_{відх}), \quad (29)$$

де функція $F_{decision}$ визначається системою умов:

випробування та бази правил, яка ґрунтується на практиках представлення даних також формуються текстові протоколи, що описують ключові висновки за результатами аналізу вимірюваних параметрів зразка, що можна формалізувати за виразом:

$$F_{viz} : R_{anal}(k) \times J \times V_{rules} \rightarrow O_{final}(k). \quad (32)$$

3. Формування рекомендацій здійснюється відповідно до отриманих результатів випробувань їх візуалізації, зіставлення результатів випробувань з нормативними вимогами, розрахунку інтегрального показника якості і визначення критичних невідповідностей та використання дерева рішень для формування основного проєкту рекомендації, які формалізуються за виразом:

$$F_{\text{recom}} : O_{\text{final}}(k) \times DB_{\text{ref}} \times D_{\text{rules}} \rightarrow D_{\text{rec}}(k). \quad (33)$$

Формалізувати етап аналізу та формування результатів можна таким загальним виразом:

$$Y_{\text{an}} : F_{\text{anal}} \circ F_{\text{viz}} \circ F_{\text{recom}} \rightarrow D_{\text{rec}}(k) \quad (34)$$

Етап 4. Ітерація та адаптація Y_{it}

На цьому етапі визначається оператор Y_{it} , що реалізує циклічність і гнучкість процесу випробувань АСОП та виконуються наступні завдання:

4.1. Аналіз результатів експертами.

На цьому етапі вихідні продукти аналітичного циклу передаються провідним фахівцям випробувальної бригади для верифікації з наступним прийняттям остаточного рішення реалізуючи модель управління «human-in-the-loop» (людина в контурі), яка гарантує врахування досвіду, інтуїції і контекстуальних знань, які не завжди можуть бути повністю формалізовані та виконуються в наступна послідовностей:

Крок 1. Розгляд вихідних продуктів системи

Керівнику випробувань та експертам з множини $\{J\}$ надається доступ до створених продуктів $O_{\text{final}}(k)$:

1. Інтерактивних інформаційних панелей для швидкої оцінки загальної картини, ключових показників та критичних сповіщень;

2. Деталізованих аналітичних звітів для глибокого вивчення даних, графіків та статистичних викладок;

3. Проектів рекомендацій $D_{\text{rec}}(k)$ для ознайомлення з попередніми висновками та автоматичного генерування обґрунтувань.

Крок 2. Верифікація та критична оцінка

Експерти ознайомлюються з інформацією та проводять її оцінювання:

під час перевірки логічності аналізується відповідність висновків фізичним, технічним законам та попередньому досвіду експлуатації подібних зразків;

використовуючи інтерактивні дашборди (інформаційна панель, яка збирає та візуально представляє важливі дані в одному місці), експерти досліджують виявлені аномалії, перевіряючи пов'язані з ними часові ряди та параметри для підтвердження або спростування висновку про наявність проблеми;

визначають можливі фактори впливу та важливі аспекти поведінки зразка ОВТ під час проведення випробувань.

Крок 3. Формування експертного висновку

За результатами аналізу, експертна група формує свій висновок $V_{\text{exp}}(k)$, який може бути наступним:

1. Повне підтвердження, якщо експерти погоджуються з висновками та рекомендацією результати вважаються валідними;

2. Часткове підтвердження з коригуванням, якщо експерти в цілому згодні, але вносять уточнення, доповнення до обґрунтування або змінюють пріоритети в рекомендаціях (наприклад, змінюють перелік необхідних доопрацювань);

3. Скасування та запит на ітерацію, якщо експерти виявляють суттєві розбіжності, невраховані фактори

або вважають дані недостатніми для прийняття рішення.

Крок 4. Прийняття рішення щодо подальших дій

На основі експертного висновку приймається остаточне рішення щодо подальшого проведення випробувань, що визначає необхідність переходу до затвердження результатів або запуску ітераційного циклу.

Процес експертного аналізу можна формалізувати як дію оператора $F_{\text{expert_review}}$, що перетворює машинні висновки на верифікований експертний вердикт:

$$V_{\text{exp}}(k) = F_{\text{expert_review}}(O_{\text{final}}(k), D_{\text{rec}}(k), J_{\text{exp}}) \quad (35)$$

$$V_{\text{exp}}(k) = \langle \text{Verdict}, \text{Action} \rangle, \quad (36)$$

де $V_{\text{exp}}(k)$ – експертний висновок по завданню k є результатом роботи експертної групи;

$F_{\text{expert_review}}$ – оператор експертного аналізу, що символізує когнітивний процес верифікації, критичної оцінки та прийняття рішення експертами;

$O_{\text{final}}(k)$ – множина звітів та інформаційних панелей, що є основним джерелом інформації для експертів;

$D_{\text{rec}}(k)$ – проект системної рекомендації, що підлягає верифікації;

J_{exp} – підмножина експертів з множини $\{J\}$ відповідальних за аналіз та винесення висновку;

Verdict – категоричний вердикт експертної групи, що приймає значення з множини: {«Підтверджено», «Підтверджено з коригуванням», «Не підтверджено»}.

Action – директива для подальших дій системи, що приймає значення з множини: {«Затвердити результати», «Запустити повторний аналіз», «Сформувати завдання на додаткові випробування»}.

На цьому етапі на основі фінальних продуктів генерується директива, яка або завершує процес, або запускає ітераційний цикл зворотного зв'язку, що є ключовою особливістю гнучкості та надійності всього запропонованого операторного методу.

4.2. Формування зворотного зв'язку. На основі отриманих результатів та експертних оцінок проведених випробувань приймається рішення про повторне проведення як окремого етапу так і випробувань в цілому, що формує відповідний запит.

Опис механізму перетворення експертного висновку на запит (формування зворотного зв'язку), який активує циклічність та гнучкість операторного методу, якщо експерти не підтвердили результати повністю і сформували директиву, яка вимагає ітерації, запускається механізм зворотного зв'язку, що описується наступними кроками:

Крок 1. Отримання та інтерпретація директиви

Система отримує на вхід експертний висновок $V_{\text{exp}}(k) = \langle \text{Verdict}, \text{Action} \rangle$. Ключовим елементом якого є компонент **Action**. Процес аналізу наступний:

ЯКЩО **Action** = «Затвердити результати», ітераційний цикл не запускається, і процес обробки для завдання k успішно завершується.

ЯКЩО **Action** = «Запустити повторний аналіз» або «Сформувати завдання на додаткові випробування», то формується запит на ітерацію.

Крок 2. Формування запиту на ітерацію

На основі директиви Action та коментарів, наданих експертами генерується запит на ітерацію $Req_{iter}(k)$, що містить такі директорії:

1. Цільовий етап для повернення наприклад «етап 3. Аналіз» або «етап 1. Планування».

2. Параметри модифікації (конкретні зміни, які необхідно внести). Це може бути вимога змінити аналітичний метод в $A_{opt}(k)$, скоригувати параметри фільтрації в Модулі обробки, або додати нове завдання випробувань k_{new} до множини $\{K\}$.

Крок 3. Модифікація стану

Отримавши запит $Req_{iter}(k)$ вносяться відповідні зміни у глобальний стан системи S_{iz} або в проміжні конфігураційні об'єкти:

1. Для повторного аналізу система може змінити конфігурацію $A_{opt}(k)$ і повторно запустити Модуль аналізу для того ж набору даних $P_{proc}(k)$.

2. Для повторної обробки може змінюватися налаштування фільтрів у Модуля обробки.

3. Для необхідності проведення нових випробувань може додати нове завдання до множини $\{K\}$, для повторення циклу випробувань запускається весь цикл починаючи з «Етапу 1. Планування».

Крок 4. Запуск ітераційного циклу

Після внесення змін система повертається до вказаного в запиті цільового етапу і повторює всі наступні кроки, які реалізують зворотний зв'язок. Процес формування зворотного зв'язку можна формалізувати як дію оператора $F_{feedback}$, що перетворює вхідний експертний висновок на запит:

$$Req_{iter}(k) = F_{feedback}(V_{exp}(k)), \quad (37)$$

де $Req_{iter}(k)$ – запит на ітерацію для завдання k , що містить інструкції для системи щодо необхідних змін та точки повернення;

$F_{feedback}$ – оператор формування зворотного зв'язку, що реалізує логіку «ЯКЩО-ТОДІ» на основі експертного рішення;

$V_{exp}(k)$ – вхідний експертний висновок, отриманий на попередньому кроці.

Слід зазначити, запит на ітерацію для завдання k містить найменування етапу для продовження циклу та необхідні параметри модифікації (зміни, які треба реалізувати), що характеризується кортежем:

$$Req_{iter}(k) = \langle TargetStage, ModificationParams \rangle \quad (38)$$

де $TargetStage$ – цільовий етап для повернення, що може приймати значення з множини: $\{\langle Stage_1_Planning \rangle, \langle Stage_2_Processing \rangle, \langle Stage_3_Analysis \rangle\}$;

$ModificationParams$ – параметри модифікації набір змін, що вносяться в програму S_{iz} або методику M_{set} випробувань.

Якщо Action з $V_{exp}(k)$ дорівнює «Затвердити результати», то оператор повертає порожній запит: $Req_{iter}(k) = \emptyset$, що сигналізує про завершення циклу.

Порядок реалізацією операторного метода є гнучким та адаптованим, що закладено у принципах побудови системи [16]. Операторний метод

автоматизації описує автоматизовану систему як інструмент, що тісно взаємодіє з експертами, дозволяючи ітераційно уточнювати результати до досягнення повної достовірності та обґрунтованості.

4.3. Коригування моделі. Система повертається на один із попередніх етапів:

може бути змінено завдання у множині $\{K\}$;

додано нових користувачів $\{J\}$;

скориговано аналітичні моделі (наприклад, оновлено апіорні розподіли в байєсівській моделі).

Цей ітераційний процес триває до отримання вичерпних та достовірних результатів. Розглянемо, як система виконує запит на ітерацію, вносячи зміни у свою модель та перезапускаючи процес для досягнення достовірних результатів. Після того, як на основі експертного висновку сформовано запит на ітерацію $Req_{iter}(k)$, система переходить до фази безпосереднього коригування своєї моделі та робочих параметрів, що забезпечує адаптивність та здатність до самовдосконалення.

Крок 1. Аналіз запиту на ітерацію

Система отримує та аналізує об'єкт запиту (38)

Вона визначає:

1. Точку повернення ($TargetStage$) до якого етапу (Планування, Обробка, Аналіз) необхідно повернутися;

2. Характер змін ($ModificationParams$) які саме компоненти моделі або конфігурації потрібно змінити.

Крок 2. Модифікація стану системи

Процес коли система вносить зміни у свій поточний стан S_{iz} , формуючи новий, скоригований стан S_{iz}' , залежить від параметрів модифікації:

1. Зміна завдань випробувань виконується, якщо експерти вимагають додаткових тестів, то до множини завдань $\{K\}$ додається новий елемент. Система також оновлює пов'язані матриці взаємодії.

2. Зміна складу експертів або обладнання проводиться, якщо змінюється склад випробувальної бригади, оновлюється множина користувачів $\{J\}$ та матриця їх розподілу по вузлах H . Аналогічно можуть бути змінені множини $\{C\}$, $\{I\}$ та відповідні матриці.

3. Коригування аналітичних моделей здійснюється, якщо експерти виявили, що застосований аналітичний метод був неоптимальним, то система може змінити конфігурацію $A_{opt}(k)$.

Крок 3. Перезапуск процесу з точки повернення

Після оновлення стану до S_{iz}' починає виконуватися етап вказаний у запиті ($TargetStage$).

Якщо $TargetStage = \langle Stage_3_Analysis \rangle$, система повторно запускає оператор аналізу $F_{analyze}$, але вже з новими налаштуваннями аналітичних моделей.

Якщо $TargetStage = \langle Stage_1_Planning \rangle$, система ініціює повний новий цикл обробки для додаткового завдання випробувань.

Цей ітераційний процес триває поки на етапі експертного аналізу не отримають вердикт «Підтверджено» та директиву «Затвердити результати».

Процес коригування моделі можна описати як операцію оновлення стану системи, що формалізується за виразами:

$$S_{iz}' = F_{\text{correct}}(S_{iz}, \text{Req}_{\text{iter}}(k)) \quad (39)$$

$$\text{Наступний крок: } \rightarrow M_{\text{TargetStage}}(S_{iz}'), \quad (40)$$

де S_{iz}' – новий (скоригований) стан системи після застосування змін. Всі подальші операції будуть виконуватися вже на основі цього оновленого стану;

F_{correct} – оператор коригування, функція, що приймає поточний стан та запит на ітерацію і повертає новий стан в якому реалізовані необхідні зміни;

S_{iz} – поточний стан системи до початку ітерації;

$\text{Req}_{\text{iter}}(k)$ – запит на ітерацію, що містить директиви щодо необхідних змін ($\text{ModificationParams}$) та точки повернення (TargetStage);

$M_{\text{TargetStage}}$ – символічне позначення цільового етапу з загального операторного методу (наприклад, Ψ_{anal} , Ψ_{exec}), з якого буде запущено процес з використанням нового стану S_{iz}' ;

Цей механізм є практичною реалізацією циклічних зв'язків, закладених у концептуальну модель процесу обробки параметричної інформації під час проведення випробувань зразків ОБТ [15]. Він перетворює статичну математичну модель S_{iz} на динамічну, адаптивну структуру, здатну реагувати на експертні висновки та ітераційно покращувати якість та достовірність кінцевих результатів випробувань, що можна формалізувати виразом:

$$Y_{it}: F_{\text{expert_review}} \circ F_{\text{feedback}} \circ F_{\text{correct}} \rightarrow S'_{iz} \quad (41)$$

Таким чином, процес випробувань можна представити композицією операторів, які описують кожний етап випробувань виразом (1).

Однак для практичної реалізації цієї композиції та забезпечення автоматизованого виконання всіх етапів необхідно деталізувати функціональне призначення кожного оператора та встановити чіткі правила їх послідовного застосування. Кожен оператор у виразі (1) виконує специфічну роль у перетворенні вхідних даних: Y_p формує початкову конфігурацію системи, Y_{ex} реалізує збір та первинну обробку даних, Y_{an} забезпечує аналітичне опрацювання результатів, а Y_{it} підтримує циклічність процесу через механізм зворотного зв'язку.

З огляду на те, що автоматизація передбачає не лише послідовне виконання операцій, але й чітку специфікацію вхідних параметрів, проміжних станів та вихідних результатів для кожного етапу, процес автоматизації обробки параметричної інформації можна формалізувати наступним розгорнутим виразом:

$$A: \Pi_{iz} \times P_{\text{proc}}(k) \times D_{\text{rec}}(k) \times S_{iz}' \rightarrow R_f \quad (42)$$

де результати роботи попереднього оператора ініціює роботу наступного оператора, що забезпечує наскрізну трансформацію даних від початкового стану системи S_{iz} через усі етапи обробки до кінцевого результату R_f .

Висновки й перспективи подальших досліджень

Для підвищення оперативності проведення випробувань та забезпечення ефективного використання наявних ресурсів (випробувального обладнання, систем збору, обробки та аналізу даних, каналів обміну інформації, сховищ даних, вузлів мережі, користувачів) потрібно отримувати точну (якісну) параметричну інформацію про зразок озброєння та військової техніки, що порівнюється з вимогами тактико – технічного завдання до такого зразка та наданими висновками (протоколами та актами за результатами випробувань) про відповідність висунутим вимогам. Своєчасне прийняття рішення стосовно зразка озброєння та військової техніки забезпечується автоматизацією процесу обробки параметричної інформації завдяки перетворенню вхідних даних випробувань у кінцеві аналітичні продукти у вигляді звітів, протоколів, актів.

Представлення процесу випробувань озброєння та військової техніки послідовною композицією функціональних операторів планування, обробки, аналізу та ітерації дало змогу трансформувати цей процес з погляду обробки параметричної інформації за етапами під час реалізації яких:

формується програми та методики випробувань; реалізується послідовна композиція функцій синхронізації, калібрування, фільтрації нормалізації та збереження отриманих даних, що формують вихідний масив оброблених даних;

проводиться аналіз отриманих даних та формується висновок, що містить основні рекомендації, щодо застосування зразка, який випробується, інтегральну оцінку показника якості, яка відображає загальний технічний рівень зразка та текстове обґрунтування прийнятого рішення з переліком параметрів і вузлів, які не відповідають вимогам тактико-технічного завдання і потребують покращення з боку розробника;

фінальний висновок за результатами випробувань верифікується експертами або формує зворотний зв'язок, що ініціює коригування моделі забезпечуючи високу якість та достовірність фінального управлінського рішення.

Перспективами подальших досліджень є: розроблення методики автоматизації обробки параметричної інформації під час випробувань зразків озброєння та військової техніки із застосуванням інформативних технологій; Також розроблений у статті операторний метод та запропонована математична модель можуть бути використані як теоретична основа для створення інформаційної технології для автоматизованої системи обробки параметричної інформації, яка б реалізовувала описані модулі збору, обробки, аналізу, прийняття рішення та оператори.

Список бібліографічних посилань

1. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1995. 76 с. (дата звернення 22.10.2025).
2. ДСТУ В 15.210:2023. Система розроблення і поставлення продукції на виробництво. Військова техніка. Випробування дослідних зразків. Основні положення. [Чинний від 2023-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2023. 43 с. (дата звернення 22.10.2025).
3. ДСТУ ISO/IEC 17000:2021. Оцінювання відповідності. Словник і загальні принципи (ISO/IEC 17000:2020, IDT). [Чинний від 2022-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 24 с. (дата звернення 22.10.2025).
4. DoDI 5000.98. Operational Test and Evaluation and Live Fire Test and Evaluation. Washington, DC: U.S. Department of Defense, December 9, 2024. URL: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500098p.PDF> (Accessed 27 October 2025).
5. DoDM 5000.100. Test and Evaluation Master Plans and Test and Evaluation Strategy. Washington, DC: U.S. Department of Defense, December 9, 2024. URL: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodm/5000100m.PDF> (Accessed 27 October 2025).
6. Array of Engineers. Defense Automated Testing Projects. 2024. URL: <https://www.arrayofengineers.com/projects-defense> (Accessed 27 October 2025).
7. Rohde & Schwarz. Military Communication Testing Solutions. 2024. URL: <https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/aerospace-and-defense/land/military-communication-testing/> (Accessed 27 October 2025).
8. IB-Lenhardt AG, IBL-Lab GmbH. Military Defense Equipment and Components Testing. 2024. URL: <https://ib-lenhardt.com/solutions/military-defense-testing> (Accessed 27 October 2025).
9. Eurofins MET Labs. Military Testing Services. 2019. URL: <https://metlabs.com/industries/military/> (Accessed 27 October 2025).
10. Military Aerospace. Test and measurement equipment keeps high-tech systems in working order. 2024. URL: <https://www.militaryaerospace.com/test/article/14214824/> (Accessed 27 October 2025).
11. Astronics Test Systems. Military Test Equipment Solutions. 2024. URL: <https://www.astronics.com/test-systems/military-test-equipment> (Accessed 27 October 2025).
12. Про затвердження Порядку збирання та практичного використання інформації бортових систем реєстрації на підприємствах цивільної авіації України: Наказ Державної служба України з нагляду забезпечення безпеки авіації від 14.11.2005 № 480 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1433-05#Text>. (дата звернення 27.10.2025).
13. Про затвердження Правил об'єктивного контролю в державній авіації України: Наказ Міністерства оборони України від 03.12.2014 № 860 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1622-14#Text> (дата звернення 27.10.2025).
14. Тертишнік Є. М. Вибір підходів до автоматизації процесу обробки параметричної інформації під час проведення випробувань озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних сил України*. 2025. Вип. 3 (98). С. 319–333 (дата звернення 29.10.2025).
15. Тертишнік Є. М. Модель процесу обробки параметричної інформації під час проведення випробувань зразків озброєння та військової техніки. *Науковий журнал Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2025. Вип. 2 (53). С. 84–94. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-84-94 (дата звернення 01.11.2025).
16. Тертишнік Є. М. Математична модель процесу обробки параметричної інформації під час проведення випробувань озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних сил України*. 2025. Вип. 4 (99). С. 96–119 (дата звернення 01.11.2025).
17. Тертишнік Є. М. Аналіз умов та чинників, що впливають на обробку параметричної інформації під час випробувань озброєння та військової техніки з використанням інформаційних технологій в умовах воєнного стану. *Науково-технічний журнал Озброєння та військова техніка*. 2025. Вип. 2 (46). С. 56–70. DOI: 10.34169/2414-0651.2025.2(46).56-69 (дата звернення 01.11.2025).

OPERATIONAL METHOD FOR AUTOMATING THE PROCESSING OF PARAMETRIC INFORMATION DURING THE TESTING OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

TERTYSHNIK Yevhen, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0003-3356-7639>

Formulation of the problem in general. In the context of the Russian Federation's full-scale invasion of Ukraine, the need for weapons and military equipment samples is growing, which raises the issue of increasing the efficiency of testing such samples. This directly depends on the growing volume and complexity of data on modern weapons and military equipment, the imperfection of existing software, the lack of systematised databases, the availability of outdated measuring equipment, and the lack of automated processing systems and modern testing methods. The result is significant time and labour costs, reduced reliability of test results, and a slowdown in the decision-making process. Therefore, formalising the process of automating the processing of parametric information during OVT testing is an important scientific task. **Objective:** The purpose of the article is to develop an operational method for automating the processing of parametric information during the testing of weapons and military equipment, aimed at increasing the efficiency of testing and ensuring the effective use of available resources.

Research methods. The following methods were used to achieve the goal: induction to formulate the definition of «parametric information of weapons and military equipment» in the testing system, formalisation to transform the testing process and automate information processing through a sequential composition of operators and definition of the stages of the method, mathematical modelling to describe the state of the automated parametric information processing system in the form of a tuple, multifactorial analysis as a basis for developing a formalised procedure for selecting analytical tools, expert assessment at the stage of selecting analytical tools to determine the relevance coefficients of the criteria.

Literature review. The issue of automating the processing of parametric information during weapons testing is being actively researched both domestically and internationally. National and international standards define the basic approaches to testing and evaluating the compliance of military equipment. The US Department of Defence emphasises the need for maximum automation of data conveyors, the introduction of test data management systems, and the use of artificial intelligence to verify system components. Recent studies have demonstrated the potential to reduce manual testing time by 80% and develop comprehensive solutions for the automated testing of military systems. Despite the active development of test automation technologies, a comprehensive method for processing parametric information remains necessary to ensure the flexibility of the testing process and support informed decision-making, in line with the principle of human control.

Research results. Interrelated results have been obtained, forming a comprehensive system for automating the processing of parametric information during the testing of weapons and military equipment. The stages of testing have been considered and the main measures to be taken have been identified. A definition of parametric information in the context of testing weapons and military equipment has been formulated. National and international guidance documents defining the main categories and organisational features of military equipment testing have been analysed. An operator method for automating the processing of parametric information has been developed and described, which is implemented in four consecutive stages: planning, which formalises the input data (tasks, users, infrastructure), configures the system by converting the input sets into output matrices, and selects the analytical tools; processing, which involves automatic data collection, initial processing (cleaning, filtering, normalisation, synchronisation) and storage in a database; analysis and formation of results, where selected analytical methods are applied, interpretation and visualisation of results (reports, dashboards) are carried out, and draft decisions and recommendations are formed; iteration and adaptation, which involves analysis of the results by experts (human-in-the-loop), formation of feedback and, if necessary, adjustment of the system model with a return to one of the previous stages. A procedure has been developed for forming a hybrid analytical model based on a multifactorial analysis of five criteria with the calculation of weighting coefficients and the determination of the role of methods through threshold values. The automation process is represented by a complex expression that provides end-to-end transformation from the initial state of the system through the processing stages to the final result in the form of a set of analytical reports, visualisations, assessments of compliance with tactical and technical characteristics, and draft decisions on testing the sample. Interrelated results have been obtained, which form a comprehensive system for automating the processing of parametric information during the testing of weapons and military equipment. The stages of testing have been considered and the main measures to be taken have been determined. A definition of parametric information in the context of testing weapons and military equipment has been formulated. National and international guidance documents defining the main categories and organisational features of military equipment testing have been analysed. An operator method for automating the processing of parametric information has been developed and described, which is implemented in four consecutive stages: planning, which formalises the input data (tasks, users, infrastructure), configures the system by converting the input sets into output matrices, and selects the analytical tools; processing, which involves automatic data collection, initial processing (cleaning, filtering, normalisation, synchronisation) and storage in a database; analysis and formation of results, where selected analytical methods are applied, interpretation and visualisation of results (reports, dashboards) are carried out, and draft decisions and recommendations are formed; iteration and adaptation, which involves analysis of the results by experts (human-in-the-loop), formation of feedback and, if necessary, adjustment of the system model with a return to one of the previous stages. A procedure has been developed for forming a hybrid analytical model based on a multifactorial analysis of five criteria with the calculation of weighting coefficients and the determination of the role of methods through threshold values. The automation process is represented by a complex expression that provides end-to-end transformation from the initial state of the system through the processing stages to the final result in the form of a set of analytical reports, visualisations, assessments of compliance with tactical and technical characteristics, and draft decisions on testing the sample.

Research novelty. The developed method uses an operator approach and formalises the testing process in the form of a sequential composition of four operators: planning, processing, analysis and iteration, which transform the state of the system; it clarifies the formalised order of selecting analytical tools based on multifactorial analysis and quantitative assessment of the feasibility of applying the method. In addition, the concept of 'parametric information on weapons and military equipment' in the context of testing, formulated by the method of induction, has been clarified.

Theoretical and practical significance. The theoretical significance lies in the development of an operator method for automating the processing of parametric information and a mathematical model, Siz, which creates a scientific basis for the formalisation and automation of data processing during OVT testing. The practical significance of the operator method described in the article lies in increasing the efficiency of testing, ensuring the effective use of available resources, and accelerating the decision-making process through the automated conversion of input data into final analytical products (reports, protocols, acts), which significantly speeds up and improves the quality of the work of experts.

Conclusion and future work. To increase the efficiency of testing and ensure the effective use of available resources (testing equipment, data collection, processing and analysis systems, information exchange channels, data storage facilities, network nodes, users), it is necessary to obtain accurate (high-quality) parametric information about

the sample of weapons and military equipment, which is compared with the requirements of the tactical and technical specifications for such a sample and the conclusions (protocols and acts based on the test results) regarding compliance with the requirements. Timely decision-making regarding a sample of weapons and military equipment is ensured by automating the process of processing parametric information by converting input test data into final analytical products in the form of reports, protocols, and acts. The representation of the process of testing weapons and military equipment as a sequential composition of functional operators for planning, processing, analysis, and iteration made it possible to transform this process in terms of processing parametric information in stages during which: test programmes and methodologies are formed; a sequential composition of functions for synchronisation, calibration, filtering, normalisation and storage of the obtained data is implemented, forming the initial array of processed data; the obtained data is analysed and a conclusion is formed containing the main recommendations for the application of the tested sample, an integral assessment of the quality indicator reflecting the overall technical level of the sample, and a textual justification of the decision taken with a list of parameters and components that do not meet the requirements of the tactical and technical task and need to be improved by the developer; the final conclusion based on the test results is verified by experts or generates feedback that initiates model adjustments, ensuring high quality and reliability of the final management decision. Prospects for further research include: developing a methodology for automating the processing of parametric information during the testing of weapons and military equipment samples using information technologies; The operator method developed in the article and the proposed mathematical model can be used as a theoretical basis for creating information technology for an automated parametric information processing system that would implement the described modules for collection, processing, analysis, decision-making, and operators.

Keywords: automation, processing, method, automated system, mathematical model, analysis, databases, algorithm, visualisation, system applications.

References

- 1. Derzhstandart Ukrainy**, (1995). *Testing and quality control of products. Terms and definitions*. DSTU 3021-95. Kyiv: Vyd. ofits. Kyiv [Accessed 22 October 2025].
- 2. Derzhstandart Ukrainy**, (2023). *System for the development and delivery of products for production. Military equipment. Testing of prototypes. Basic provisions*. DSTU B 15.210:2023. Kyiv: Vyd. ofits. Kyiv [Accessed 22 October 2025].
- 3. Derzhstandart Ukrainy**, *Conformity assessment. Vocabulary and general principles*. DSTU ISO/IEC 17000:2021. Kyiv: Vyd. ofits. Kyiv [Accessed 22 October 2025].
- 4. Operational Test and Evaluation and Live Fire Test and Evaluation** [online], (1998). U.S. Department of Defense instruction DoDI 5000.98, 9 December. Available at: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodi/500098p.PDF> [Accessed: 27 October 2025].
- 5. Test and Evaluation Master Plans and Test and Evaluation Strategy**. [online], (2024). U.S. Department of Defense instruction DoDM 5000.100, 9 December. URL: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodm/5000100m.PDF> [Accessed 27 October 2025].
- 6. Array of Engineers Defence Automated Testing Projects** [online], (2024). Available at: <https://www.arrayofengineers.com/projects-defense> [Accessed 27 October 2025].
- 7. Rohde & Schwarz Military Communication Testing Solutions** [online], (2024). Available at: <https://www.rohde-schwarz.com/us/solutions/aerospace-and-defense/land/military-communication-testing/> [Accessed 27 October 2025].
- 8. IB-Lenhardt AG, IBL-Lab GmbH. Military Defence Equipment and Components Testing**. [online], (2024). Available at: <https://ib-lenhardt.com/solutions/military-defense-testing> [Accessed 27 October 2025].
- 9. Eurofins MET Labs. Military Testing Services** [online], (2019). Available at: <https://metlabs.com/industries/military/> [Accessed 27 October 2025].
- 10. Military Aerospace. Test and measurement equipment keeps high-tech systems in working order** [online], (2024). Available at: <https://www.militaryaerospace.com/test/article/14214824/> [Accessed 27 October 2025].
- 11. Astronics Test Systems. Military Test Equipment Solutions** [online], (2024). Available at: <https://www.astronics.com/test-systems/military-test-equipment> [Accessed on 27 October 2025].
- 12. On approval of the Procedure for the collection and practical use of information from on-board recording systems at civil aviation enterprises in Ukraine** [online], (2005). Order of the State Aviation Safety Service of Ukraine № 480, 14 November. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1433-05#Text> [Accessed 27 October 2025].
- 13. On approval of the Rules for objective control in state aviation of Ukraine** [online], (2014). Order of the Ministry of Defence of Ukraine № 860, 3 December. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1622-14#Text> [Accessed 27 October 2025].
- 14. Tertyshnik, Ye. M.** (2025). Selection of approaches to automating the processing of parametric information during the testing of weapons and military equipment. *Collection of scientific works of the Central Research Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*. 3 (98), 319-333 [Accessed 29 October 2025].
- 15. Tertyshnik, Ye. M.** (2025). Model of the process of processing parametric information during testing of weapons and military equipment samples. *Scientific journal Modern Information Technologies in Security and Defence*. 2 (53), 84-94. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-84-94 [Accessed 01 November 2025].
- 16. Tertyshnik, Ye. M.** (2025). Mathematical model of the process of processing parametric information during testing of weapons and military equipment. *Collection of scientific works of the Central Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine*. 4 (99), 96-119 [Accessed 01 November 2025].
- 17. Tertyshnik, Ye. M.**, (2025). Analysis of conditions and factors affecting the processing of parametric information during testing of weapons and military equipment using information technology in a state of martial law. *Scientific and Technical Journal Weapons and Military Equipment*. 2 (46), 56-70. DOI:1034169/2414-0651.2025.2(46).56-69 [Accessed 01 November 2025].

Рукопис надійшов до редакції	27.10.2025
Рукопис прийнято до друку після рецензування	21.11.2025
Дата публікації	30.12.2025